



UNIVERSITÉ DE LIÈGE
INSTITUT DES SCIENCES HUMAINES
ET SOCIALES
Socio Economie Environnement
Développement (SEED)

Analyse et enjeux d'un projet d'électrification rurale par microcentrale solaire au Lesotho.

Sylvain Quoilin

Travail de fin d'études réalisé en vue de l'obtention du grade de "Master en Population et Développement", orientation "Population et Environnement".

Promoteur: Marc Mormont
Lecteurs: Gauthier Pirotte, Jean-Marie Hauglustaine

Année Académique 2009-2010

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail de fin d'études. En particulier, le professeur Marc Mormont pour la supervision du travail et pour la confiance qu'il m'a témoignée.

Je remercie également Matthew Orosz et tous les membres de STG International pour leur accueil et l'excellente ambiance de travail au MIT et au Lesotho.

Merci également au CECODEL de l'Université de Liège pour avoir rendu ce projet possible en subsidiant mon séjour au Lesotho.

Finalement un merci tout particulier à Jessica Schrouff pour son soutien tout au long de ce travail et pour la relecture de celui-ci.

Table des matières

1. Introduction.....	6
2. Objet du travail et méthodologie.....	8
2.1. Contexte.....	8
2.2. Méthodologie et hypothèses de travail.....	8
3. Énergie et développement: Quels enjeux?.....	10
3.1. État des lieux.....	10
3.2. Bénéfices potentiels de l'accès à l'énergie.....	12
3.3. Énergie et indicateurs sociaux.....	14
3.4. Énergie et environnement.....	16
3.4.1. Réchauffement climatique.....	16
3.4.2. Déforestation.....	18
3.4.3. Qualité de l'air.....	19
3.5. Énergie et développement économique.....	20
3.5.1. Approche Macro-économique.....	20
3.6. Le cas particulier de l'électrification rurale.....	21
3.6.1. Santé.....	21
3.6.2. Éducation.....	23
3.6.3. Gender.....	23
3.6.4. Activités productives.....	26
3.6.5. Conclusions.....	27
4. Étude de cas et grille d'analyse.....	28
4.1. Facteurs de succès ou d'échecs des projets d'électrification rurale.....	28
4.1.1. Participation des bénéficiaires.....	28
4.1.2. Démonstrateurs et adoption de la technologie.....	29
4.1.3. Coût et concurrence technologique.....	31
4.1.4. Technologie adaptée.....	32
4.1.5. Transferts de technologie et maintenance.....	33
4.1.6. Décentralisation.....	35
4.1.7. Mode d'introduction sur le marché.....	39
4.1.8. Subsidiation/Financement.....	41
4.1.9. Identification des besoins.....	42
4.1.10. Impact environnemental.....	44
4.2. Résumé des critères et grille d'analyse.....	46
5. Évaluation d'un projet d'électrification par ORC solaire au Lesotho.....	50
5.1. Description du projet.....	50

5.1.1.STG International.....	50
5.1.2.Technologie du cycle de Rankine organique solaire.....	51
5.1.3.La situation du Lesotho.....	53
5.1.4.Activités de STG depuis 2005.....	54
5.2.Analyse du projet d'électrification.....	57
5.2.1.Coût.....	57
5.2.2.Niveau de participation des bénéficiaires.....	62
5.2.3.Démonstrateur et adoption de la technologie.....	62
5.2.4.Technologie appropriée et fiabilité.....	63
5.2.5.Transferts de technologie et maintenance.....	63
5.2.6.Identification des besoins.....	64
5.2.7.Décentralisation.....	65
5.2.8.Impact environnemental.....	65
5.2.9.Mode d'introduction sur le marché.....	67
5.2.10.Subsides.....	67
5.3.Résumé et application de la grille d'analyse.....	67
6.Conclusions et recommandations.....	69

Abréviations et acronymes

ATS	Appropriate Technology Solutions
BM	Banque Mondiale
ER	Electrification Rurale
GEF	Global Environment Facility
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
IEA	Agence internationale de l'énergie
HFC	Hydro-fluoro-carboné (fluide réfrigérant)
HCFC	Hydro-chloro-fluoro-carboné (fluide réfrigérant)
LPG	Liquefied Petroleum Gas
MIT	Massachusetts Institute of Technology
OCDE	Organisation de coopération et de développement économiques
ONG	Organisation non gouvernementale
ORC	Cycle de Rankine Organique (Organic Rankine Cycle)
PNB	Produit national brut
PNUD	Programme des Nation Unies pour le développement
PV	Photovoltaïque
R&D	Recherche et développement
STG	Solar Turbine Group

Unités de mesure

ha	hectare
km	kilomètre
kV	kilovolt
kW	kilowatt (unité de puissance)
kWe	kilowatt électrique (unité de puissance)
kWh	kilowatt heure (unité d'énergie)
l	litre
m ³	mètre cube
MW	megawatt
MWh	megawatt heure
Rs	Roupiés
Tep	tonne équivalent pétrole
TWh	terawatt heure
USD	US dollar
Wc	Watt crête

1. Introduction

L'accès à l'énergie est un élément fondamental pour le développement humain. Des institutions comme la Banque Mondiale, les Nations Unies, ou encore l'Union Européenne considèrent l'énergie comme essentielle pour promouvoir ou améliorer une série de services de base comme l'éclairage, l'accès à l'eau potable, les centres de santé, l'éducation ou les communications.

Le développement économique qu'ont connu de nombreuses régions dans le monde depuis plus d'un siècle est allé de pair avec une croissance importante de la demande énergétique. Malheureusement, cette croissance de la demande a été majoritairement couverte par le recours aux sources d'énergie fossile, motivé par des considérations économiques. D'autres facteurs comme les émissions de CO₂, le caractère limité des réserves fossiles et l'indépendance énergétique nationale n'ont pas été pris en compte.

S'il apparaît aujourd'hui indispensable de limiter nos émissions de gaz à effet de serre, il est plus indispensable encore d'assurer le développement énergétique des pays moins industrialisés de manière propre. Les objectifs du millénaire pour le développement ne pourront être réalisés sans une augmentation substantielle de la consommation énergétique. Le défi consiste donc à assurer cette demande sans pour autant augmenter de façon dramatique les émissions de gaz à effet de serre au niveau mondial.

Ce travail aborde plus particulièrement la problématique de l'accès à l'électricité en région rurale dans les pays en développement. Ces régions sont en effet celles qui présentent le taux de pénétration le plus faible en matière d'accès à l'électricité et donc le potentiel de croissance le plus important.

Les défis inhérents aux projets d'électrification rurale sont nombreux: faible densité de population, distances importantes, faible consommation d'électricité, coûts d'investissement élevés, etc. Ajoutons à cela que les revenus de population-cible sont généralement bas et qu'ils ne peuvent en général assumer à eux-seuls le coût de l'extension du réseau électrique ou de l'installation d'un système décentralisé.

Traditionnellement, l'électrification s'effectue au travers de l'extension du réseau électrique. Cette extension repose sur une gestion centralisée des lignes à haute et moyenne tension, et nécessite un important effort de planification. Dans le cas des pays en développement, il n'est pas toujours avéré que les gouvernements possèdent les capacités financières et managériales requises pour mener cette tâche à bien. On constate ainsi dans des pays comme le Lesotho un service intermittent, avec des fluctuations de tension qui ne permettent pas d'assurer un service continu de qualité acceptable. Par conséquent, un nombre important d'entreprises, d'hôpitaux, ou d'institutions publiques sont obligés de se munir de leur propres générateurs électriques, par exemple pour assurer un service continu des réfrigérateurs permettant de conserver les vaccins. L'extension du réseau n'a en outre de sens que pour des densités de population minimales, permettant de diminuer le coût d'une connexion par des effets d'échelle, les lignes haute et moyenne tension étant très coûteuses.

La production d'électricité décentralisée dans les zones rurales constitue donc une solution intéressante pour les régions à faible densité de population et où les besoins sont limités. Cette production peut aisément être modulée en termes de puissance installée, et la portée d'une installation peut varier d'un ménage à un, voire plusieurs villages.

Aujourd'hui, la question n'est plus de savoir si les logements ruraux seront électrifiés ou non, mais plutôt de savoir quand ils le seront, et surtout à l'aide de quelle technologie. Les défis

environnementaux du 21^{ème} siècle, et en particulier celui du réchauffement climatique nous poussent à investir massivement dans l'efficacité énergétique et dans les énergies renouvelables. Dans cette optique, les technologies décentralisées sont particulièrement adaptées aux sources renouvelables, telles que le soleil, la biomasse, ou encore l'énergie hydraulique. La production d'électricité décentralisée connaît dès lors une croissance importante depuis le début des années 90, et est considérée par des organismes comme la Banque Mondiale ou le GEF (Global Environment Facility) comme une option prioritaire à développer (World Bank, 1996; GEF, 2009).

Cependant, les exemples ne manquent pas de projets d'électrification rurale peu concluants, n'ayant jamais fonctionné, ou n'ayant pas dépassé le stade de l'unité de démonstration (Zomers, 2001). Ces échecs peuvent être dus à une multitude de facteurs sociaux, économiques ou institutionnels qu'il convient d'analyser afin d'éviter de reproduire les erreurs du passé.

Le présent travail porte sur un projet d'électrification rurale dans les régions montagneuses du Lesotho. La technologie envisagée est celle de la concentration solaire couplée à un Cycle de Rankine Organique (ORC). Il s'agit d'une technologie novatrice, ne possédant encore que très peu d'applications commerciales, et dont l'objectif est de concurrencer la technologie photovoltaïque.

Le but du travail est d'évaluer l'intérêt d'un tel projet à divers niveaux: potentiel de développement économique, de réduction de la pauvreté, ou encore d'augmentation du niveau de vie et de scolarisation. L'objectif est de profiter des expériences acquises par le passé pour créer une grille d'évaluation du projet selon divers critères, définis à l'aide d'une large revue de littérature. Cette grille est ensuite appliquée au cas concret du projet d'électrification étudié, chaque critère étant évalué dans la mesure des informations disponibles.

2. Objet du travail et méthodologie

2.1. Contexte

Le présent travail s'intègre dans le contexte de ma thèse de Doctorat en Sciences Appliquées, visant à contribuer au développement de la technologie des cycles de Rankine Organiques de faible puissance.

Dans le cadre de mes travaux, j'avais été contacté en 2008 par Matthew Orosz, doctorant au MIT (Massachusetts Institute of Technology), pour établir une collaboration visant à développer un ORC solaire pour les régions rurales d'Afrique Sub-Saharienne.

Un premier séjour scientifique a eu lieu au MIT pendant les mois de septembre, octobre et décembre 2008, séjour durant lequel j'ai pu me familiariser avec le système envisagé, et contribuer au projet, notamment par l'expérience acquise au Laboratoire de Thermodynamique de l'ULg dans les domaines des expulseurs volumétriques et de la modélisation des cycles thermodynamiques.

Le groupe de recherche du MIT est à la base d'une ONG (STG International) visant à promouvoir la technologie des ORC solaires au Lesotho, au travers d'installations pilotes dans les villages des zones montagneuses non connectées au réseau.

En juillet/août 2009, je me suis rendu sur place à Maseru pour démarrer le montage d'un troisième prototype, pour lequel ma contribution se concentrait principalement sur le design du cycle de puissance. Ce voyage était subsidié par le CECODEL et entré dans le cadre du Master en Population et Développement comme expérience de terrain nécessaire à la réalisation du présent travail. Depuis lors, la collaboration se poursuit, plusieurs publications conjointes ont été proposées, et de nouveaux déplacements au Lesotho sont prévus dans les mois à venir.

Mes objectifs en débutant le Master en Population & Développement étaient d'acquérir un regard critique et une vision élargie (non exclusivement technique) des projets de développement auquel je pourrais être amené à participer dans ma vie professionnelle, cette thématique m'intéressant particulièrement. L'objectif de ce travail de fin d'études s'inscrit dans ce cadre: il s'agit de proposer une analyse critique et multicritères du projet auquel j'ai participé, mettant à profit les outils d'analyse acquis lors de ma formation de Master.

2.2. Méthodologie et hypothèses de travail

Afin d'évaluer la pertinence, les enjeux, et le potentiel du projet d'électrification rural proposé par STG International, l'expérience acquise au fil des années par les multiples projets d'électrification des zones rurales des pays en développement constitue un outil précieux.

Ce travail vise à effectuer une analyse critique du projet, en se mettant dans la peau d'un expert de la BM (par exemple) chargé d'évaluer sa pertinence et donc l'opportunité ou non d'allouer des fonds au projet. Pour ce faire, le cheminement méthodologique suivant est proposé:

1. La problématique de l'accès à l'énergie en général est mise en relation avec la problématique du développement. Des indicateurs macro-économiques et sociaux sont étudiés au niveau national ou régional afin d'évaluer les enjeux et les bénéfices potentiels de l'énergie pour le développement.
2. La problématique, plus spécifique, de l'accès à l'électricité en zone rurale est ensuite

abordée. Les enjeux et bénéfices potentiels locaux sont évalués au travers d'une revue bibliographique sur le sujet. Le but est d'évaluer dans quelle mesure l'électricité peut contribuer aux enjeux liés à l'énergie et relevés au point 1.

3. Un grand nombre d'expériences (fructueuses ou non) d'électrification sont examinées. Les enseignements qui en découlent sont utilisés pour établir une grille d'analyse comprenant les critères de succès ou d'échec extraits de ces expériences.
4. Cette grille d'analyse est appliquée au projet étudié, et des recommandations sont formulées pour palier à des déficiences éventuelles.

L'élément charnière du travail est donc la grille d'analyse: elle est le trait d'union entre les enseignements de la revue bibliographique et le projet que l'on désire évaluer. Il est important de remarquer que l'établissement de cette grille d'analyse présuppose plusieurs hypothèses:

- Il existe des caractéristiques techniques, sociales, économiques, institutionnelles liées aux projets d'électrification rurale qui mènent à un taux de réussite accru. Ces caractéristiques sont communes à un grand nombre de projets et peuvent être appliquées à des projets dont le contexte (géographique, économique, social, environnemental) diffère de celui des projets à l'aide desquels la grille a été établie.
- Ces caractéristiques peuvent être évaluées à l'aide d'une revue bibliographique, et au travers de publications scientifiques relatant diverses expériences d'électrification rurale.

Ce dernier point est particulièrement important. Peut-on en effet affirmer que la littérature scientifique reflète fidèlement la réalité du terrain? Plusieurs sources de biais sont identifiées:

- La grande majorité des références disponibles traitent des exemples de succès. Les cas où le projet d'électrification a échoué sont très peu nombreux.
- Si de nombreux documents sont disponibles pour les projets provenant d'ONG, d'organismes internationaux comme la BM ou le GEF (Global Environment Facility), ou de gouvernements, les cas de succès provenant du secteur privé sont nettement moins documentés.
- Dans de nombreux cas, les publications proviennent des promoteurs du projet d'électrification eux-mêmes, qui ne peuvent être considérés comme des observateurs totalement objectifs.
- La littérature concernant l'électrification "spontanée", qui ne résulte pas d'un projet de développement préétabli, est très rare. En particulier, on sait que les générateurs diesel occupent une place prépondérante dans les zones rurales, mais ils font l'objet d'un nombre très limité d'études.

Dans le cadre du présent travail, disposant de peu de données de terrain, la source principale de données est la littérature scientifique. Ces sources de biais sont donc inévitables, mais la conscience de leur existence peut permettre de les minimiser par une lecture critique.

Notons enfin que les critères proposés dans la grille d'analyse sont des critères multidisciplinaires (techniques, économiques, sociaux, etc.). L'approche proposée se veut transversale. Elle ne se limite donc pas à une analyse socio-anthropologique des projets d'électrification.

3. Énergie et développement: Quels enjeux?

3.1. État des lieux

L'accès à l'énergie est très inégal selon les régions du globe. Plus particulièrement, les différences entre pays industrialisés et pays en développement sont manifestes, et la quantité d'énergie consommée, ainsi que le type de combustible utilisé varient drastiquement selon les pays. Les quelques chiffres suivants sont représentatifs des ces inégalités (IEA, 2006) :

- 1.6 milliard d'êtres humains – un quart de la population mondiale – n'a pas accès à l'électricité. Si aucune politique volontariste n'est menée dans le domaine, ce chiffre devrait être de 1.4 milliard en 2030
- 4 personnes sur 5 sans électricité vivent dans les zones rurales de pays en voie de développement, principalement en Asie du Sud et en Afrique Sub-Saharienne. Ce chiffre évoluera probablement dans les années à venir, puisque la croissance démographique est plus importante dans les zones urbaines.
- 2.4 milliards de personnes ont recours à la biomasse traditionnelle (bois, résidus agricoles, fumier) pour se chauffer et pour cuisiner.
- La plupart des pays en développement sont des importateurs nets d'électricité

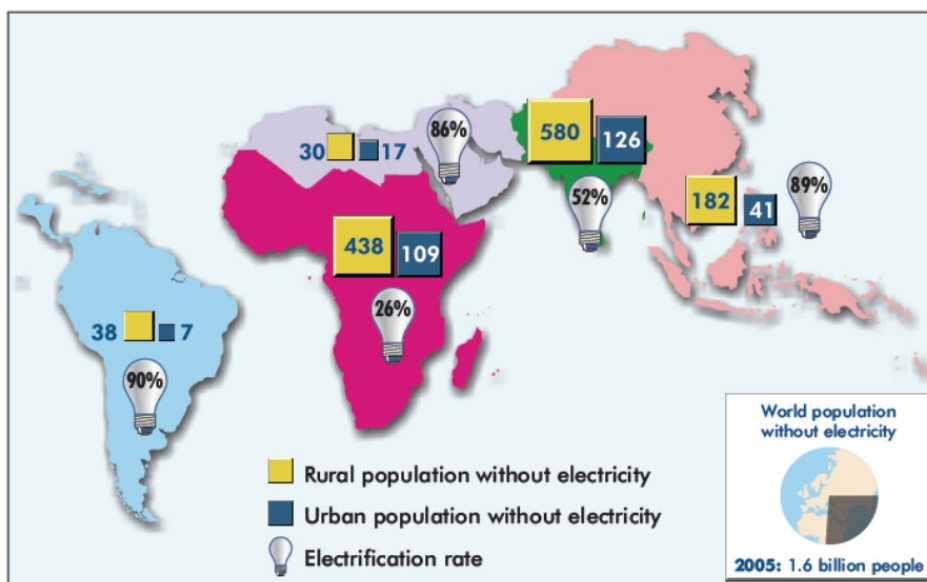


Figure 1: Répartition de la population dépourvue d'accès à l'électricité
source : IEA, 2006

La Figure 1 montre la répartition géographique des personnes n'ayant pas d'accès à l'électricité. On constate effectivement que l'Afrique est très en retard par rapport aux autres continents.

La Figure 2 montre le taux d'électrification rurale dans différentes régions. Environ 50% de la population rurale des pays en développement n'a pas accès à l'électricité. Cette proportion varie

fortement selon les régions: de 2% pour la Thaïlande, elle passe à environ 92% pour les pays les plus pauvres d'Afrique Sub-Saharienne (Martinot, 2002).

Les différences entre zones rurales et zones urbaines sont très marquée: En 2000, le taux d'électrification urbain était 7 fois supérieur au taux d'électrification rural en Afrique Sub-Saharienne. Il était environ deux fois supérieur en Asie du Sud (IEA, 2000).

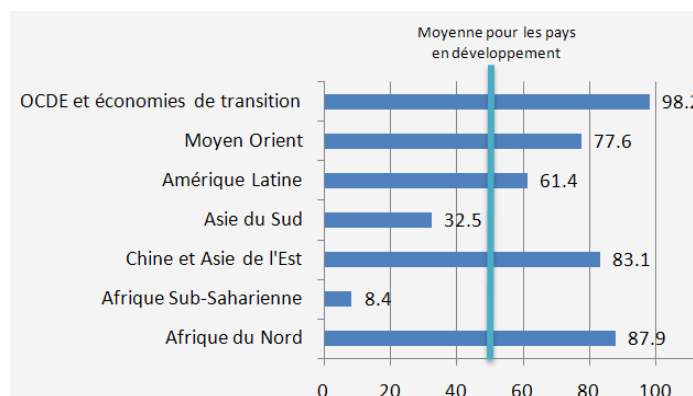


Figure 2: Taux d'électrification rurale (%) dans différentes zones pour l'année 2002. (Source des données: Zerriffi, 2007)

Il est également intéressant d'évaluer l'évolution temporelle du taux d'électrification. Ainsi, ces 25 dernières années, les pays en développement ont étendu l'offre d'électricité à plus de 1,3 milliards de personnes (500 millions dans les zones rurales, 800 millions dans les zones urbaines). Cela représente un accomplissement, mais on remarque qu'en Afrique et qu'en Asie du Sud, la croissance de la population connectée reste inférieure à la croissance démographique (World Bank, 1996, p 17).

Une part non négligeable de l'extension de l'électrification et partiellement financée par la Banque Mondiale, celle-ci ayant commencé à subsidier l'électrification rurale il y a une trentaine d'années. De ces projets, les trois quarts visent à améliorer l'offre énergétique, et la même proportion vise à améliorer le développement institutionnel. Seuls 60% ont pour objectif d'améliorer le bien-être (ex: les conditions environnementales), alors que seuls 7% ont comme objectif explicite la réduction de la pauvreté (World Bank, 2008).

Notons encore que, dans la plupart des pays, l'augmentation de la couverture provient de la croissance extensive (l'extension du réseau à de nouvelles communautés) plutôt qu'à la connexion de nouveaux utilisateurs dans les villages couverts. Même dans les villages couverts depuis 15 ou 20 ans, il n'est pas rare de rencontrer une proportion de 20 à 25% de ménages non connectés.

La production d'électricité décentralisée est principalement assurée par les générateurs diesel. On constate cependant une percée des systèmes photovoltaïques qui, malgré un coût initial plus élevé, présentent des caractéristiques plus avantageuses pour les habitations rurales.

Les technologies alternatives au diesel sont principalement l'énergie hydraulique, l'énergie solaire, et l'énergie de la biomasse (soit issue de la végétation, soit de la méthanisation des déchets agricoles).

On estime qu'en 2000, dans le monde, plus de 50 millions de ménages étaient alimentés par des centrales hydrauliques couplées à des réseaux électriques locaux. 10 millions de ménages avaient accès à l'électricité grâce au biogaz, et 1.1 million de ménages avaient recours aux panneaux photovoltaïques (Martinot, 2002).

Outre la consommation d'électricité, on remarque que la consommation de combustibles est

également fortement liée au niveau de développement industriel de la région considérée. La Figure 3 montre par exemple la part de la biomasse dans le mix énergétique pour différentes régions du globe. On constate effectivement que l'Afrique Sub-saharienne et l'Asie utilisent massivement la biomasse comme combustible principal.

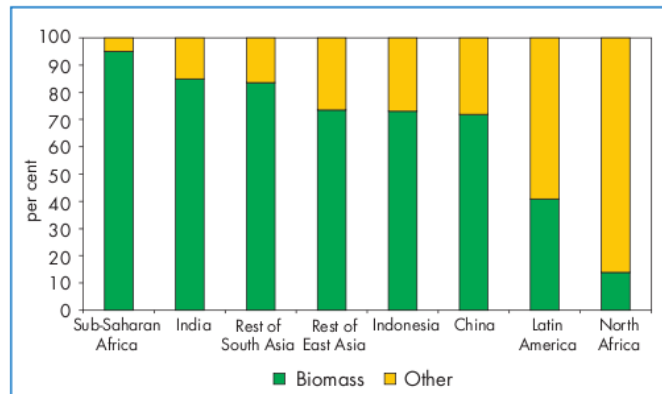


Figure 3: Proportion de la biomasse dans le mix énergétique du secteur résidentiel selon les régions
Source : IEA, 2006

3.2. Bénéfices potentiels de l'accès à l'énergie.

Les effets d'un accès accru à l'énergie sont multiples. Il est largement admis que l'énergie peut entre autres choses améliorer les niveaux d'éducation, générer des activités productives ou réduire l'exode rural.

On peut prendre pour exemple les travaux de Kanagawa (2007), qui propose un schéma synthétique des effets induits par un accès accru à l'énergie. Pour lui, les quatre grands domaines bénéficiant de l'accès à l'énergie sont la santé, l'éducation, le revenu et l'environnement (Figure 4)

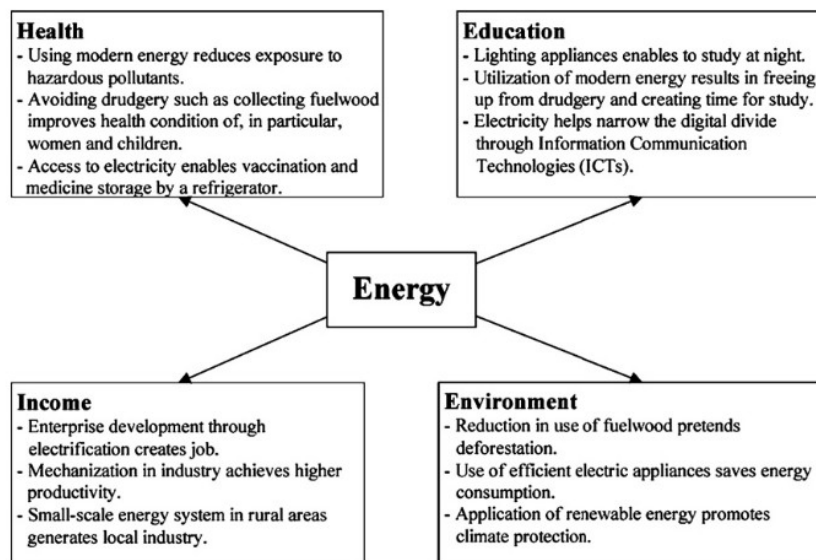


Figure 4: Influence de l'énergie sur d'autres composants
source : Kanagawa, 2006

Les objectifs du millénaire ne plaident pas explicitement pour un accès à accru à l'énergie. En

revanche, il semble que l'accès à l'énergie puisse contribuer de manière substantielle à l'accomplissement des objectifs du millénaire (Pablo del Río, 2006). Le Cadre 1 reprend chacun des ces 8 objectifs, et résume le rôle que pourrait jouer l'électrification.

1. **Eradicate extreme poverty and hunger:** *Electricity is essential for job creation and industrial activities.*
2. **Achieve universal primary education:** *In order to attract teachers to rural areas, houses and schools should have electricity. Good lighting conditions are necessary to study overnight.*
3. **Promote gender equality and empower women:** *Lack of access to electricity contributes to gender inequality because it frees up women from domestic tasks.*
4. **Reduce child mortality:** *Respiratory problems due to air pollution within houses as a result of traditional fuels and stoves cause diseases.*
5. **Improve maternal health:** *The pollution within the house, lack of electricity for health centres, lighting for night births and the day-to-day heavy physical load of recollection contribute to bad maternal health.*
6. **Combat HIV/AIDS, malaria and other diseases:** *Electricity for communication through radio and TV may help disseminate useful information on public health.*
7. **Ensure environmental sustainability:** *Conventional energy production, distribution and consumption have negative effects on the local, regional and global environment.*
8. **Develop a global partnership for development:** *The Johannesburg World Summit on Sustainable Development called for partnerships between public entities, development agencies, civil society and the private sector. This involves the promotion of environmentally sustainable and reliable energy services at reasonable prices.*

*Cadre 1: Rôle de l'électrification dans l'accomplissement des objectifs du millénaire
Source : Pablo del Río, 2006*

La littérature fait donc état de nombreux avantages liés à l'énergie. Si ces affirmations sont exactes, elle devraient se traduire par des indicateurs socio-économiques plus favorables pour les régions dont la consommation énergétique est accrue. Les sections suivantes visent à vérifier cette hypothèse en évaluant la corrélation entre accès à l'énergie et indicateurs sociaux, économiques et environnementaux.

3.3. Énergie et indicateurs sociaux

De nombreuses études ont porté sur la corrélation entre la consommation énergétique d'un pays avec une série d'indicateurs sociaux comme la mortalité infantile ou le taux de fécondité. (voir par exemple Jones et Al, 1996 ; Kanagawa et al, 2008). Jones et al (1996) montrent ainsi une bonne corrélation entre quatre indicateurs (PNB, taux d'alphabétisation, mortalité infantile, fécondité) et la consommation d'énergie/capita pour 151 pays (Figure 5). On constate qu'une consommation d'énergie supérieure va de pair avec un taux d'alphabétisation supérieur, et une mortalité et une fécondité inférieures.

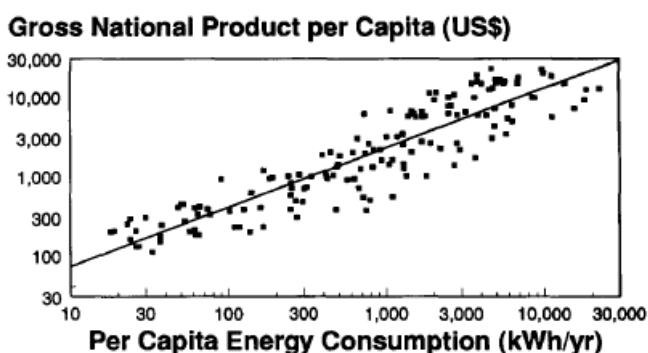


Fig. 1. Energy and economic data for 151 countries.

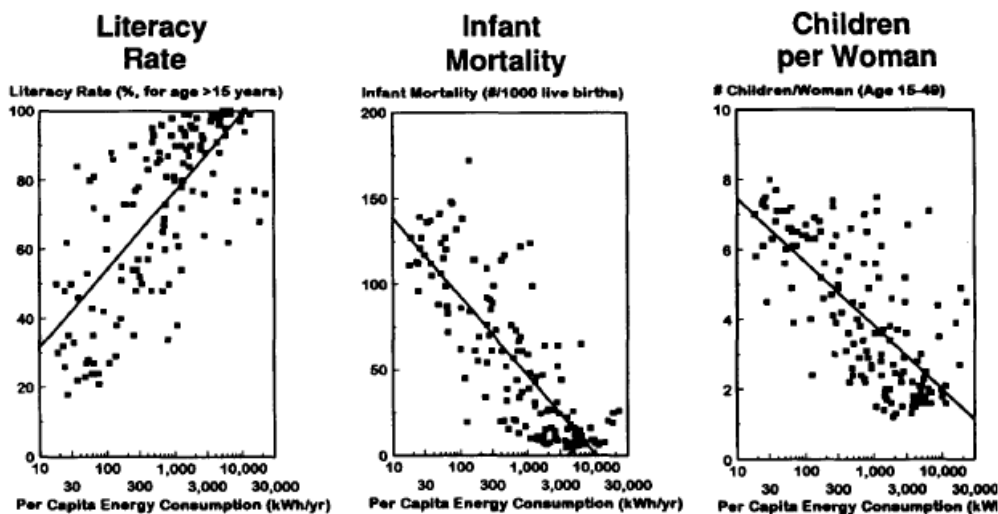


Figure 5: Corrélation entre la consommation énergétiques et certains indicateurs de développement
Source : Jones et Al, 1996

Les indicateurs évalués plus haut sont des indicateurs moyens pour des pays donnés. Ils ne peuvent pas rendre compte des écarts et des inégalités à l'intérieur de la zone considérée. Or, plusieurs études montrent que l'électrification rurale profite très peu aux ménages les plus pauvres (voir par exemple World Bank, 2008, Barnes, 2007).

On constate en effet, en comparant les courbes de Lorenz de la consommation électrique avec le coefficient de Gini des pays en question (cfr. Figure 6), que l'électrification profite majoritairement aux plus riches. Selon la Banque Mondiale (2002), aux Philippines, les 40% les plus pauvres comptent pour 25% des connexions et pour 15% seulement de la consommation totale.

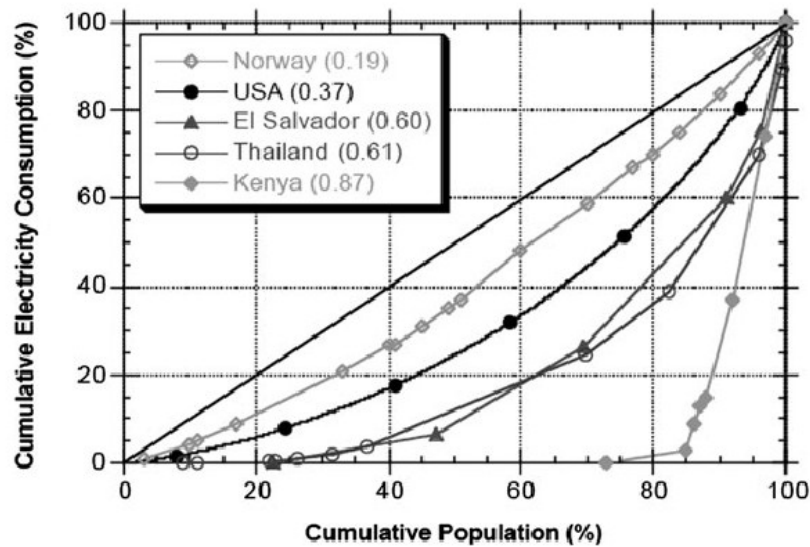


Figure 6: Courbe de Lorenz de la consommation électrique dans différents pays et nombre de Gini pour ces pays (source: Kammen, 2008).

On ne peut donc pas affirmer que l'accès à l'énergie soit un facteur de réduction de l'extrême pauvreté ni des inégalités. Cela implique que les montants considérables investis dans l'électrification rurale pourraient être mieux employés si l'objectif est de réduire l'extrême pauvreté.

Néanmoins, il est important de prendre en compte les retombées indirectes de l'électrification, même sur les ménages les plus pauvres, telles que la création d'emplois. Il faut aussi noter que les pauvres ne sont pas totalement exclus, mais adoptent l'électricité à une vitesse bien moindre que les ménages les plus riches. Des études menées aux Philippines ont par exemple montré que, même si initialement les ménages les plus pauvres ne peuvent pas accéder à l'électricité, la majorité de ceux-ci finissent par se connecter après quelques années. Au Costa Rica, qui a terminé son programme d'électrification, presque tous les ménages à portée des lignes basse tension sont aujourd'hui connectés (Barnes, 2007).

Une étude du "Centre pour le développement humain" à Dhaka propose une mesure des impacts sociaux et économiques de l'électrification rurale au Bangladesh depuis 1978 (Barkat et al., 2002). L'étude montre que l'électrification est fortement associée à des familles aux revenus plus élevés (65% supérieurs par rapport aux villages non électrifiés). 16% des revenus annuels des familles électrifiées sont attribués aux bénéfices de l'électricité. Le taux d'alphabétisation est de 71% pour les villages électrifiés, alors qu'il n'est que de 56% pour les autres. La santé a également été améliorée: la mortalité infantile est de 43 % dans les ménages électrifiés alors qu'elle est de 58% dans les ménages non électrifiés; le taux d'immunisation est de 61% alors qu'il n'est que 37% dans les villages non-électrifiés, etc. L'électricité a aussi contribué à la participation des femmes ("empowerment").

Des résultats similaires ont été obtenus par la Banque Mondiale dans le cas des Philippines (World Bank, 2002) ou par Camblong et al. (2009) dans le cas du Sénégal, qui citent une série d'impacts positifs, tels que l'accès élargi à plus faible coût à l'éclairage, à la radio et la télévision, un taux d'éducation accru, un temps réservé aux tâches ménagères réduit, une diminution de l'exode rural, l'amélioration de la sécurité, etc. L'étude de la Banque Mondiale souligne aussi les bénéfices perçus par la population, qui est prête à dépenser jusqu'à 10% des revenus du ménage pour l'accès à l'électricité

Chakrabarti (2002) obtient des résultats similaires pour le cas particulier de l'électrification d'une

île dans la région du Bengale en Inde: 4 ans après l'électrification, des améliorations notables (mais non chiffrées dans la publication) sont constatées sur le niveau d'éducation, sur les échanges commerciaux, sur la santé, sur la productivité et sur la participation des femmes.

3.4. Énergie et environnement

Énergie et environnement sont deux thèmes étroitement liés. Bien que la majorité des thèses défendues dans les publications examinées soutiennent une relation de proportionnalité entre consommation énergétique et impact environnemental, il existe une série de théories qui prédisent une diminution de l'impact environnemental lorsqu'un certain stade de développement énergétique est atteint. On peut citer:

- La « courbe de Kuznets de l'environnement », selon laquelle la croissance économique détériore dans un premier temps les conditions environnementales d'un pays, puis les améliore dans un second temps en même temps que l'amélioration des conditions de vie (Harbaugh et al., 2000).
- Murota et al. distinguent 4 étapes de développement industriel et prédisent une augmentation de l'efficacité énergétique, ainsi que des réglementations plus strictes pour les pays ayant atteint l'âge postindustriel, ce qui réduirait la pollution. (Cité par Zomers, 2001)
- Van der Wal distingue deux causes de dégradation environnementale: la pauvreté et la richesse (cité par Zomers, 2001)

Dans le présent travail, nous nous limiterons à l'analyse de trois impacts environnementaux de la consommation énergétique. Ces impacts sont ceux qui sont le plus généralement cités lorsque l'on parle d'énergie rurale.

3.4.1. Réchauffement climatique

Dans son premier rapport publié en 2007, le GIEC déclarait : *“Most of the observed increase in global average temperatures since the mid-20th century is very likely due to the observed increase in anthropogenic greenhouse gas concentrations.”* Cette affirmation se base sur l'étude et la compilation d'une grande quantité de travaux scientifiques réalisés par les climatologues du monde entier ces dernières années. L'affirmation du GIEC a mis fin au vieux débat opposant les sceptiques aux groupements écologistes. La plupart des dirigeants reconnaissent aujourd'hui le lien entre émissions anthropogènes et réchauffement climatique.

Selon les différents scénarios établis par le GIEC, la température moyenne à la surface de la terre devrait augmenter de 2 à 4°C d'ici la fin du siècle. Toujours selon ces projections, ce réchauffement aura des conséquences dramatiques sur les conditions de vie dans certaines parties de globe. On peut citer :

- L'augmentation du niveau des océans, entraînant des déplacements massifs de populations côtières
- Une augmentation de la fréquence des sécheresses et une désertification accrue
- Une augmentation de la fréquence des catastrophes naturelles
- La diminution de la biodiversité
- Des famines plus fréquentes

La nécessité de diminuer les émissions globales de gaz à effet de serre¹ ne peut donc plus être contestée. Le GIEC recommande ainsi une diminution drastique de nos émissions dans ses trois rapports successifs. Cette diminution permettrait de limiter le réchauffement à une valeur de 1.8 °C au lieu de 4°C dans le pire des cas.

La Figure 7 montre que le secteur de l'énergie est effectivement responsable de la majorité des émissions.

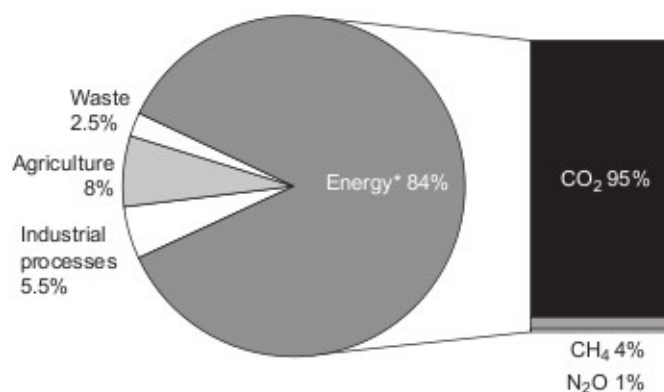


Figure 7: Emissions de gaz à effet des serre par secteur & répartition des émissions par type de gaz pour le secteur énergétique

Source : Quadrelli, 2007

Aujourd'hui, la majorité des émissions de gaz à effet de serre sont imputables aux pays industrialisés : les 10 premiers pays émetteurs produisent 2/3 des émissions totales (cfr. Figure 8)².

Il est à craindre que le développement de pays sous-industrialisés ne soit accompagné d'une forte augmentation des gaz à effet de serre. En effet, par le passé, le développement industriel a toujours été de pair avec une augmentation des besoins énergétiques. Ce fut par exemple le cas pour

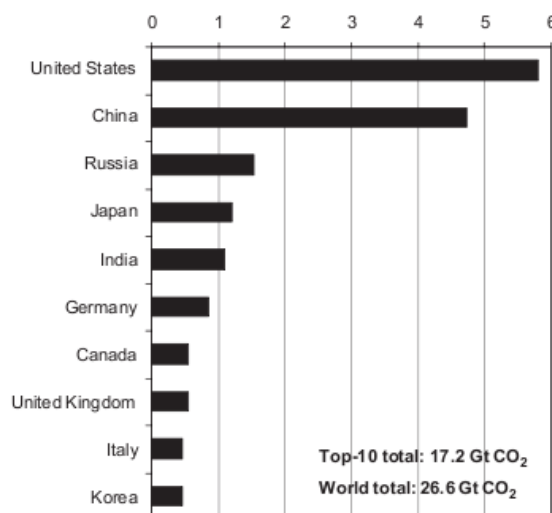


Figure 8: Emissions mondiales de CO₂ par pays

Source : Quadrelli, 2007

1 Les principaux gaz à effet de serre anthropogènes sont le dioxyde de carbone (CO₂), le méthane, le N₂O, et les composés fluorés HFC et PFC.

2 NB : Il semble aujourd'hui que la Chine ait dépassé les USA au niveau des émissions, et ce depuis 2006

l'Europe au cours des 19 et 20^{ème} siècles, et l'on a constaté plus récemment une tendance similaire pour la Chine, dont la croissance économique a explosé au cours des 20 dernières années (Auffhammer, 2006).

La Figure 9 compare l'augmentation des émissions entre 2003 et 2004. Les pays sont séparés en 2 groupes, définis en annexe du protocole de Kyoto. Les pays de l'annexe 1 sont les pays industrialisés, tandis que ceux de l'annexe 2 sont les pays en développement signataires du protocole. On constate que la croissance actuelle des émissions de CO₂ est déjà plus importante dans les pays en développement que dans les pays industrialisés.

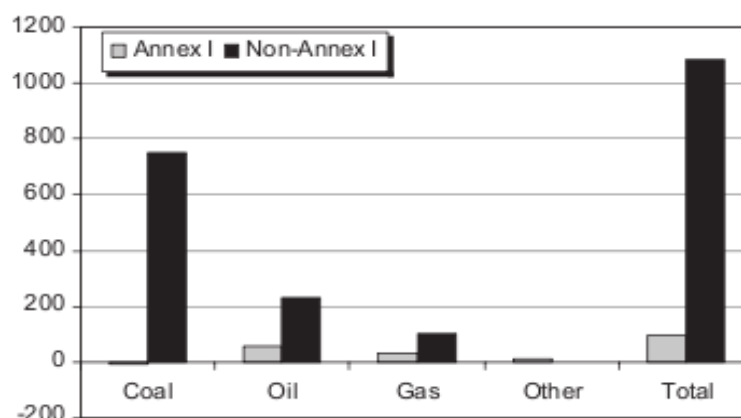


Figure 9: Croissance des émissions de CO₂ en MTeq CO₂ entre 2003 et 2004
Source : Quadrelli, 2007

Le développement semble donc effectivement lié à une importante augmentation des émissions de gaz à effet de serre. Le défi consistera alors assurer le développement des pays les moins industrialisés tout en limitant son impact environnemental. Cela ne pourra s'opérer que par un important transfert technologique des pays industrialisés vers les pays en développement dans les domaines relatifs à la réduction des émissions et à l'efficacité énergétique.

3.4.2. Déforestation

La biomasse est généralement considérée comme une ressource renouvelable. Cela n'est le cas que lorsqu'elle est gérée de manière à assurer la rotation et la repousse après la coupe.

Dans beaucoup de pays en développement, la biomasse constitue la source d'énergie la moins onéreuse et est abondamment surexploitée. Cela conduit à de graves déforestations et à des effets collatéraux néfastes tels que l'érosion des sols, le ruissellement des eaux de pluie, etc.

La Figure 10 est une photo de la frontière entre Haïti et la République Dominicaine. On constate que les forêts d'Haïti ont entièrement disparu, tandis que celle de République Dominicaine sont toujours présentes. Cette photo montre clairement que les problèmes de déforestations sont liés au niveau du développement du pays, à la législation en vigueur et à la capacité de l'état à faire respecter cette législation.

Si la déforestation est sévère, tous les cycles naturels à travers lesquels les nutriments sont retournés au sol cessent de fonctionner: d'abord à travers la perte des arbres eux-mêmes, puis à travers la perte des graminées, résidus de moissons et bouses, qui sont utilisés comme combustible



Figure 10: Frontière entre Haïti et la République Dominicaine

Source : Charles E. 1987

à la place du bois. Une autre conséquence est que le sol retient moins d'humidité, ce qui résulte dans des rendements agricoles plus faibles (World Bank, 1996, p22).

3.4.3. Qualité de l'air

La consommation de fuels traditionnels (bois, fumier) génère des émissions de polluants relativement importantes. En effet, les brûleurs utilisés sont généralement très peu efficaces, et ces combustibles présentent un contenu énergétique relativement limité (10 fois inférieur pour le bois par rapport au LPG, comme indiqué à la Figure 11). Il faut donc en brûler une grande quantité pour obtenir une quantité de chaleur acceptable.

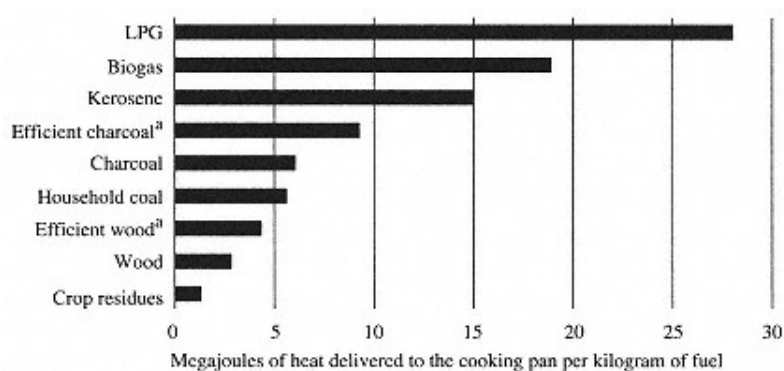


Figure 11: Pouvoir calorifique de différents types de combustible.

(Source: World Bank, 1996)

La combustion inefficace de la biomasse conduit à la formation de fines particules, de monoxyde de carbone, et de NOx. Ces gaz sont la cause de maladies respiratoires, comme l'asthme, les infections respiratoires, etc. Ils augmentent le risque de cécité et de maladies cardiaques.

Il faut ajouter à cela que ces foyers sont souvent utilisés à l'intérieur des habitations, et donc avec un renouvellement d'air limité, ce qui accentue la concentration de polluants. (World Bank, 1996).

3.5. Énergie et développement économique.

3.5.1. Approche Macro-économique

Comme nous l'avons vu à la Figure 5, il existe une bonne corrélation entre consommation énergétique et produit national brut. Il est néanmoins nécessaire de garder à l'esprit le traditionnel problème de causalité entre deux variables corrélées: peut-on affirmer que l'accès à l'énergie permet le développement? Ou, au contraire, le développement favorise-t-il la consommation d'énergie? Ou bien peut-être existe-t-il une troisième variable induisant les deux effets? La réponse se situe probablement à l'intersection de ces trois propositions. On peut en tout cas affirmer que le développement est concomitant à la consommation énergétique.

Pablo del Rio (2007) montre qu'un accès accru à l'énergie, et plus particulièrement aux énergies renouvelables, peut avoir un impact socio-économique positif sur la région dans laquelle il est développé. Il énumère les avantages potentiels apportés par l'énergie, dont notamment :

- La création d'emplois
- La génération de revenus pour les propriétaires terriens
- La réduction de l'exode rural
- Les connaissances acquises par les populations locales grâce aux transferts de technologie
- L'attrait touristique engendré par le projet (« projet de démonstration »)
- L'utilisation de ressources locales et la création d'activité

Il est toutefois nécessaire de nuancer l'affirmation selon laquelle l'accès à l'énergie induit inévitablement un certain développement des activités productives et de la qualité de vie dans une région donnée. Jacobson (2007) étudie par exemple les impacts sociaux de l'électrification rurale par panneau solaires photovoltaïques au Kenya. Ses conclusions sont (1) que des panneaux solaires bénéficient en priorité à la classe moyenne, (2) qu'ils jouent un rôle modeste dans la création d'activités productives et d'activités liées à l'éducation, (3) qu'ils participent principalement à l'expansion de l'utilisation du téléviseur et de l'éclairage artificiel.

Le panneau solaire photovoltaïque constitue donc ici un bien de consommation destiné à la classe moyenne avant d'être un investissement productif. Jacobson note cependant que le téléviseur peut participer à une demande accrue pour des bien de consommation et donc à un accroissement de l'activité, et que l'éclairage artificiel peut favoriser l'apprentissage scolaire pour les enfants de la classe moyenne et augmenter ainsi le niveau d'éducation. Le caractère de « contribution au développement » est dans ce cas conditionné par l'utilisation que la population cible fait du système énergétique. La problématique devient donc socioculturelle et non plus purement économique.

Afin de répondre à la question « l'énergie constitue-t-elle un stimulus à la croissance économique ? », une simple corrélation établie sur une base synchronique entre la consommation et le PNB ne suffit pas: les relations de causalité doivent également être considérées. Le test de causalité de Granger a été développé dans cet objectif : Il permet d'évaluer si une variable y donnée dépend des valeurs passées d'une autre variable x . La causalité entre x et y est effective si les valeurs passées de x et y permettent de prédire la valeur actuelle de y avec une bonne précision.

Chontanawat et al (2008) ont effectué le test de causalité de Granger sur les données statistiques de 100 pays différents. Ils constatent que la relation de causalité entre énergie et PNB est effective pour 70% des pays de l'OCDE, mais qu'elle ne l'est que pour 46% des pays non-OCDE. L'idée selon laquelle un apport d'énergie aux pays en développement induit mécaniquement son

développement économique n'est donc pas vérifiée.

3.6. Le cas particulier de l'électrification rurale

La première utilisation de l'électricité en région rurale est l'éclairage. La télévision arrive en second lieu. A elles deux, ces applications représentent plus de 80% de la consommation d'électricité rurale dans les pays en développement selon la Banque Mondiale (World Bank, 2008). Nieuwenhout et al. (2001), après analyse de 84 projets d'électrification par panneaux photovoltaïques dans le monde, arrivent à un nombre sensiblement plus élevé de 93%.

On peut aisément comprendre que l'accès à l'électricité et à l'éclairage permette d'étendre la plage horaire d'activité du ménage, et peut aussi favoriser l'apprentissage et l'étude. Avec l'électricité, les femmes passent moins de temps à la récolte de combustible traditionnel et à la préparation des repas, même si le combustible n'est pas modifié. La raison est qu'avec l'éclairage, les femmes peuvent préparer le repas principal juste avant qu'il soit mangé plutôt que de le préparer pendant la journée et puis de le réchauffer en soirée (Barnes, 2007; Cabraal, 2005).

Plusieurs études montrent en outre que les panneaux PV ne sont pas forcément adoptés pour des raisons économiques (pour économiser le coût du carburant), mais plutôt pour améliorer l'accès aux services que sont la TV (le football est souvent mentionné) et l'éclairage. Il apparaît même que certains ménages continuent à utiliser le kérosène pour l'éclairage afin d'économiser l'électricité pour la télévision (Martinot, 2002).

L'expérience a montré que les politiques de développement rural ont été des outils efficaces pour diminuer l'exode rural. L'électrification rurale, qui permet d'augmenter le niveau de vie des habitants, constitue en ce sens un outil de premier choix.

3.6.1. Santé

Nombre d'indicateurs sociaux et économiques dépendent directement de la santé des habitants d'une région donnée. Ainsi, la pandémie du SIDA, outre le caractère dramatique de la maladie et des pertes subies par les familles, possède un coût économique et social non négligeable. On peut citer en vrac la perte de membres actifs et de revenus dans les familles, des services de santé surchargés, des écoles désertées par manque de moyen ou pour compenser un salaire perdu dans le ménage, la diminution de la productivité agricole, etc. (Beresford, 2001).

L'accès à l'électricité semble être un outil efficace en vue d'améliorer les services de santé. Il permet d'approvisionner les villages en eau potable, ou encore d'améliorer les moyen de communication permettant de lutter plus efficacement contre le SIDA.

A l'heure actuelle, seule une minorité de cliniques rurales a accès à l'électricité. Pourtant, ce dernier permet d'améliorer les conditions de traitement des patients, dont notamment les conditions sanitaires, la stérilisation des instruments ou la conservation des vaccins à l'aide de réfrigérateurs. (Cabraal, 2005). Le confort lié à l'électricité permet également d'attirer des docteurs plus qualifiés et plus expérimentés.

On note aussi des effets indirects de l'électrification, liés par exemple à un niveau d'éducation accru: plusieurs études montrent ainsi un lien étroit entre le niveau d'alphabétisation des femmes et la mortalité infantile, la mortalité maternelle, et la prévalence du SIDA, une femme éduquée étant plus à même de prendre soin de son enfant (Cabraal, 2005).

Outre la disponibilité de l'énergie, il s'agit également de s'intéresser au type de combustible employé, et à l'efficacité du dispositif de transformation énergétique. Comme indiqué en section 3.1., les régions rurales des pays en développement ont principalement recours à la biomasse comme combustible pour la cuisine et pour le chauffage. Cette utilisation du bois et la dégradation de la qualité de l'air qui en découle posent de graves problèmes de santé rurale (cfr Cadre 2, ou United Nations, 2005; Kanagawa et al, 2007). La Figure 12 montre par exemple que le nombre de morts dus à une mauvaise combustion de la biomasse est supérieur au nombre de morts victimes de la Malaria.

The use of biofuels also has an adverse effect on the health of women and children, especially children, though the provision of improved woodstoves along with household education and extension programs can help remedy this. A study of 500 children under five years of age in The Gambia found that girls who were carried on their mothers' backs as they cooked in smoky huts had a risk of acute respiratory illness six times that of other children. Studies in Papua New Guinea and India show that nonsmoking women who have cooked on biomass stoves for many years exhibit a higher prevalence of chronic lung disease than those who have had lower levels of exposure to cooking smoke.

Cadre 2: Source: World Bank, (1996)

Le rôle de l'électricité pour ce problème particulier semble limité. On peut en effet difficilement imaginer un remplacement des combustibles traditionnels par des résistances électriques, celles-ci nécessitant des puissances importantes que les systèmes locaux ne peuvent généralement pas fournir. En revanche, les lampes au kérosène et les bougies, qui génèrent le même type de polluants que la combustion de la biomasse, peuvent être efficacement remplacées par des ampoules électriques, plus efficaces, et générant une lumière de meilleure qualité.

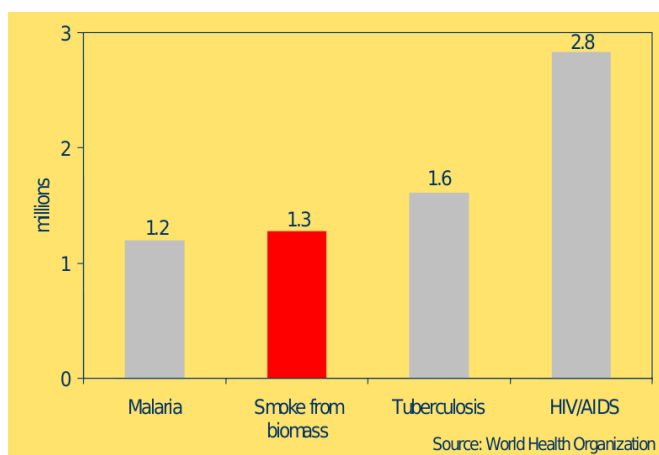


Figure 12: Nombre de morts dus à la combustion de la biomasse dans le monde Source: IEA, 2006

En conclusion, l'électricité rurale peut avoir un impact bénéfique sur la santé via les moyens de communication, les centres de santé ruraux, ou l'éclairage. En revanche le problème majeur de santé publique que sont les émissions toxiques issues de la combustion de la biomasse ne peut être résolu par un accès à l'électricité. Des sources d'énergie plus propres doivent être utilisées, comme les gaz naturels, couplé à des brûleurs à haut rendement.

3.6.2. Éducation

L'accès à l'électricité a un impact positif sur le temps passé à l'école et sur le temps passé à étudier, l'éclairage moderne permettant de travailler plus tard le soir. Il arrive en outre

	Strongly agree	Agree	Neutral/no opinion	Disagree	Strongly disagree
Philippines: In my house it is easy to read in the evening					
No electricity	11%	30%	20%	36%	3%
Electricity	31%	54%	11%	3%	1%
Vietnam: Having electricity is important for children's education					
All households	55%	40.5%	3.5%	1%	0%

Table 1: *Electricité et éducation aux Philippines et au Vietnam (source: Cabraal, 2005).*

fréquemment que les enfants ne puissent pas se rendre à l'école car ils participent aux tâches ménagères. La collecte du bois peut ainsi consommer plusieurs heures sur la journée (cfr. Table 2). La Table 1 montre que la perception de l'électricité par la population des pays en développement va dans ce sens: une électrification accrue permet de favoriser la lecture en soirée ainsi que l'éducation des enfants.

On constate également que chaque année investie dans l'éducation d'un enfant est beaucoup plus profitable lorsque l'accès à l'électricité est concomitant. En d'autres mots, fournir de l'électricité seule, ou de l'éducation seule ne possèdent qu'un impact limité sur les revenus des individus, alors que le binôme électricité/éducation semble être très efficace pour l'augmentation du niveau de vie du ménage (Cabraal, 2005).

Plusieurs études menées aux Philippines et au Vietnam ont montré que les enfants provenant de ménages électrifiés gagnent environ deux ans d'éducation par rapport aux enfants provenant de familles non électrifiées (Cabraal, 2005).

On constate donc une corrélation importante entre accès à l'électricité et le niveau d'éducation. Néanmoins, tout comme pour la corrélation entre électricité et PIB, le problème de la causalité n'est pas entièrement résolu: il est en effet très difficile de déterminer avec certitude lequel des deux indicateurs est la cause du second.

3.6.3. Gender

Le problème de l'égalité homme/femme est fortement lié au problème de la pauvreté, 70% des pauvres des communautés rurales des pays en développement étant des femmes (Cabraal, 2005). De plus, les pauvres ne le deviennent pas forcément de la même manière selon qu'ils soient de sexe masculin ou féminin et ils ne sont donc pas affectés de la même manière par les programmes d'accès à l'énergie.

La littérature concernant les problèmes d'égalité homme-femme distingue généralement deux rôles économiques principaux: les tâches productives et les tâches reproductives. Les premières font référence à toutes les activités qui rapportent de l'argent au ménage, tandis que les secondes font référence aux activités du ménage elles-mêmes, telles que la cuisine ou l'éducation des enfants. Ces deux rôles économiques sont distribués de façon très différente selon qu'on soit homme ou femme. Le rôle des femmes dans les activités productives est généralement limité à des postes peu rémunérés requérant un faible niveau d'éducation et avec peu de responsabilités. Par

contre, les femmes sont les principaux acteurs de l'économie reproductive.

L'économie reproductive est celle qui est le plus directement affectée par l'accès à l'électricité, ce dernier réduisant fortement le temps alloué aux tâches ménagères. Les femmes sont donc souvent les premières concernées par l'accès à l'électricité, ce qui souligne l'importance de leur participation aux projets d'électrification.

When woodfuels are scarce, the time people spend collecting fuels reduces the time they can devote to productive agricultural activities. A recent survey in the hill areas of Nepal, for example, found that even in regions with relatively good supplies of fuelwood, women still need to spend more than an hour a day collecting biomass, and the time they devoted to agriculture was correspondingly less compared to people not dependent on these fuels. In the more deforested areas where fuels are scarcer, the time and effort women expended were even greater, with about 2.5 hours per day being spent collecting fuelwood, fodder, and grass. Surveys in Africa dating back to the 1970s have similar findings.

Cadre 3: Source: World Bank, 1996

La collecte du bois est un bon exemple de tâche reproductive généralement laissée aux femmes et aux enfants (cfr Cadre 3). En Inde, deux à sept heures sont consacrées quotidiennement à la récolte du combustible pour la cuisine, le bois étant transporté sur une distance variant de 4 à 8 km. Dans les zones montagneuses du Népal ce temps est supérieur à une heure par jour, bien que la biomasse y soit très abondante (Cabraal, 2005). Dans les régions rurales d'Afrique Sub-Saharienne, beaucoup de femmes portent 20 kg de bois sur une distance moyenne de 5 km chaque jour. En Tanzanie, la distance moyenne de récolte du bois varie 1.6 à 10.4 km (cfr Figure 13).

Country	Average hours per day	Explanation of work
Southern India (6 villages)	1.7	Women contribute 0.7 hours; children contribute 0.5
Guajarat, India	3.0	In family of 5, 1 member often spends all his/her time on it
Nepal	1-5	Often 1 adult and 1-2 children collect fuelwood
Tanzania	8.0	Traditional women's work
Senegal	4-5	Often is carried about 45 km
Niger	4-6	Women sometimes walk 25 km
Kenya	3.5	Women do 75% of fuel gathering
Ghana	3.5-4	One full day's search provides wood for 3 days
Peru	2.5	Women gather and cut wood

Table 2: Temps passé à la collecte du bois. (Source: Cabraal, 2005)

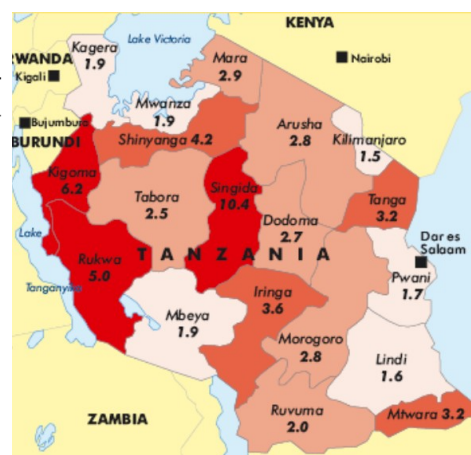


Figure 13: Distance moyenne parcourue quotidiennement pour récolter du bois en Tanzanie (km) (Source : IEA, 2006)

Cette récolte réduit évidemment le temps consacré à d'autres activités, comme l'agriculture ou l'éducation. De plus, l'effort effectué pour le transport du bois consomme une part importante des calories apportées par l'unique repas cuisiné à l'aide de ce bois. En outre, les femmes passant plus de temps à l'intérieur, elles sont les premières à souffrir des effets sur la santé de chaudières non efficaces ou de combustibles inappropriés.

L'accès à l'électricité permet donc aux femmes de passer moins de temps aux tâches ménagères (Barnes, 2007). Une étude menée en Chine pour la Banque Mondiale et résumée à la Table 3 montre effectivement que le temps consacré aux tâches ménagères est nettement plus important pour les femmes que pour les hommes. L'accès à l'électricité avantage donc proportionnellement plus les femmes que les hommes, les activités ménagères (cuisine, récolte du bois et de l'eau, etc.) étant proportionnellement plus allégées par l'accès à l'électricité.

Hubei	Xiaozhu		Duiwotai		Housanxi	
	Men	Women	Men	Women	Men	Women
Cooking	2.7	18.6	1.1	20.2	0.6	23.9
Fuel gathering	8.0	5.6	5.4	9.2	6.4	5.2
Fetchng water	5.7	2.0	3.7	2.4	4.8	1.6
Washing	1.1	3.9	0.4	2.2	0.4	3.5
Grinding/Milling	4.9	3.7	0.7	1.6	1.2	0.3
Prepare pig food	2.3	8.6	0.6	7.3	2.5	9.7
Prepare cattle food	0.3	0.5	1.3	1.8	0.3	0.1
Grazing cattle	5.0	0.5	1.9	4.8	6.8	0.4
Collect compost straw	0.0	0.0	0.0	0.0	0.9	3.0
Other	1.0	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0
Total	30.9	44.2	15.2	49.5	23.7	47.7
Gansu	Gaozui		Zhaoshan		Xiapai	
	Men	Women	Men	Women	Men	Women
Cooking	1.1	11.9	2.5	12.6	2.7	18.8
Gathering fuel	1.4	9.6	2.8	4.6	1.2	2.7
Fetchng water	2.4	2.2	1.1	0.6	1.0	1.7
Washing clothes	0.6	2.1	0.4	1.8	0.4	3.6
Feed livestock	3.5	2.8	6.7	2.2	4.2	2.3
Grazing sheep	0.5	1.6	5.3	2.4	3.3	1.2
Feeding pigs/chickens	0.0	2.1	0.3	3.7	0.1	3.1
Clean house/yard	0.0	2.5	0.4	3.6	0.4	4.3
Gathering dung	0.0	0.8	0.4	1.6	0.1	0.1
Total	9.5	35.6	19.9	33.1	13.4	37.8

Table 3: Temps passé aux activités non génératrices de revenus dans différentes communautés des zones rurales en Chine, en heures par semaine.

(source: Institute of Development Studies at the University of Sussex, 2003)

Ces propos doivent cependant être nuancés par les résultats d'autres études, qui montrent que même dans des zones avec accès à l'électricité, à la télévision ou à la radio, les fours modernes permettant de réduire le temps alloué à la préparation ne connaissent pas de succès. Cela s'explique entre autres par le rôle d'allocation du budget réservé aux hommes, qui tendent à privilégier leurs propres besoins à ceux des femmes (Cabraal, 2005). Par conséquent, l'impact sur la pauvreté de l'accès à l'énergie est fortement conditionné par l'utilisation qui est faite de cette énergie et, par extension, par la personne qui décide de l'allocation de l'énergie. Les femmes ont nettement moins de chance de bénéficier de l'accès à l'énergie, sauf si elles sont incluses dans les choix relatifs à l'utilisation de cette énergie (The Institute of Development Studies at the University of Sussex, 2003).

Afin d'évaluer l'impact de l'accès à l'électricité sur l'égalité homme-femme, il est nécessaire de définir des indicateurs permettant d'appréhender cette problématique. Dans cette optique, une étude menée au Bangladesh montre, au travers d'un "score moyen d'empowerment" basé sur la mobilité des femmes, sur la participation aux décisions du ménage et sur la connaissance des

enjeux de l'égalité homme/femme, que l'accès à l'électricité mène à un meilleur score d'égalité homme/femme (Figure 14).

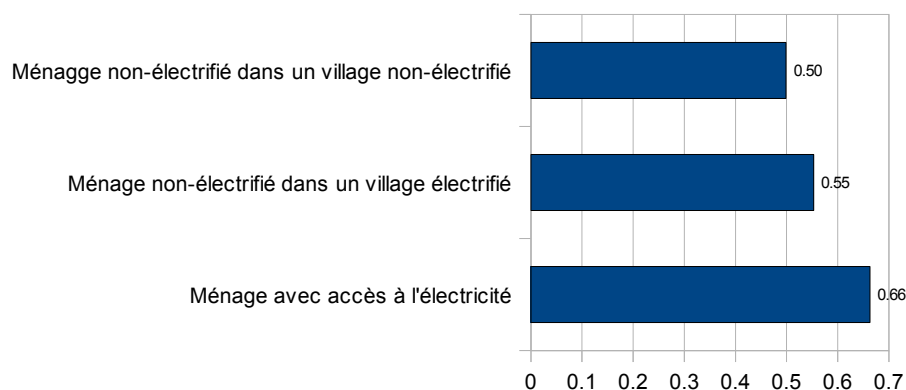


Figure 14: Score moyen d' "empowerment" des femmes en fonction de l'état d'électrification. (Source des données: Cabraal, 2005).

3.6.4. Activités productives

L'accès à l'énergie et plus particulièrement à l'électricité peut être un stimulant pour l'activité économique locale. Si l'on prend le cas de l'agriculture par exemple, cet effet peut être expliqué par divers mécanismes:

- La biomasse et le fumier étant utilisés comme engrais, leur utilisation comme combustible réduit indirectement la fertilité des sols (IEA, 2006).
- Les revenus et les rendements agricoles peuvent être considérablement améliorés grâce à l'accès à l'électricité: pompes électriques, broyeurs, sécheurs et autres engins agricoles permettent de substituer le travail humain ou animal à la machine et augmentent la productivité à l'hectare (Cabraal, 2005).
- L'accès aux moyens de communications permet également aux agriculteurs de se tenir au courant des prix du marché, ce qui leur permet de prendre des décisions et des orientations plus avisées (Cabraal, 2005).

Pendant, les évidences empiriques ne permettent pas d'établir une relation de cause à effet entre accès à l'énergie et développement d'activité locale. Une étude de la Banque Mondiale sur l'impact d'une série de projets d'électrification PV dans quatre pays (Sri Lanka, Indonésie, République Dominicaine et Philippines) a montré que si cette électrification avait bien eu un impact positif sur le niveau de vie ou sur l'égalité homme-femme, il n'y avait pas de preuve qu'elle ait eu un effet significatif sur les activités génératrices de revenus. Une étude similaire, mais portant cette fois sur des systèmes d'électrification centralisée en Asie a montré que l'électricité est une condition nécessaire, mais pas suffisante pour le développement d'activités (Ciscar, 1999).

L'accès à l'énergie n'est pas suffisant pour garantir l'émergence de petites entreprises et le développement de l'activité économique (Martinot, 2002; Barnes, 2007): Il est également nécessaire que l'accès à un marché rural ainsi qu'au crédit soient garantis. On a en effet constaté que dans beaucoup de pays, la croissance du secteur industriel une fois l'accès à l'électricité assuré est lente, voire nulle.

Ying (2006), au travers d'une étude sur les régions rurales de Chine, souligne notamment le manque de moyens de transport, qui grève fortement le développement économique de ces régions, même si celles-ci sont électrifiées. L'impact local de l'accès à l'énergie dépend donc fortement des

politiques gouvernementales et des programmes de développement connexes. Le programme d'électrification rurale en Inde, par exemple, s'est aussi concentré sur la fourniture de pompes électriques, ce qui a une un impact très positif sur la productivité agricole de la région et a participé au succès du projet (Barnes, 2007).

Si l'on distingue l'électrification décentralisée de l'extension du réseau, la revue de littérature effectuée par Martinot (2002) permet de conclure à une amélioration de la consommation et du niveau de vie dans le cas de l'extension du réseau, mais cela est beaucoup moins clair en décentralisé: lorsque l'électrification rurale n'a pas été accompagnée d'autres infrastructures économiques et de compétences, le développement économique n'a pas suivi. Kirubi (2000), au contraire, après analyse d'un projet d'électrification rurale à Mpeketoni au Kenya, constate une augmentation de la productivité (de 100 à 200%) et un revenu accru pour les producteurs locaux, ainsi qu'une que des retombées positives pour les petites entreprises.

En conclusion, il semble que l'accès à l'électricité soit un des facteur favorisant la croissance économique locale, mais qu'on ne peut s'attendre à une explosion des petits commerces et de l'industrie suite à un programme d'électrification rurale seul. L'importance des programmes de développement annexes à l'électrification et profitant de celle-ci est à souligner.

3.6.5. Conclusions

Les leçons tirées des différentes expériences et publications citées plus haut nous permettent de dégager les conclusions suivantes:

- La demande pour l'électricité est davantage tirée par le désir d'une qualité de vie accrue plutôt que par des considérations économiques.
- Le niveau d'éducation semble être influencé favorablement par l'accès à l'énergie
- L'électricité peut réduire de manière important le temps consacré aux tâches ménagères, permettant d'améliorer le niveau d'égalité homme-femme. Les femmes étant les premières concernées, leur participation aux projets d'électrification est nécessaire.
- L'électrification rurale est une condition nécessaire mais pas suffisante pour l'émergence d'une activité économique locale.
- Les études d'impact économique de l'électrification rurale sont encore limitées et n'aboutissent pas toutes aux mêmes conclusions.

4. Étude de cas et grille d'analyse

4.1. Facteurs de succès ou d'échecs des projets d'électrification rurale

La Banque Mondiale base ses efforts d'électrification rurale sur 5 principes (World Bank, 1996, p 10):

- Rendre possible le choix du consommateur, afin de diriger les choix vers les solutions les plus économiques, en fonction des préférences des utilisateurs.
- Imposer un prix qui reflète les coûts de production
- Dépasser la barrière des coûts d'investissement
- Encourager la participation locale.
- Favoriser les politiques énergétiques efficaces: le rôle du gouvernement devrait se déplacer de la planification centrale vers le support aux marchés.

Le but de cette section est d'établir une grille de critères, similairement à ce que propose la Banque Mondiale, à partir de l'analyse d'une série d'exemples d'électrification rurale. Ces exemples comprennent des échecs, dont il est nécessaire de comprendre les raisons, ainsi que des projets couronnés de succès, donc il est nécessaire d'extraire les facteurs qui ont mené à ce succès.

La présente analyse se veut transversale: différents types de critères (économiques, techniques, sociaux) sont considérés pertinents et sont donc analysés. Un certain nombre de critères, ceux qui sont liés à l'environnement institutionnel du projet, sont cependant exclus de l'analyse. En effet, ce point a été étudié en profondeur par Barnes (2007) pour huit exemples à succès d'électrification rurale. Il est ressorti de ses travaux que le modèle institutionnel n'est pas l'élément critique permettant d'expliquer les succès et les échecs des différents exemples considérés. Par exemple, dans certains pays, les sociétés coopératives électriques ont eu du succès, alors que dans d'autres, des approches publiques ou privées ont également donné de bons résultats. Pour Barnes, il est préférable de s'attacher à une série de principes directeurs plutôt qu'à des formules institutionnelles rigides, qui fonctionnent généralement de manière insatisfaisante (Barnes, 2007).

4.1.1. Participation des bénéficiaires

Il ressort de nombreuses études que la participation locale aux projets d'électrification rurale est une condition *sine qua non* au succès de ces derniers (Zilles, 2000 ; Martinot, 2002 ; Niewuenhout et al., 2001 ; World Bank, 1996 ;). La population locale comprend en effet mieux que le développeur sa situation particulière ainsi que les problèmes et enjeux relatifs à un projet d'électrification. Le projet de biogazéficication des résidus agricoles à Pura en Inde en est un bon exemple: plusieurs projets successifs visant à fournir du biogaz aux villageois ont échoué. La population locale n'avait effectivement que peu d'usage du combustible mais avait besoin d'eau potable. L'addition d'un générateur électrique au biogaz a permis d'alimenter des pompes et a ainsi apporté un double gain: de l'eau potable et de l'électricité. Il en a résulté une diffusion rapide du système (World Bank, 1996, p 8).

Selon Cernea (1991), de nombreux projets de développement ont échoué, malgré les enquêtes locales, et la recherche de participation des populations cible. Pour lui, cela est dû à la vision des communautés en tant qu'unité d'organisation sociale, alors qu'en fait les intérêts de sous-groupes de la communauté diffèrent fréquemment et nuisent à l'action collective

Toujours selon Cernea, le facteur critique pour le succès d'un projet consiste dans l'identification

d'une *unité d'organisation sociale* à même de mener à bien le programme, et dans la définition des conditions sous lesquelles cette unité (l'acteur social) peut agir. Partant de ses recherches sur les projets de reforestation, il en conclut que les activités relatives au projet devraient comprendre la participation de l'unité d'organisation sociale au processus décisionnel, à la planification ainsi qu'à l'exécution de celles-ci. L'adhésion des participants locaux aux décisions requiert en outre que ceux-ci soient convaincus du bien fondé du projet en question. La population se voit ainsi chargée de la responsabilité et de la gestion du projet (Cernea, 1991).

L'expérience de l'électrification par panneaux PV des communautés de Retiro et Varadouro au Mexique (Zilles, 2000) montre que la création d'une association locale chargée de la mise en place du projet et prenant les décisions en assemblée peut constituer un atout majeur pour le projet. Cette association a même réactivé une certaine solidarité entre les membres de la communauté. Zilles et al. insistent aussi sur l'importance de la prise en compte des références culturelles locales : « *Lorsque des références du passé ont été réintroduites, (...) le jargon technique est devenu plus clair et les difficultés d'organisation de l'association par le consensus ont été surmontées* » (Zilles et al., 2000).

La tentative de former un technicien supérieur par communauté, chargé de la maintenance des systèmes a été un échec car elle interférait avec les liens sociaux préexistants. Pour y remédier, l'ensemble de la communauté a été formée à la technique PV. L'inclusion des femmes dans l'association a également été un facteur de succès, ces dernières étant les premières bénéficiaires des systèmes PV (Zilles et al., 2000).

Un autre facteur clé est celui de l'autonomie. Selon Zomers (2001), l'une des causes les plus importantes de performance médiocre des systèmes d'ER proviennent du manque d'autonomie financière et institutionnelle des bénéficiaires. Les interférences politiques, ainsi que la corruption mènent à une exploitation très peu optimale des installations et doivent être évitées au maximum.

4.1.2. Démonstrateurs et adoption de la technologie

Selon Martinot (2002), entre 1979 et 1991, la plus grande partie de l'aide au développement dans le secteur des énergies renouvelables s'est concentrée sur les projets de démonstration ou sur des projets difficilement répliquables. Une grande partie des fonds était destinée au capital de départ du projet. Une faible part était destinée à la couverture des coûts récurrents tels que la maintenance, et moins de 10% était dépensés à la formation technique est managériale permettant de répliquer la technologie. Dans une revue des projets de soutien aux systèmes PV, l'aide au développement allemande GTZ déclarait « *Il n'y a pas eu un seul projet de dissémination de la technologie... Au contraire, la grande majorité des projets ont été des projets pilotes ou des projets de démonstration... fréquemment caractérisés par la diffusion d'un petit nombre de systèmes...* » (Cité par Martinot, 2002).

Bien qu'elle ait porté ses fruits dans plusieurs endroits du monde, notamment au Mexique avec 42000 systèmes installés en 2006 (Barnes, 2007), plusieurs auteurs se montrent critiques vis-à-vis de cette approche de démonstration/diffusion, qu'ils considèrent simpliste. Ils insistent sur le rôle de l'anthropologie appliquée.

Les travaux de Rogers sur la diffusion d'innovations technologiques sont en ce sens particulièrement intéressants. Il propose un modèle "d'adoption technologique" en 5 étapes (Rogers, 1983 p 36): La connaissance, la persuasion, la décision, l'implémentation et la confirmation. Ce modèle a été adapté par Mallett (2007) pour évaluer le degré d'acceptation des technologies renouvelables dans le cas particuliers des chauffe-eau solaires à Mexico. Il se concentre pour ce faire sur les deux premières étapes du modèle de Rogers: pour lui, la connaissance résulte de la conscience de l'existence ("Awareness") de la technologie "verte". La

persuasion dépend de trois facteurs: l'avantage relatif par rapport aux autres technologies, la simplicité technologique et la possibilité de tester le système (cfr Table 4). Ces critères, bien que définis pour les chauffe-eau solaires, sont entièrement exportables aux technologies d'électrification rurale décentralisée.

Stage		Relevant factor	Mexican case study
Knowledge Persuasion	Relative advantage	Awareness	Little awareness of technology or as an alternative to a gas water heater
		Cost in general	Assessed SWHs for applicable users (i.e. more expensive versions for larger institutions; smaller, cheaper versions for individuals)
		Cost vis-à-vis alternatives	Versions of SWHs exist that are equivalent or cheaper than conventional counterparts (at present or in the long run)
		Culture	Little environmental awareness; culture of more day-to-day—could have a negative impact on social acceptance
	Complexity	Ability to understand technology (how it works and the principles behind it)	Mixed—some understood basic concept (using the sun to heat water through pipes) but not complexities (how does water stay hot at night/ cloudy days?)
	Triability	Whether or not a potential user has the ability to “try out” an innovation—either for a limited time period, or as a complement to conventional system	At present, no option for a trial period for a SWH and only wealthy end users would be able to afford purchasing a SWH as a complement system to gas—could have a negative impact on social acceptance

Table 4: Modèle d'adoption technologique de Rogers appliqué au cas des systèmes solaires thermiques à Mexico (Source: Mallett, 2007)

Mallett (2007) conclut de cet exemple que deux facteurs manquent à l'analyse proposée par Rogers pour expliquer le niveau d'acceptation sociale d'une technologie:

- La participation et la collaboration technologique, qui permettent de familiariser la population avec le système et qui permettent d'éviter un rejet pur et simple en cas de dysfonctionnement
- La communication entre les concepteurs, les producteurs, les distributeurs, et les utilisateurs, qui permet d'assurer un bon contrôle de la chaîne, et la satisfaction finale de l'utilisateur.

Serpa et Zilles (2007) insistent sur le rôle de l'anthropologie appliquée comme outil théorique et pratique pour favoriser le processus de diffusion de la technologie PV. On note en effet que nombre de programmes d'électrification sont imposés aux communautés et entrent en conflit avec leurs valeurs et leurs structures sociales, avec comme conséquence une mauvaise gestion du système installé. Ils insistent sur l'enquête ethnographique préalable, permettant de répondre à des questions telles que celle du système d'éclairage préexistant ou encore du niveau de satisfaction des utilisateurs avec ce système. L'implication de la population dans la mise en place d'un prototype de démonstration est également très importante, afin de le débarrasser de son caractère “magique” qui pourrait causer certaines résistances. L'utilisateur doit faire partie intégrante du montage du système, et doit être formé à sa maintenance.

Akrich et al. (2002) se positionnent également dans un courant critique du modèle simpliste de « démonstration-diffusion » : selon eux, ce modèle repose sur la confiance attribuée au produit qui, après démonstration, est mis sur le marché et se diffuse en vertu de ses qualités intrinsèques par rapport aux autres technologies. Ils prennent comme exemple la diffusion de kits solaires en Afrique, mis au point par des ingénieurs français, qui avaient pris en compte les conditions particulières de l'Afrique pour le design du dispositif. Au lieu du succès escompté, il s'est avéré que la technologie n'a pas été comprise, a été détournée, et finalement abandonnée. Le kit solaire se présentait en fait comme une « machine de guerre », selon les mots de Akrich : le tout était fixé rigidement, et des écrous spéciaux étaient utilisés pour éviter les interventions extérieures. Or, il s'est avéré que le kit présentait une série de limitations, qui n'ont pu être résolues par les

utilisateurs : les câbles étaient trop courts pour une installation sur le toit, les réparations de composants spécifiques étaient impossibles, tout le kit devait être renvoyé à des milliers de kilomètres en cas de panne, il n'existait pas de possibilité de production de courant alternatif, etc. Akrich et al. plaident au contraire pour un modèle qui ne sépare pas irrémédiablement l'innovation de l'environnement socio-économique, un modèle d'«intéressement» qui mette l'accent sur les liens qui unissent l'objet à ceux qui vont l'utiliser. L'adaptabilité et l'appropriabilité de l'objet constituent en ce sens des caractéristiques fondamentales.

4.1.3. Coût et concurrence technologique

La majorité des publications relatives à l'électrification rurale mettent l'accent sur le coût lors du choix de la technologie la plus appropriée. Nombre d'auteurs considèrent même la rentabilité économique comme un prérequis implicite et non discutable (voir par exemple Miller, 2000; Chaurey, 2010). D'autres auteurs, comme Javier Santos Pérez (2003) conseillent d'effectuer une présélection entre technologies candidates en fonction de critères comme l'environnement socio-économique de la région, le potentiel de création d'activité locale, la modularité ou les objectifs de l'électrification avant d'utiliser le critère du coût pour départager les technologies résultant de ce processus de présélection.

Le critère du coût peut aussi être utilisé pour comparer une situation "idéale" électrifiée à la situation actuelle afin de mettre en évidence les bénéfices économiques de l'électrification. Kammen (2008) estime ainsi par exemple le coût de l'éclairage au kérosène comme 3000 fois supérieur à celui de l'éclairage à l'électricité pour la même puissance lumineuse.

Les technologies d'électrification rurale sont variables, notamment en termes de coût de maintenance, de coût de combustible ou encore de coût d'investissement. Afin de les comparer, le coût d'une unité d'électricité doit prendre en compte ces différents coûts sur toute la durée de vie du système. On définit pour cela le coût actualisé de l'électricité (Willis, 2000):

$$C = \frac{I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{M_i + Comb_i}{(1+t)^i}}{\sum_{i=1}^n \frac{E_i}{(1+t)^i}}$$

Avec:

C	Coût actualisé du kWh (USD/kWh)
I_0	Coût d'investissement à l'année 0 (USD)
M_i	Coût de maintenance à l'année i (USD)
$Comb_i$	Coût du carburant pour l'année i (USD)
E_i	Nombre de kWh générés à l'année i (kWh)
t	Taux d'actualisation (%)
n	Durée de vie du système (années)

Le coût du système est évidemment indissociable de la problématique de la demande pour ce système. Il est en ce sens intéressant de mettre ce coût en relation avec les revenus de la population pour évaluer le potentiel d'une technologie donnée (voir par exemple Taele, 2007). A défaut de données sur le revenu, le PNB peut être utilisé. La Table 5 montre ainsi que le coût relatif d'un système PV par rapport au PNB/hab est très variable d'un pays à l'autre. Le critère de coût possède donc une certaine géographicit , qu'il est important de prendre en compte.

Country	GNP per capita	Estimated cost of solar PV system (40–50 W _p) US\$	Estimated cost of solar PV system per GNP per capita (%)
Zambia	330	1200	364
Uganda	310	1037	335
Eritrea	200	600	300
Kenya	350	620	177
Lesotho	570	1000	175
Zimbabwe	610	800	131

Table 5: *Cout des systèmes PV domestiques par rapport au PNB/capita (source: Kammen, 2008).*

Deux technologies principales occupent actuellement le marché de la production d'électricité décentralisée et de petite taille: les générateurs diesel et le photovoltaïque. Miller (2000) propose une comparaison entre ces deux technologies: Pour lui, le générateur diesel est moins coûteux que le panneau photovoltaïque si l'on compare le coût spécifique (le nombre d'euros par watts installés). En revanche, le photovoltaïque est mieux adapté aux pays en développement en termes de puissance (quelques dizaines de watts contre un minimum de 500 W pour le diesel): les besoins d'un ménages sont en effet très faibles (principalement l'éclairage, la radio et la télévision) et peuvent être largement couverts par un module photovoltaïque. Or si l'on prend le cas de l'Inde, le coût mensuel amorti d'un module photovoltaïque de 74 Wc est de 10.1 USD alors que celui d'un générateur diesel est de 30.4 USD (Miller, 2000). Le panneau photovoltaïque constitue donc une solution plus économique. Il est en outre modulaire et donc plus flexible: en cas de besoin additionnel, il est très aisé d'ajouter un module à une installation existante.

L'avantage du PV sur le diesel est confirmé par une étude de terrain au Kenya (Kirubi, 2009): les utilisateurs de PV considéraient leur système comme moins coûteux, nécessitant moins de maintenance, plus facile à allumer et éteindre, moins vulnérable aux fluctuations du coût du pétrole. Le problème de l'approvisionnement et du coût du diesel plaide également en faveur de la technologie photovoltaïque.

Le capital de départ peut constituer un frein sérieux à la diffusion d'une technologie. On constate en effet souvent un accès au crédit très limité pour les populations rurales des pays en développement (Zomers, 2001; Javier Santos Pérez, 2003; World Bank, 1996). Cette difficulté explique par exemple que le générateur diesel soit beaucoup plus répandu que le photovoltaïque en région rurale non électrifiée. Ce dernier possède en effet un coût initial très important et souvent prohibitif, qui conduit les utilisateurs à acquérir des générateurs diesel à un coût négligeable et à payer le carburant au jour le jour.

Notons pour terminer l'importance accordée par une série d'auteurs aux externalités. Selon Freris et Infield (2008), les coûts externes sont « des coûts attribuables à une activité qui ne sont pas supportés par les parties liées à l'activité. ». Ces coûts peuvent être de plusieurs types :

- Les coûts cachés supportés par les gouvernement (p. ex. les dépenses de R&D).
- Les coûts liés aux dommages à la santé ou à l'environnement par les émissions
- Les coûts liés au réchauffement climatique

Pour Zomers (2001), les technologies décentralisées pourraient devenir nettement plus compétitives si les coûts externes étaient pris en compte.

4.1.4. Technologie adaptée

La durabilité du système constitue une problématique particulière dans les régions rurales des pays en développement. Ainsi, dans le cas de la technologie photovoltaïque, un grand nombre de

pannes ou de durées de vies nettement plus courtes que prévu ont été constatées, alors qu'il s'agit d'une technologie mature (Lorenzo, 1997). Ce manque de fiabilité complique grève fortement le niveau de satisfaction des communautés locales pour technologie.

L'expérience des installations photovoltaïques dans les pays en développement montre clairement que la fiabilité est l'un des facteurs clé d'adoption de la technologie. Les pannes fréquentes, même de petits composants bon marché entraînent rapidement le mécontentement des utilisateurs, qui refusent généralement de rembourser les mensualités si le système était vendu à crédit. (Niewuenhout et al., 2001).

On a noté dans les années 70 un important taux de dysfonctionnement de systèmes photovoltaïques individuels, principalement dû à l'immaturité de la technologie. S'il est évident que ces pannes constituent une opportunité pour apprendre et pour améliorer le système, il est important d'effectuer une distinction entre systèmes expérimentaux et diffusion à large échelle, sans quoi l'immaturité technologique pourrait fortement compromettre les efforts futurs de diffusion (Zerriffi, 2006).

Shumacher (1973) plaide pour une réorientation complète des technologies proposées aux pays en développement. Il propose une *“technologie intermédiaire”*, en rupture avec les technologies habituellement proposées par les projets de développement émanant du Nord. Cette technologie serait beaucoup moins chère que la technologie moderne, mais également beaucoup plus efficace que la technologie traditionnelle. Elle doit, selon Shumacher, permettre à tout utilisateur de l'adapter et de l'améliorer en fonction de ses besoins, conservant ainsi le potentiel de créativité de chacun, et favorisant l'esprit d'entreprise qui avait disparu avec l'apparition du travail à la chaîne et de technologies trop lointaines car trop complexes. Cette technologie « à visage humain » doit être spécialement conçue pour des sociétés possédant un surplus de force de travail, ce qui exclut les technologies occidentales. On peut, en citant Shumacher, résumer ce point de vue par l'affirmation selon laquelle *“A man is destroyed by the inner conviction of uselessness. No amount of growth can compensate for such losses”*.

Un exemple concluant d'implémentation de « technologie intermédiaire » est celui de l'électrification des communautés de Retiro et Varadouro au Mexique (Zilles, 2000) : bien que les cellules PV aient été achetées à l'étranger, une grande partie de composants annexes a été fabriquée ou adaptée sur place :

- le bois, qui est le matériau de construction traditionnel, a été utilisé comme support, malgré les recommandations du fournisseurs des panneaux
- des batteries de voiture, bien que peu adaptées aux systèmes PV ont été utilisées car un fournisseur était présent dans la ville voisine
- le système de régulation de charge a été simplifié au maximum.

4.1.5. Transferts de technologie et maintenance

On considère généralement qu'une des conditions pour accéder au développement est l'accès à la technologie. Or, dans les pays en voie de développement, cette technologie provient généralement des pays industrialisés. Des transferts de technologie sont donc nécessaires, et on été vus comme la panacée pour de nombreux pays en voie de développement (Able Thomas, 1996).

On peut citer une série de conditions liées à un transfert de technologie efficace (Able Thomas, 1996):

- Le transfert de matériel doit s'accompagner d'un transfert de connaissances (expertise, méthodes d'organisation, capacités de maintenance, etc)

- L'environnement économique et les infrastructures doivent être favorables et doivent permettre l'approvisionnement en matières premières nécessaires à la technologie.
- La technologie doit être adaptée au niveau d'industrialisation et à la taille de la population-cible
- Après le transfert, des mesures doivent être adoptées (formations, R&D, etc.) pour continuer à améliorer la technologie et viser l'autonomie.

Karani (2002) relève pour la Banque Mondiale une série d'obstacles et de contraintes au transfert de technologie dans le cas particulier du mécanisme de développement propre³. Ces contraintes sont reprises dans la Table 6. Karani préconise, entre autres, pour surmonter ces difficultés, une collaboration accrue entre gouvernements du nord et du sud, et la privatisation d'une certaine partie des services publics.

Équipement, sous-traitance	Travail	Marchés	Gouvernement
Peu de fournisseurs locaux et de spécialistes	Peu de main d'œuvre possédant de l'expérience, de techniciens spécialisés et d'ingénieurs	Pénuries saisonnières	Peu de standardisation et de standards de qualités
Accès limités aux fournisseurs internationaux	Peu d'ingénieurs électriciens et d'experts en électronique	Incompatibilité entre matériaux locaux et technologie importée	Bureaucratie lourde
Dépendance technologie vis-à-vis de l'étranger	Formations inadéquates	Influence gouvernementale sur les marchés et sur les prix	Peu d'experts dans le secteur public
Pression pour acheter à des fournisseurs locaux		Offre peu diversifiée de la part des producteurs	Corruption
Délais importants			
Coûts élevés, qualité faible			

Table 6: Obstacles aux transferts de technologie dans le domaine énergétique (Source: Karani, 2002)

Selon Fulford (2000), une des faiblesses majeures du programme d'électrification par microcentrales hydraulique au Népal a été le manque d'ateliers pour la maintenance et la réparations des turbines. En cas de panne, les turbines devaient être envoyées à Kathmandou pour réparation, ce qui peut prendre plusieurs jours et est relativement coûteux. Le même constat est posé par Wamukonya (2007): l'un des problèmes majeurs des systèmes photovoltaïques domestiques est leur dépendance vis-à-vis des fournisseurs étrangers. Plus de 70% des composants proviennent en effet de l'étranger dont certains, telle la cellule photovoltaïque, requièrent une technologie de pointe et sont donc les plus coûteux.

Les problèmes rencontrés dans les projets d'électrification décentralisée par énergies renouvelables incluent très régulièrement un manque d'expertise technique locale, une mauvaise utilisation des appareils ou encore le manque de maintenance (Zomers, 2001). Les activités de formations de techniciens locaux sont donc primordiales. Ces formations peuvent inclure des cours de management et de gestion des stocks qui peuvent s'avérer utiles lors de la création d'activité locale.

3 Mécanisme défini dans le protocole de Kyoto permettant aux pays industrialisés d'obtenir des crédits carbone en finançant des projets de réduction d'émission dans les pays en développement.

4.1.6. Décentralisation

Dans son best-seller « Small is Beautiful », Schumacher (1973) plaide pour une technologie à taille humaine. Pour lui, les systèmes centralisés perdent en efficacité car ils sont « déshumanisés » et les exécutants les plus bas dans la hiérarchie perdent un des facteurs essentiels d'efficacité qu'est la motivation. Une plus grande subsidiarité (entendue comme une responsabilité et une liberté accrue des formations inférieures) permet selon lui de conserver la créativité et la dignité des travailleurs.

Historiquement, l'électrification rurale s'est effectuée majoritairement par une production centralisée. Les subsides pour l'électrification rurale ont également été principalement dirigés vers l'extension du réseau électrique (World Bank, 2006). Cependant les avancées technologiques en matière de production décentralisée permettent aujourd'hui de rendre ces technologies compétitives, même si leur utilisation implique des approches et des modes d'appropriation complètement différents.

Pour Zomers (2001), un investissement important dans l'électrification rurale étant requis quoi qu'il arrive, il est primordial de diriger cet investissement vers les systèmes décentralisés peu émetteurs de gaz à effet de serre.

Le but de cette section est d'évaluer l'adaptabilité du modèle « Small is beautiful » à la question de la production d'énergie. L'électrification rurale dans les pays en développement peut en effet s'effectuer de façon plus ou moins décentralisée. Dans le présent travail, trois niveaux de centralisation/décentralisation sont considérés:

- *La production centralisée*: Dans ce cas, une centrale de taille importante (typiquement plusieurs centaines de kWe) produit le courant à une tension de quelques dizaines de kV qui est ensuite distribué à l'aide de lignes moyenne tension. A l'autre bout de ces lignes moyenne tension, des sous-stations sont installées qui convertissent le courant à la tension d'utilisation. Les lignes basse tension (généralement monophasées avec retour par la terre, à 230 ou 110V) connectent ces sous-stations à l'utilisateur final. La centrale peut être alimentée au combustible fossile (cas le plus fréquent), au combustible nucléaire, à la biomasse ou encore à l'énergie solaire (centrales à concentration). La production centralisée possède généralement un rendement élevé (dû aux effets d'échelle). Les principaux inconvénients de cette solution proviennent des lignes électriques: coût élevé (environ 40000 €/km de moyenne tension pour l'Afrique de l'Ouest, environ 50000 €/km pour l'Inde), pertes en lignes importantes (environ 12% dans le cas du Ghana, selon Nassen, 2002, plus de 20% selon Zomers, 2001) ou encore connexions sauvages augmentent considérablement le coût du kWh électrique.
- *Le mini-grid* couvre les besoins d'une communauté ou d'un village et constitue en ce sens une solution intermédiaire entre les solutions centralisées et décentralisées. Un générateur est installé et fournit l'électricité au travers d'un mini-réseau électrique basse tension. Généralement les mini-grid sont alimentés par des générateurs diesel ou des petites centrales hydrauliques. Il est cependant tout-à-fait envisageable de les alimenter par du PV, de la biomasse ou de l'éolien. Ce système est bien adapté à l'hybridation (combinaison de panneaux PV et d'un générateur diesel par exemple). Il requiert généralement une certaine capacité de stockage (batteries) et permet, outre l'électrification individuelle, d'alimenter des installations communautaires telles que l'éclairage public.
- *La production décentralisée individuelle* vise à couvrir les besoins d'un ménage, ou d'une habitation non reliée au réseau électrique. Les systèmes les plus courants sont le générateur diesel, les panneaux photovoltaïques ou la gazéification de la biomasse. Dans le cas du photovoltaïque, un système de stockage doit être prévu afin de compenser le

décalage entre la demande et l'intensité de la radiation solaire.

Chaque système possède ses avantages et ses inconvénients. Il est généralement reconnu que les systèmes décentralisés sont plus flexibles, plus responsabilisants et sont source d'emploi local. Alanne (2006) propose un relevé des avantages et inconvénients liés à la génération d'électricité décentralisée (cfr Table 7).

Sector of sustainability	Benefits	Drawbacks
Flexibility	<ul style="list-style-type: none"> • scalability to changes in heat and electricity demand • open to new technologies • flexibility for different fuels because of versatile technologies • adaptable to the “future of networks” • takes into account the changing individual needs via decentralized responsibility in decision-making • not vulnerable to external risks 	<ul style="list-style-type: none"> • compatibility of the components required • life-cycle of single solutions is not necessarily long • new laws and rules needed • unsure if common standards will be found
Reliability	<ul style="list-style-type: none"> • no wide electricity blackouts because of independency on electricity distribution 	<ul style="list-style-type: none"> • may increase risk of hazards in consumption point due to extra devices
Local and global well-being of humans	<ul style="list-style-type: none"> • improved employment possible • new local market opportunities and competition • gives a feeling of independence and self-control • can “teach” private energy consumers 	<ul style="list-style-type: none"> • some people may find increased responsibility as difficult and new technology as bizarre • “someone’s bread can be another one’s death”
Environment	<ul style="list-style-type: none"> • no deteriorated landscape due to large power plants and lines • decrease in emissions due to elimination of transmission losses 	<ul style="list-style-type: none"> • local distribution of emissions • effects of possible new fuel infrastructure (e.g. natural gas network)
Utilization of local resources and networks	<ul style="list-style-type: none"> • utilization of existing infrastructure • more effective utilization of building sites • utilization of local fuels • utilization of information networks 	<ul style="list-style-type: none"> • may require changes in existing infrastructure at the beginning • increased need for education and training

Table 7: *Avantages et inconvénients de la production décentralisée (Source: Alanne, 2006)*

La participation locale, qui entraîne la décentralisation, est désirable aussi bien du point de vue de la demande, que du point de vue de l'offre. Du côté de la demande, elle aide à révéler les préférences des populations entre plusieurs services, ou encore, comme l'ont montré plusieurs études, que la propension à payer pour l'électricité et d'autres services est bien plus haute que ce qui avait été évalué précédemment. Du point de vue de l'offre, la décentralisation augmente la prise de

responsabilité locale et incite à une provision de services plus efficaces (World Bank, 1996, p 38).

Pour la Banque Mondiale, le critère à retenir pour le choix ou non de l'électrification décentralisée est le retour sur investissement. L'extension du réseau est chère et nécessite des densités de demande élevées pour justifier l'investissement. Les meilleurs opportunités sont les villages et les villes qui peuvent devenir des centres de nouvelles opportunités de business et d'emploi non agricole. Lorsque les densités sont faibles, les alternatives comme les générateurs diesels ou le photovoltaïque sont plus rentables et doivent être préférées (World Bank, 1996).

Chakrabarti (2002) aboutit à la même conclusion dans le cas de la région du Bengale en Inde: si le coût de génération est inférieur pour la production centralisée, le coût du transport (environ 50 000 € par km de ligne moyenne tension) devient rapidement prohibitif. La Figure 15 montre le coût de trois solutions différentes (PV, générateur diesel et centrale au charbon) en fonction de la distance à couvrir. On constate que le photovoltaïque devient plus rentable que le charbon après une distance d'environ 20 km. Le diesel reste prohibitif à cause de son coût élevé dans cette région et à cause du coût du transport. Notons que les résultats présentés sont relatifs à l'année 1999. Chakrabarti prévoit une forte diminution (qui a depuis lors été constatée) dans le coût des panneaux PV, diminuant ainsi la distance d'égalisation des coûts.

Hiremath et al. (2009) plaident également pour la génération décentralisée en Inde, mieux adaptée selon eux à la situation du pays et qui permet de générer des emplois locaux.

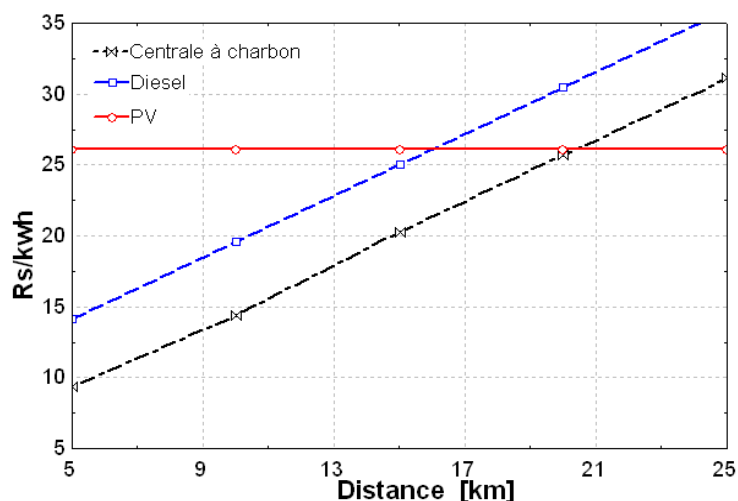


Figure 15: Coût de l'électricité (en Roupies par kWh) en fonction du système envisagé et de la distance pour l'année 1999. (Source des données: Chakrabarti, 2002)

La plupart des mini-grids installés le sont en Asie, particulièrement en Chine, qui en compte 60.000 (Martinot, 2002). Ces derniers sont issus de programmes gouvernementaux. Au Népal, la plupart des mini-grids sont gérés par des entrepreneurs locaux, qui en retirent un bénéfice. Le succès des mini-grids népalais peut-être attribués à plusieurs facteurs comme l'accès au crédit, les subsides gouvernementaux sur le coût du capital, la commercialisation des systèmes par des entreprises népalaises et les faibles coûts de transaction (Martinot, 2002).

Dans le cas des mini-grids, la distribution peut s'avérer problématique. Un bon exemple est celui de l'électrification de villages indonésiens par générateur diesel: le chef du village était chargé de répartir l'électricité et de récolter les mensualités. Il s'est avéré qu'après quelques mois, la majorité des foyers avaient été déconnectés par le chef faute de paiement (Zomers, 2001). Un agent plus neutre, par exemple une banque, semble donc plus approprié pour la collecte de l'argent.

Le choix entre mini-grid et solutions purement décentralisées est évidemment fortement lié au coût final du kWh. Chaurey (2010) compare ainsi pour le cas de l'Inde une solution de mini-grid alimenté exclusivement par du photovoltaïque avec des systèmes photovoltaïques individuels. La Figure 16 montre le prix de reviens au kWh en fonction du nombre de ménages connectés. On constate que le mini-grid devient compétitif s'il peut toucher un nombre de ménage supérieur à environ 200. Si la puissance des systèmes individuels installés passe de 18W à 36W, ce nombre est réduit à environ 130 ménages (Chaurey, 2010).

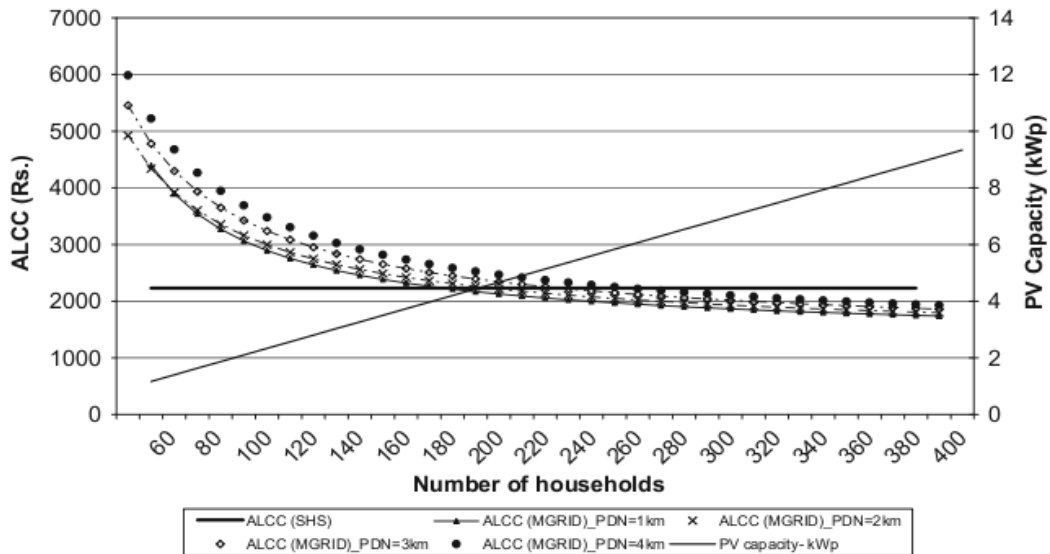


Figure 16: Coût de l'électricité pour les solutions de mini-grid (MGRID) et les solutions de systèmes PV individuels de 18W (SHS) (Source: Chaurey, 2010).

Un calcul similaire est effectué par Näsén (2002) pour une région-type située au nord du Ghana. La densité de population y est faible (7 ménages par km²) et la longueur de ligne moyenne tension requise pour la région est évaluée à 155 km. L'extension du réseau a été comparée en termes de coût à la génération décentralisée (Figure 17). On constate que le PV décentralisé constitue une solution meilleur marché que l'extension du réseau. L'auteur précise cependant que, pour des densités de population plus élevée, cette tendance pourrait s'inverser (Näsén, 2002)

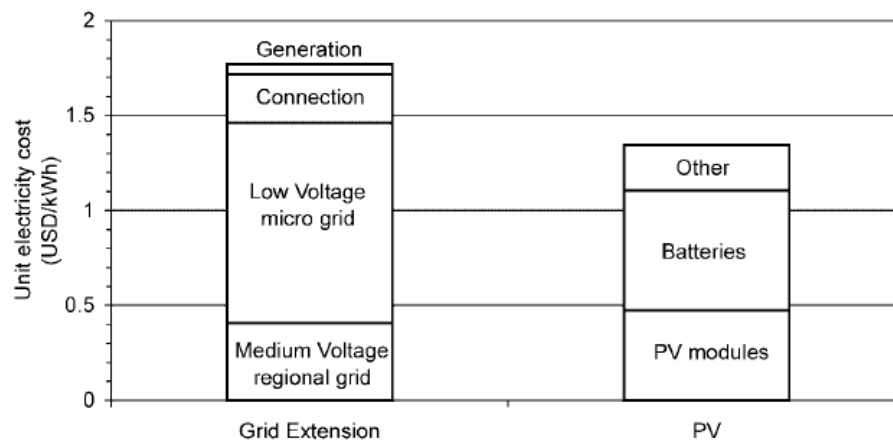


Figure 17: Coûts de l'électricité pour deux solutions technologiques (Source: Näsén, 2002)

4.1.7. Mode d'introduction sur le marché

Selon la BM, le marché doit être déterminé par les choix des consommateurs. Le prix doit refléter les coûts et il devrait exister une compétition entre fournisseurs afin d'éviter la promotion au niveau gouvernemental d'énergies non adaptées aux consommateurs ruraux. (World Bank, 1996, p 3-4). La Banque mondiale plaide donc pour la libéralisation, mais reconnaît que les coûts d'investissement peuvent être prohibitifs pour les zones rurales et ne favorisent donc pas l'électrification rurale. On constate cependant au Bangladesh que même les plus pauvres se connectent au réseau s'il est disponible (et même si le coût est fortement accru par rapport au zones urbaines) (World Bank, 1996, p. 5)

Zomers (2001) se montre beaucoup plus critique vis-à-vis du marché libéralisé pour les zones rurales, d'une part parce qu'il s'agit d'un marché très réduit et peu attractif, et d'autre part parce que les temps de retour sur investissement sont très longs, ce qui n'intéresse pas les investisseurs privés. Pour lui, ni les privatisations, ni la compétition ne sont des solutions acceptables pour l'électrification rurale, qui doit être subsidiée et accompagnée de programmes de développement rural pour réduire la pauvreté.

L'un des problèmes majeurs est le coût initial (de connexion au réseau par exemple). L'accès au crédit et au microcrédit constitue une solution intéressante, comme le montre l'expérience de Mizque et Aiquile, deux villages boliviens, où plus de la moitié des villageois ont pu se connecter au réseau grâce à un programme de microcrédit mis en place par la compagnie d'électricité (World Bank, 1996, p. 6). Cependant, il est important de remarquer que les emprunts requis pour l'accès à l'électricité sont très peu compatibles avec les modèles traditionnels des prêts de microcrédit, qui proposent plutôt des prêts à court terme (typiquement d'un an) réservés à des activités productives (Martinot, 2002).

Morris, et Chowdhary (2009) ont analysé un grand nombre d'expériences de microcrédit pour l'accès à l'énergie en Asie, Afrique et Amérique Latine. Ils en dégagent les facteurs de succès suivant:

- L'association est le facteur de succès le plus important: des alliances stratégiques doivent être formées entre plusieurs groupes intéressés, tels que les organismes de microcrédit, les compagnies énergétiques, les entreprises d'énergie rurale, les organismes gouvernementaux, les ONG.
- La flexibilité du mode de prêt: celui-ci doit être adapté aux demande du client et à la taille des ménages. Les calendriers de remboursement doivent également être adaptés à la situation particulière de la zone étudiée.
- Progression pas-à-pas: les clients existants d'organismes de microcrédit ainsi que les réseaux déjà existants doivent être mis à profit pour éviter de partir d'une page blanche.
- La limitation du risque de crédit. Celui-ci est en effet plus important dans le cas de l'électrification car, au risque de crédit lui-même s'ajoute le risque de dysfonctionnement de la technologie.

Notons encore qu'au total, le nombre de systèmes PV vendus à crédit (environ 25 000 en 2002) reste extrêmement faible par rapport au nombre total de systèmes vendus cash, notamment en Chine (Martinot, 2002).

Dans le cas de production décentralisée, l'accès aux ressources financières est la contrainte principale pour l'acquisition du matériel nécessaire. Selon Miller (2000), l'adoption de toute nouvelle technologie dans les zones rurales est conditionnée par l'accès au capital. Les technologies apportées par la révolution verte par exemple n'ont pu être adoptées que par les paysans possédant

un certain capital de départ, alors que la non-adoption était principalement due au manque d'offre de crédit. Selon le directeur de l'Agence Indienne pour le Développement des Énergies Renouvelables (cité par Miller, 2000), cette offre de crédit lacunaire s'explique par le risque très élevé inhérent au crédit rural, les agriculteurs se trouvant souvent dans l'incapacité de rembourser les prêts consentis.

Le problème du capital de départ est un problème relatif à la demande. Or l'offre peut aussi poser problème: selon Miller (2000), la diffusion des panneaux PV individuels est fortement freinée par le manque d'infrastructure. Pour lui, le défi est de trouver des entrepreneurs locaux, capables de mettre sur pied la logistique de distribution, d'installation et de maintenance nécessaires aux technologies décentralisées. Ainsi, lors du programme de subvention de la technologie PV en Inde⁴, une seule petite compagnie privée a réussi à l'introduire sur les marchés ruraux, jugés trop opaques, trop fragmentés et soumis à un trop grand nombre de décideurs inefficaces. La stratégie d'électrification directe a alors été abandonnée pour une stratégie plus progressive, en commençant par les zones urbaines, puis semi-urbaines pour finalement toucher les zones rurales éloignées.

Niewuenhout et al. (2001) ont compilé un grand nombre d'études concernant l'électrification rurale par panneaux PV. Ils distinguent 4 stratégies d'introduction de la technologie dans le marché, mais concluent qu'on ne peut démontrer qu'une des stratégies doit être préférée aux autres, chacune ayant connu des succès et des échecs. Ces 4 stratégies sont résumées dans la Table 8.

	Inconvénients	Avantages
Le don: Le matériel est livré gratuitement à l'utilisateur, la maintenance étant généralement laissée au soin de ce dernier.	Les utilisateurs sont peu impliqués et ne se sentent pas responsables du matériel. Peu sont enclins à payer pour la maintenance Taux d'échec important	Déploiement rapide Économies d'échelle
La vente cash: Système vendu au prix coutant par la compagnie	Tendance à acheter du matériel de mauvaise qualité résultant dans des composants défectueux et non remplacés Accessible uniquement aux ménages les plus aisés	Flexibilité de choix Implication importante du consommateur
Le crédit à la consommation (25000 unités vendues dans les pays en développement selon Martinot, 2002)	Difficulté d'accès au crédit Impact très limité sur la demande par rapport à la vente cash Manque d'assistance technique	L'utilisateur est propriétaire du système Accès facilité à l'électricité pour une grande partie de la population
Le service rémunéré: Le coût de l'installation et de la maintenance est réclamé chaque mois au consommateur. En cas de non-paiement, le système est retiré. (8700 unités selon Martinot, 2002)	Expérience très limitée L'utilisateur n'est pas propriétaire, son implication est donc moindre	Accès facilité à l'électricité pour une grande partie de la population Maintenance assurée par la compagnie

Table 8: Avantages et inconvénients de différentes stratégies d'introduction sur le marché (Source: Niewuenhout et al., 2001)

Bien que le marché cash favorise les plus nantis, celui-ci peut être utilisé comme catalyseur, permettant de lancer le marché à crédit. On estime ainsi que 10% des ménages ruraux payeront leur système cash et, qu'à partir du moment où le marché cash sera mature, une plus grande part de la population (environ 50%), plus pauvre pourra entrer dans les systèmes du marché à crédit ou dans

4 Prêt accordé par la Banque Mondiale à L'Inde en 1994 pour le développement des ressources renouvelables.

celui du service rémunéré. (Martinot, 2002).

Notons encore que, selon El Bassem et al. (2004), les expériences de systèmes photovoltaïques offerts ont été très peu fructueuses, les utilisateurs étant peu inclinés à payer pour la maintenance des systèmes, qui se dégradent rapidement et diffusent une image négative de la technologie.

En conclusion, on constate que le marché principal pour l'électrification décentralisée est le marché cash, que les politiques de dons se sont souvent soldées par des systèmes peu viables et que de nouvelles approches d'introduction sur le marché doivent être mises au point. L'accès au crédit et au microcrédit est également un problème récurrent, qui limite l'extension de technologies à haut capital de départ (principalement les technologies renouvelables).

4.1.8. Subsidiation/Financement

Les subsides dans le domaine de l'électrification rurale sont motivés par divers facteurs tels que la nécessité de créer un marché initial, permettant par la suite de réduire les coûts et de disséminer la technologie, les politiques de soutien aux énergies renouvelables qui présentent généralement un coût initial plus important ou encore les politiques de réduction de la pauvreté. Ces subsides peuvent provenir des gouvernements, de programmes d'aide internationaux (Banque Mondiale, GEF, ...), d'ONGs ou encore de mécanismes tels que le "mécanisme de développement propre"⁵.

Les tarifs et subsides peuvent cependant être néfastes, car ils sont généralement dirigés vers l'électricité du réseau, qui coûte très cher à étendre. Les alternatives décentralisées (PV, diesel) ne sont pas ou peu subsidiées et sont donc défavorisées. Les options technologiques les plus efficaces en termes de coût peuvent également être défavorisées (World Bank, 1996, p. 4; Zomers, 2001). Zomers (2001) note ainsi que le prix auquel est revendue l'électricité aux agriculteurs des pays en développement est généralement plus de deux fois inférieur au coût de production (32 fois inférieur dans le cas de l'Inde!).

La Banque Mondiale plaide pour une transition des marchés énergétiques subsidiés vers des marchés ouverts qui reflètent les coûts de production. Ces subsides s'élèvent généralement à une fraction substantielle du PNB, à une demande excessive et à une utilisation inefficace de l'énergie. De plus, les ménages les plus riches, possédant le plus d'appareils électriques sont ceux qui profitent le plus de ces subsides (World Bank, 1996, p31).

La BM reconnaît cependant l'utilité des subsides pour tenir compte des externalités, comme les coûts environnementaux et sanitaires liés à la qualité de l'air. L'option de la taxation des externalités n'est ici pas viable car elle conduirait à taxer les ménages les plus pauvres, qui utilisent du bois ou du fumier comme source d'énergie. (World Bank, 1996, p34).

Barnes (2007), contrairement à la Banque Mondiale, plaide pour une politique de subside orientée vers les pauvres, souvent exclus des bénéficiaires de l'électrification. Il reconnaît cependant que, par le passé, la plupart des programmes de subsidiation ont souvent échoué à diminuer le coût de l'électricité pour les familles les plus pauvres. L'important pour Barnes est de conditionner les subsides à des critères stricts d'efficacité et d'équité.

5 Selon Wamukonya (2007), le recours au mécanisme de développement propre n'est pas favorable aux systèmes de productions d'électricité décentralisée de petite taille pour deux raisons: D'une part la quantité de CO2 économisée est relativement faible par rapport au cas "business as usual". Le système remplace en effet quelques litres de kérosène utilisés pour l'éclairage ou de la cire de bougie. Le coût par tonne de CO2 évitée est donc extrêmement élevé. D'autre part, le principe d'additionnalité est difficilement justifiable. Ce principe impose à tout dépositaire de projet de prouver que le système ne pourrait être installé sans le recours au mécanisme de développement propre. Or, vu l'extension actuelle des panneaux photovoltaïques, cela semble assez difficile à justifier.

Barnes cite deux source principale d'inefficacité des subsides:

- Puisque les politiciens sont à la sources des subsides, ils s'accordent généralement un droit d'ingérence dans la gestion de la compagnie d'électricité. Ils peuvent ainsi par exemple intervenir en faveur de certains clients mauvais payeurs pour éviter que leur ligne soit coupée.
- Les subsides peuvent amener la compagnie à maximiser la quantité de subsides amassés plutôt que d'améliorer le service au consommateur.

Un problème additionnel se pose au niveau de la concurrence déloyale avec le marché traditionnel: les consommateurs s'attendent à recevoir une aide pour l'acquisition du matériel et refusent de payer le prix du marché. Ainsi, en Chine, un programme de subsidiation de l'énergie éolienne a généré une conception selon laquelle cette énergie n'est pas commerciale, et dépend uniquement de l'aide des donateurs. Par conséquent, si l'installation des éolienne dans le cadre du projet a été un succès, seule une poignée de projets commerciaux ont pu voir le jour, biaisant ainsi les résultats escomptés. (Lew, 2000).

Lorenzo (1997) plaide également pour le maintient des subsides car ils permettent d'élargir le champ d'action du projet et le nombre des bénéficiaires. Pour lui, les subsides doivent être utilisés pour favoriser les idées nouvelles (photovoltaïques, petit éolien, etc.) par rapport aux solutions traditionnelles (combustibles traditionnels, générateurs diesel, etc.) Il réfute l'argument selon lequel l'implication des utilisateurs est moindre lorsque le système est subsidié.

Dans le même ordre d'idée, certains auteurs plaident pour des "subsides intelligents". Ces subsides sont octroyés seulement pour une durée déterminée et sont supposés disparaître par eux-mêmes lorsque les économies d'échelle ont réduit le coût de la technologie jusqu'à rendre les subsides superflus.

Parallèlement à ces subsides, de nombreux auteurs s'accordent à dire qu'il est nécessaire que l'utilisateur paie un certain prix pour le système, sans quoi la participation et la motivation des bénéficiaires à maintenir le système sont largement diminuées (Barnes, 2007; World Bank, 1996). Dans le cas de l'extension du réseau ou des mini-grids, l'expérience Sud-Africaine des compteurs électriques à carte prépayée semble constituer une solution particulièrement intéressante.

En conclusion, les subsides semblent régulièrement conduire à des distorsions du marché, provoquant l'effet inverse de celui escompté. Ils peuvent cependant être utilisés pour introduire une technologie sur le marché et la rendre compétitive, mais un mécanisme de retrait du subside doit être prévu. Les subsides restent également importants pour toucher la partie la plus pauvre de la population, mais ils ne devraient pas couvrir l'entièreté du coût du système.

4.1.9. Identification des besoins

Il est extrêmement difficile d'établir *a priori* une cartographie exacte des besoins énergétiques d'une population donnée, celle-ci dépendant de facteurs sociaux (préférences des communautés, adéquation avec les pratiques traditionnelles), techniques (technologies adoptées, type de consommation) ou encore organisationnels. L'histoire est remplie d'exemples montrant que l'idée que la technologie doit suivre les prévisions des besoins futurs est erronée, ces besoins étant très difficilement prédictibles.

En gardant ce constat en mémoire, et avec les précautions qui s'imposent on peut tenter de définir les besoins de base par personne pour atteindre un standard de vie minimal dans les régions rurales. Lorenzo (1997) évalue ainsi ce besoin de base à 0.5 kWh/jour/personne en définissant certains indicateurs (espérance de vie, kcal par jour, surface d'habitation, etc.) pour lesquels des

valeurs minimales sont supposées.

Il est cependant important de noter la différence importante qui existe entre “besoins de base” et “besoins perçus”. Il existe ainsi de nombreux exemples où les besoins “non basiques” ont la priorité sur les “besoins de base”, comme par exemple la préférence affichée pour une télévision plutôt que pour des pompes amenant l'eau courante dans le ménage.

On peut aussi s'interroger sur l'origine de la perception du besoin: la perception d'un besoin entraîne-t-elle la technologie ou bien la technologie entraîne-t-elle le besoin? Il est par exemple plausible que le besoin pour des systèmes photovoltaïques ne naisse que de la connaissance de l'existence d'autres systèmes photovoltaïques dans les maisons voisines. Le besoin en électricité perçu par les communautés rurales peut donc varier fortement en fonction des références extérieures et de la situation géographique (Lorenzo, 1997).

Cette perception du besoin peut également expliquer la difficulté notée par Lorenzo qu'ont certains systèmes photovoltaïques non conventionnels (en termes de puissance installée ou de finalité) à entrer sur un marché déjà occupé par du photovoltaïque traditionnel.

Les problèmes liés aux enquêtes de besoins auprès des communautés locales doivent donc être soulignés. Selon Akrich (1987), il est important de ne pas prendre pour argent comptant les déclarations des utilisateurs potentiels d'une technologie. Ainsi, lors d'une enquête approfondie auprès des médecins chef des dispensaires de brousse d'un pays en développement, il était ressorti à l'unanimité que le second besoin de plus important était celui de l'éclairage. Des kits d'éclairage ont donc été fournis en masse. Il est ressorti du suivi du projet que ces kits n'étaient presque jamais utilisés et qu'en fait, ce dont manquait le dispensaire, c'était avant tout de médicaments et de produits de soin. Selon Akrich, *« la psychologie expérimentale a mis en évidence le fait que la réponse à une question est largement déterminée par ce que l'interrogé perçoit de ce qu'on attend de lui, au travers de la question elle-même et de la situation particulière dans laquelle elle est posée. Quand on demande à des médecins ce pour quoi ils ont besoin d'énergie, ils se comportent poliment, ils ne font pas de réponse hors sujet, d'autant qu'après tout, peut-être leur réponse aura un effet positif à long terme »*. Le défi consiste donc à sélectionner les porte-parole appropriés, aussi bien humains que non-humains (pour Akrich, l'opulence d'une habitation permet probablement de mieux évaluer les ressources financières d'un ménage qu'une enquête) qui rendent compte des besoins réels.

Martinot (2002), après examen de divers programmes d'introduction d'énergies renouvelables (solaire thermique au Népal, microéoliennes en Argentine et véhicules à l'éthanol au Brésil), conclut que ces programmes ont été fructueux grâce à la bonne adéquation entre les besoins des utilisateurs et les pratiques traditionnelles. Selon lui, les programmes qui impliquent un minimum de changements dans les attitudes et les comportements des utilisateurs sont ceux qui ont la plus grande probabilité de réussite.

La problématique des besoins mérite donc une réflexion approfondie lors de tout projet d'électrification rurale. Si l'on admet, comme indiqué à la section 4.1.1., que le succès d'un projet d'électrification est conditionné par la demande et par l'implication des communautés locales, il est important pour le succès du projet de disposer de références connues de la communauté locale ou de créer des unités de démonstration, qui peuvent engendrer une demande pour le produit.

Notons pour finir que les besoins perçus ne sont pas figés. Il évoluent généralement avec le projet. Un exemple nous est fourni par Akrich (1993) : lors d'un projet d'exploitation des tiges de coton au Nicaragua, l'objet du projet, reflet de l'interprétation des besoins locaux par les développeurs, a évolué d'un simple ramassage des tiges à une machine fabriquée spécialement pour cette tâche. Une solution intermédiaire, une d'arracheuse importée utilisant les outils agricoles (tracteurs) locaux, a également été envisagée puis abandonnée. Le détail du processus est détaillé

au Cadre 4. Ce processus de spécification conjointe des éléments sociaux et des éléments techniques aboutit à une version finale très éloignée du projet original. Il a fallu une série d'expérience pour que les Haciendas (les plantations) aboutissent à la définition définitive de qu'elles peuvent et de ce qu'elles veulent.

0. *Les haciendas se débarrassent des tiges de coton par le brûlage*
1. *Les haciendas sont d'accord pour qu'on les débarrasse par la récolte des tiges de coton*
 - a) *Expérience : on coupe les tiges manuellement*
2. *Les haciendas sont d'accord pour qu'on les débarrasse par la récolte des tiges de coton à condition que cela ne demande pas de main d'oeuvre*
L'épreuve a) permet de spécifier à la fois ce que veulent les haciendas et que doit faire le dispositif technico-organisationnel mis en place, car 2) implique que la faux doit se transformer en outil mécanisé .
 - b) *Essai d'utilisation d'une arracheuse importée du Soudan et attelée à des tracteurs locaux.*
3. *Les haciendas sont d'accord pour qu'on les débarrasse par la récolte de tiges de coton à condition que cela ne demande pas de main-d'oeuvre ni de matériel agricole*
 - c) *Construction de la machine à arracher : inscription dans cette machine des contraintes issues de b) ainsi que d'autres contraintes comme l'irrégularité du terrain, etc.*

Cadre 4: Processus de définition de l'objet du projet de développement (Source : Akrich, 2003)

4.1.10. Impact environnemental

Dans le domaine de l'énergie, les impacts environnementaux se traduisent principalement par l'émission de gaz polluants. Ces gaz peuvent être toxiques (microparticules, CO, ...), à effet de serre (CO₂, N₂O, méthane, ...) ou encore destructeurs de la couche d'ozone (CFC, HCFC, N₂O, ...).

Lorsque l'on compare l'impact environnemental de différentes technologies, il est important de ne pas se limiter aux seules émissions liées à la combustion de la biomasse et de combustibles fossiles. Il est important de prendre également en compte les émissions qui ont été engendrées lors de la construction du système de conversion énergétique, lors du transport du combustible ou encore lors du retraitement du système. Dans ce travail, l'analyse du cycle de vie sera utilisée pour prendre ces émissions annexes en compte. Cette analyse permet d'établir l'emprunte écologique d'un système de conversion, depuis sa construction en passant par son utilisation et jusqu'à son retraitement. Le concept d'"emprunte carbone" sera utilisé pour évaluer la quantité de dioxyde de carbone engendrée par la génération d'un kWh d'électricité pour une filière spécifique.

La Table 9 présente l'emprunte écologique en termes d'émissions de CO₂, SO₂ et NO_x liée à différentes filières. Ces valeurs seront utilisées comme valeurs de références pour les comparaisons de la section 5.2.8..

Outre l'impact environnemental lié aux émissions de gaz dans l'atmosphère, d'autres impacts doivent également être pris en compte. L'impact visuel de lignes hautes tensions ou de champs d'éoliennes peut par exemple s'avérer être un facteur important. Cet impact peut être évalué à l'aide de différents indicateurs (liste non exhaustive):

- Pollution des sols ou des nappes aquifères
- Surface occupée au sol: l'importance relative de cet indicateur varie évidemment avec les

caractéristiques de la zone étudiée. Un m² en zone urbaine présente en effet une valeur nettement supérieure à un m² en zone rurale montagnaise par exemple.

- Impact visuel
- Impact sur la biodiversité: certaines filières, notamment les filières dites "biomasse", lorsqu'elles ne sont pas gérées durablement, peuvent conduire à une réduction importante de la biodiversité et de la couverture végétale, qui peuvent à leur tour avoir des conséquences néfastes, comme une plus grande vulnérabilité aux intempéries, la désertification ou encore l'érosion des sols.
- La génération éventuelle de déchets non recyclés
- Toxicité et impact sur la santé

Option	CO ₂ emission (g/kWh)	SO ₂ emission (g/kWh)	NO _x emission (g/kWh)
Energy crops (current)	30 - 40	0.08 - 0.16	1.1 - 2.6
Energy crops (future)	30 - 33	0.06 - 0.08	0.40 - 0.55
Hydro	5 - 9	0.02 - 0.03	0.06 - 0.07
PV	98 - 167	0.20 - 0.34	0.18 - 0.30
PV(future amorphous)	8 (?)		
Solar thermal	20 - 30	0,50	0.23
Wind	6.5 - 30	0.02 - 0.09	0.02 - 0.36
Coal (hard); power plant eff. 36,5%	1050		
Coal (best practice)	954	11.82	4.34
Coal (flue gas desulphur, low NO _x)	986	1.49	2.93
Oil (best practice)	818	14.16	3.99
Gas combined cycle	430	-	0.49
Diesel embedded	772	1.55	12.3
Nuclear (current)	6	0.02 - 0.03	0.06 - 0.07
Nuclear (future)	3		

Table 9: Empreinte carbone de différentes filières (Source: Zomers, 2001)

4.2. Résumé des critères et grille d'analyse




Les expériences des divers projets d'électrifications analysées en section 4.1. permettent de mettre en évidence une série de principes et de critères recommandables pour les projets d'électrification rurale. On peut classer ces principes en deux catégories:


- Les principes donc les critères font l'objet d'un consensus: ces principes apparaissent régulièrement dans la littérature traitant d'électrification rurale et ne sont contestés par aucun des auteurs cités dans la revue bibliographique.
- Les principes ne faisant pas l'objet de consensus: Il s'agit typiquement du débat entre approche publique ou approche libéralisée pour les projets d'électrification.

Les principes et les critères sont assemblés en une grille d'analyse, présentée ci-dessous. Ceux ne faisant pas consensus sont distingués par un signe exclamation.

Principes	Critères retenus	Brève description
Coût par rapport à la concurrence technologique	Coût unitaire actualisé	Coût prenant en compte les coûts d'investissement, de combustible ou de maintenance sur toute la durée de vie du système.
	Capital de départ	Un capital de départ important peut constituer un frein à la diffusion de la technologie, particulièrement dans les régions où l'accès au crédit est malaisé.
	Externalités	Les externalités sont les coûts liés aux impacts environnementaux et sociaux non inclus dans le prix du kWh acheté
Participation des bénéficiaires	Demande pour le produit	S'assurer d'une demande locale pour le produit passe notamment par des enquêtes sur le terrain et par une identification aussi précise que possible des besoins
	Identification des interlocuteurs appropriés	Identification d'une <i>unité d'organisation sociale</i> habilitée à mener le projet à bien. L'utilisation de structures existantes (entreprises locales, coopératives, associations) est également recommandée.
	Inclusion dans les processus décisionnels	L'adhésion des bénéficiaires passe par leur implication dans la définition du projet et dans sa réalisation. La création d'une association locale semble recommandée.
	Autonomie vis-à-vis du pouvoir politique	Dans le cas d'électrification décentralisée, il est nécessaire d'éviter autant que faire se peut l'ingérence du politique dans le projet, pour favoriser une gestion locale plus efficace.
Démonstrateurs et adoption de la technologie	Pertinence	Le démonstrateur semble nécessaire si les utilisateurs ne sont pas familiers avec la technologie mais il n'est pas suffisant pour s'assurer de l'adoption et de la diffusion de la technologie.
	Connaissance et persuasion	L'enquête ethnographique constitue un outil de choix afin d'évaluer la probabilité d'adoption du système par la population. La connaissance que la population a du système doit être évaluée, ainsi que les moyens de persuasion du bien-fondé de la technologie.
	Implication locale	La population locale doit être incluse dans la mise en place du démonstrateur (cfr principe "Participation des bénéficiaires")

	Evolutivité	La définition technique du système doit pouvoir évoluer en fonction de l'expérience acquise lors de son utilisation. Le système ne doit pas être figé.
Technologie adaptée	Fiabilité	La technologie doit présenter une faible probabilité de panne, y compris dans des conditions de fonctionnement difficiles.
	Maturité technologique	La maturité technologique est un garant de la fiabilité du système. Notons que certains systèmes nécessitent plusieurs dizaines d'année d'existence avant d'atteindre un niveau de fiabilité acceptable.
	Simplicité	La simplicité d'un système permet de favoriser son adoption. Un système trop complexe et incompris court le risque d'être rejeté.
	Appropriabilité	La technologie doit être accessible à ses utilisateurs, qui doivent pouvoir se "l'approprier", notamment en étant habilités à y apporter des modifications.
	Adaptabilité	La technologie doit pouvoir évoluer en fonction des besoins locaux, parfois inattendus.
Transferts de technologie et maintenance	Formation	La présence de techniciens compétents sur place est fondamentale pour assurer la maintenance (trop souvent lacunaire) des systèmes de production d'électricité. La formation joue en ce sens un rôle central.
	Infrastructure amont	Il est nécessaire qu'une infrastructure amont permettant la maintenance soit présente, sous forme par exemple d'ateliers équipés de machines-outils appropriées.
	Matières premières	L'accès au matériaux et aux pièces de remplacement est souvent problématique. Il faut donc favoriser autant que possible les systèmes utilisant des composants présents localement.
	Création d'activité	Les projets d'électrification doivent être générateurs d'activité et d'emplois, si possible dans les zones rurales. La possibilité de générer une activité connexe par le transfert de technologie doit aussi être favorisée.
Décentralisation	Situation géographique	La situation géographique de la région considérée inclut le relief ou les accidents géographiques, qui influencent la facilité et le coût de l'extension du réseau.
	Densité de consommation	La densité de consommation est le produit de deux facteurs: la densité d'habitation et la consommation moyenne par ménage. Une faible densité de consommation est un argument majeur en faveur de la décentralisation.
	Coût	Le choix entre système centralisé ou décentralisé dépend du coût de chacune des solutions (cfr principe "Coût").
	Gouvernance	Le capacité ou non des institutions du pays à gérer un système centralisé de manière fiable est évidemment à prendre en compte dans le choix du niveau de centralisation.
Identification des besoins	Consommation	L'évaluation de la consommation est nécessaire au dimensionnement du système et constitue donc un facteur de succès ou d'échec du projet.

	Enquêtes	Bien que l'enquête préalable soit un outil d'identification des besoins nécessaire, elle possède certaines limitations et ses résultats ne doivent pas toujours être pris pour argent comptant.
	Evolutivité	Il est nécessaire d'être conscient du caractère évolutif des besoins, ceux-ci pouvant être modifiés, affinés, redéfinis, en même temps que la technologie
Impact environnemental	Cycle de vie	La quantité de polluants émise doit être considérée sur l'entièreté du cycle de vie du système et pas uniquement lors de sa période "productive"
	Polluants atmosphériques	Ceux-ci incluent les gaz à effet de serre, les gaz destructeurs de la couche d'ozone ou les émissions toxiques.
	Pollutions diverses	Celles-ci incluent les impacts visuels, la perte de biodiversité, les déchets, la toxicité des matières utilisées, etc.
Marché	Marché concurrentiel 	D'une part, un marché concurrentiel permet une meilleur allocation des ressource, et privilégie les technologies les plus appropriées à la situation de la région. D'autre part, l'électrification décentralisée est peu rentable et peut donc difficilement être couverte par un marché entièrement libéralisé.
	Accès au crédit et au microcrédit	Pour les systèmes nécessitant un capital initial important, l'accès au crédit est une condition <i>sine qua non</i> à la diffusion du système. Le crédit doit être flexible et limité afin de modérer le risque.
	Mode d'introduction sur le marché 	Divers modes de subsidiation sont envisageables, allant du système entièrement subsidié à la vente cash non subsidiées. Aucune solution n'étant optimale, la sélection du mode d'introduction sur le marché doit être effectuée en fonction du contexte particulier de chaque projet.
Financement et Subsidiation	Niveau de subsidiation 	D'un côté, certains auteurs pointent du doigt l'inefficacité des subsides ou encore la création de distorsions sur le marché, la concurrence déloyale avec le marché traditionnel. D'autres auteurs plaident pour les subsides en tant que moyen de réduction de la pauvreté ou d'introduction de technologies sur le marché.
	Caractère ciblé	Les subsides doivent profiter majoritairement aux plus pauvres et/ou aux systèmes les plus pertinents sur le plan environnemental. Le subside peut être vu en ce sens comme une forme d'internalisation des coûts externes.
	Non-gratuité	La plupart des études s'accordent à dire qu'il faut éviter "d'offrir" le système, ce qui peut provoquer une mauvaise gestion de ce dernier et un manque d'implication des bénéficiaires.
	Limitation dans le temps	Dans le cas où le subside est destiné à favoriser l'introduction d'une technologie et de l'activité qui en découle, ce subside doit être limité dans le temps.

Le signe exclamation () indique que la revue de littérature a mis un évidence des divergences de point de vue entre auteurs sur ce critère particulier.

On remarque dans la grille d'analyse que certains critères peuvent entrer dans plusieurs

principes, et on constate une série d'entrecroisement et d'imbrications de critères entre les différents principes. Par exemple:

- la subsidiation est fortement liée au moyen de mise sur le marché
- le critère de coût pour la décentralisation se rapporte au principe "coût".
- les questions de demande pour le produit et d'évaluation des besoins sont très proches
- la fiabilité et la maturité technologique sont très liées
- le critère d'évolutivité est présent aussi bien du côté de l'évaluation des besoins que de la technologie, ces deux éléments devant évoluer de façon concomitante.

La catégorisation des critères de succès ou d'échec proposée est celle qui semblait la plus pertinente, mais il est évident qu'elle n'est pas la seule possible.

Notons encore que les critères proposés ne sont pas classés par ordre d'importance. Dans le présent travail, il a été choisi de ne pas effectuer un tel classement, qui serait extrêmement difficile à objectiver. Une pondération des critères en fonction de leur degré de nécessité ou de pertinence n'a pas non plus été effectuée, cette pondération étant laissée au bon sens du lecteur en fonction de la situation particulière du projet étudié.

5. Évaluation d'un projet d'électrification par ORC solaire au Lesotho

5.1. Description du projet

5.1.1. STG International

L'idée de la création de STG international est née de l'expérience de Matthew Orosz en tant que volontaire "Peace Corp" au Lesotho de 2000 à 2002. Les fours solaires mis au point par Ivan, un canadien fondateur de l'école de Bethel, étaient extrêmement simples et peu coûteux à construire. Or, si ces fours pouvaient chauffer du pain, il semblait évident qu'ils pouvaient également évaporer un fluide capable de faire tourner une turbine pour générer du courant.

De retour au MIT, l'idée a mûri et a remporté le premier prix de la compétition "MIT IDEAS". Une première ébauche de prototype a été installée au Lesotho en 2005, année de formation du groupe "Solar Turbine Group", qui deviendra plus tard "STG International".

Ce groupe s'est donné pour objectif de développer la technologie de la concentration solaire de petite taille couplée à celle des cycles de Rankine organiques, afin de générer de l'électricité bon marché et de l'eau chaude. L'accent est mis dès le départ sur l'utilisation de matériaux disponibles localement (acier brut, composants automobiles) et sur des technologies largement répandues afin que le système puisse être assemblé sur place.

L'idée est de développer un système simple et peu coûteux qui puisse être dimensionné et assemblé par des techniciens locaux. À terme, l'objectif est que le projet soit pérenne et que les premières unités de démonstrations se multiplient par l'intermédiaire d'entrepreneurs locaux, sans intervention de STG. Ces unités constitueraient une source d'activité locale et permettraient d'approvisionner en électricité les villages retirés des montagnes du Lesotho. Pour ce faire, STG a misé dès le début sur la formation de techniciens locaux. Une série d'ingénieurs et de techniciens formés en Afrique du Sud ont d'emblée été associés au projet et au développement des prototypes successifs, dans l'objectif qu'ils deviennent des spécialistes du domaine, capables à leur tour de former de nouveaux ingénieurs et techniciens.

STG international, qui dispose du statut d'ONG depuis 2008 a remporté un nombre important de concours et de compétitions, qui lui permettent de financer ses activités. La liste des prix remportés est disponible au Cadre 5. Si la majorité de ces prix couvrent des sommes relativement faibles (généralement environ 10.000 USD), trois se démarquent par le montant important alloué à l'ONG:

- Le prix "Global Development Marketplace 2006", alloué par la Banque Mondiale, d'un montant de 130.000 USD
- Le prix "Advanced E-Team" alloué par la "National Collegiate Inventors & Innovators Alliance", d'un montant de 20.000 USD.

- Le prix "Sustainable Vision Grant" alloué par la "National Collegiate Inventors & Innovators Alliance", d'un montant de 47.000 USD.

- EPA P3 Phase II Award (2009) winners (in cooperation with MIT).
- NCHIA 2008 Sustainable Vision Grant winners (in cooperation with MIT).
- MIT Energy Initiative's Student Financial Assistance for Energy-Related Research, generously supported by a gift from TOTAL.
- An MIT International Development Initiative travel grant supported team field work in Lesotho during August 2008.
- EPA P3 Phase I Award (2008) winners (in cooperation with MIT).
- NCHIA 2007 Advanced E-Team Grant winners (in cooperation with MIT).
- World Bank Development Marketplace 2006 Award winners
- Ignite Clean Energy Competition 2006, Third Place Award.
- Carroll L. Wilson Award: Awarded to Matthew Orosz, 2006.
- Grant for graduate students pursuing challenging research opportunities abroad.
- Public Service Center Independent Fellowship: Awarded to Amy Mueller, January 2006.
- IDEAS Award 2004-2005 for proposed development of the ORC engine.
- Public Service Center Independent Fellowship:: Awarded to Headley Jacobus, January 2005.
- Public Service Center Independent Fellowship:: Awarded to Toni Ferriera, January 2005.
- Public Service Center Independent Fellowship: Awarded to Matthew Orosz, January 2005.
- IDEAS Award 2003-2004 for proposed development of the trough technology.

Cadre 5: Sources de financement de STG International (Source: STG, 2010)

On peut estimer que, depuis 2005, le budget total de STG pour le développement du prototype d'ORC solaire se situe dans une fourchette comprise entre 250.000 et 300.000 USD.

5.1.2. Technologie du cycle de Rankine organique solaire

Le système proposé vise à convertir la radiation solaire en deux produits utiles: l'électricité et l'eau chaude. Il peut être divisé en trois sous-composants: les concentrateurs, le stockages et le cycle ORC.

Les concentrateurs concentrent la radiation directe du soleil vers un tube collecteur entouré d'une enveloppe de verre. Ils sont munis d'un système de poursuite sur un ou deux axes qui leur permet de s'orienter face au soleil à toute heure du jour. L'enveloppe de verre est utilisée pour limiter les déperditions thermiques du tube vers l'ambiance. Le collecteur est parcouru par un fluide de transfert (ici: du glycol pur) à environ 150°C, qui s'échauffe grâce à l'apport solaire.

Le fluide de transfert est ensuite dirigé vers un système de stockage, composé d'un réservoir rempli de quartzite. Ce stockage est destiné à accumuler la chaleur et à la restituer pour de courtes périodes de temps (environ une heure). Ce dispositif permet d'éviter l'arrêt du système en cas de passage d'un nuage devant le soleil par exemple. Le quartzite est sélectionné comme matériau accumulateur de chaleur pour sa bonne disponibilité au Lesotho et pour son faible coût.

Le glycol est ensuite dirigé vers l'évaporateur, où il constitue la source chaude permettant de faire tourner le cycle ORC.

Le cycle ORC est parcouru par un fluide organique, généralement un réfrigérant emprunté à la technologie des pompes à chaleur haute température. Le fluide sélectionné ici est le R245fa, qui est un fluide très largement utilisé dans les cycles de Rankine organiques. Ce fluide est vaporisé par le glycol au niveau de l'évaporateur, est détendu dans l'expanseur, où il génère du travail mécanique qui est converti en électricité au niveau du générateur. Le fluide en sortie d'expanseur reste relativement chaud (environ 100°C). Cette chaleur résiduelle est récupérée pour fournir de l'eau chaude à la communauté au niveau de l'échangeur de cogénération. Le fluide passe ensuite dans le récupérateur où il préchauffe le liquide, puis est condensé dans le condenseur à air avant d'être pompé vers la partie liquide du récupérateur et de retourner dans l'évaporateur.

La production du système est donc double: d'une part de l'eau chaude permettant de se laver ou de faire la lessive et d'autre part de l'électricité pouvant être dirigée vers un mini-grid ou utilisée pour charger des batteries. La situation particulière du Lesotho se prête bien à la production d'eau chaude car les hivers y sont généralement froids mais ensoleillés, tandis que les étés sont plus nuageux. On peut donc s'attendre à ce que la demande et la production d'eau chaude soient en phase sur l'année.

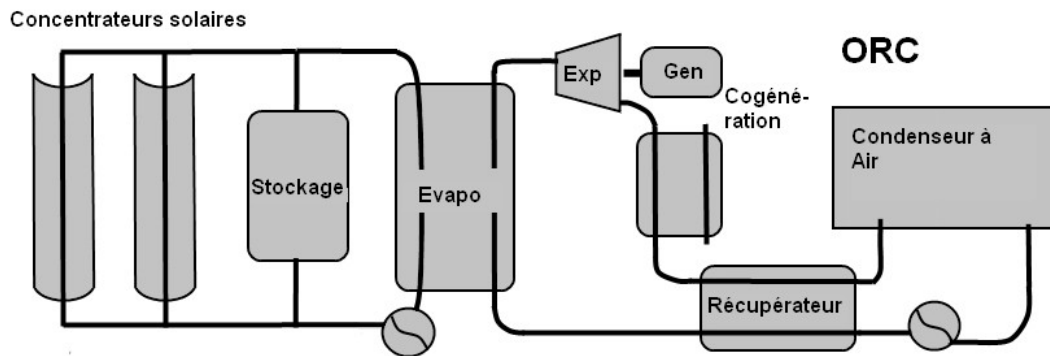


Figure 18: Schéma de principe de fonctionnement de l'ORC solaire

Une description plus complète du système de concentration est proposée par Orosz et al. (2009) et une description du cycle ORC utilisé dans cette application est proposée par Quoilin et al. (2008).

Notons que ce système n'existe pas commercialement : la technologie des concentrateurs cylindro-paraboliques est disponible, mais trop coûteuse pour le présent projet ; les cycles ORC de petite taille sont largement étudiés dans la littérature scientifique, mais aucune application commerciale n'est disponible à l'heure actuelle. De plus, l'association des deux composants (concentrateur/ORC) n'a jamais été testée auparavant. STG a donc mis au point un système de concentrateurs solaires à basse température (environ 150°C) nettement moins coûteux que les systèmes commerciaux. Le cycle ORC est également assemblé sur place et continuellement amélioré.

Le design du système étant unique, il est intéressant de détailler brièvement chaque composant, les matériaux qui les composent et la façon dont on peut se les procurer au Lesotho.

- Les concentrateurs cylindro-paraboliques comportent un réflecteur en aluminium (MIRO4), acheté en rouleau à Johannesburg. La structure de support est principalement composée de profilés d'acier, disponibles au Lesotho. Le mécanisme de poursuite comporte des capteurs et une électronique de contrôle qui doivent être achetés aux États-Unis. Les roulements, poulies, moteurs peuvent en grande partie être achetés en Afrique

du Sud.

- Le stockage comprend un réservoir à eau de 2 m³, très courant au Lesotho. Le quartzite et le glycol peuvent également être achetés sur place.
- L'évaporateur, le récupérateur et l'échangeur de cogénération sont des échangeurs à plaques qui peuvent être soit directement importés des Etats-Unis, soit achetés en Afrique du Sud.
- Le condenseur à air est typique des unités de réfrigération commerciale et peut être acheté en Afrique du Sud
- L'unité de détente comporte en fait deux expanseurs placés en série. Il est important de remarquer qu'il n'existe pas d'expanseur disponible sur le marché actuellement pour des puissances de quelques kW. Les expanseurs sont donc obtenus par modification de compresseurs existants, ce qui requiert un surcroît de main d'œuvre et un savoir-faire non négligeables (Lemort et al, 2010). Les compresseurs sont par contre largement disponibles dans les applications de réfrigération et peuvent être achetés en Afrique du Sud.
- La pompe à réfrigérant doit être du type "piston" ou "membrane" à cause de la faible viscosité du fluide de travail. Ces pompes doivent être importées des Etats-Unis.

Le prototype comporte donc une part importante d'innovation, notamment au niveau des concentrateurs solaires et des expanseurs, qui sont développés exclusivement pour les besoins de l'application visée.

On notera également qu'une grande partie des composants ne peut pas être achetée au Lesotho. Certains doivent être achetés en Afrique du Sud, et d'autres importés des Etats-Unis.

5.1.3. La situation du Lesotho

Le Lesotho est un pays montagneux enclavé en Afrique du Sud. Il couvre une surface de 30.000 km² et possède une population d'environ 2.14 millions de personnes. 80% de la population réside en zone rurale, les 20% restant résidant en zone urbaine ou périurbaine. La majorité de la population est active dans l'agriculture de subsistance et dans l'élevage. La laine et le textile sont les principales sources de revenu, même si 45% de la population ne possède pas d'emploi (Ministère des ressources naturelles du Lesotho, 2008).

Avec un PNB/hab de 1400 USD, le Lesotho était classé 33ème dans la liste des pays les plus pauvres en 2009⁶. Son indice de développement humain (IDH) était de 0.549 en 2005, ce qui le classait 138ème sur un total de 173 pays⁷.

Les trois-quarts des terres sont montagneuses et se situent à une altitude moyenne de 3500 mètres. Le reste des terres se situe à une altitude comprise entre 1500 et 2000 mètres. La topographie montagneuse rend l'agriculture difficile: seuls 10% de la surface sont des terres arables cultivées.

La majorité des ménages en zone rurale sont éloignés et éparpillés sur les flancs de collines. Seuls 11% des ménages au Lesotho ont accès à l'électricité. En zone rurale, ce pourcentage tombe à 1%.

L'objectif du ministère des ressources naturelles est d'étendre l'accès à l'électricité à un pourcentage de 35%, principalement à l'aide de technologie renouvelables et décentralisées comme le solaire, l'énergie hydraulique ou le microéolien (Ministère des ressources naturelles du Lesotho, 2008).

6 source: CIA World Factbook

7 source: Human Development, Report 2007

L'approvisionnement énergétique des régions rurales éloignées au Lesotho est un problème majeur. Par exemple, pour bénéficier d'une radio, les habitants transportent des batteries lourdes et encombrantes sur des dizaines de km. Le combustible est également difficile d'accès: les femmes et les enfants doivent couvrir une zone d'un rayon de 4 à 6 km pour récolter le bois utilisé comme combustible, 25% de la journée étant réservé à cette activité (Taele, 2007).

Le réseau électrique couvre exclusivement la partie nord du pays, le long de l'unique route asphaltée. Les régions intérieures, montagneuses et peu densément peuplées, se prêtent mal à l'extension du réseau électrique.

La Figure 19 montre que la biomasse est de loin la première source d'énergie au Lesotho. L'électricité et les renouvelables comptent pour une part très faible de la consommation totale. Les combustibles fossiles (paraffine, pétrole, charbon) sont tous importés d'Afrique du Sud.

L'exploitation de la biomasse pose de gros problèmes d'érosion du sol. Aujourd'hui, moins d'un pour cent de la surface du Lesotho est boisée (United Nations, 2007), ce qui rend le sol particulièrement vulnérable aux intempéries (principalement le vent et la pluie), le prive de sa couche fertile et provoque la formations de ravines (Taele, 2007).

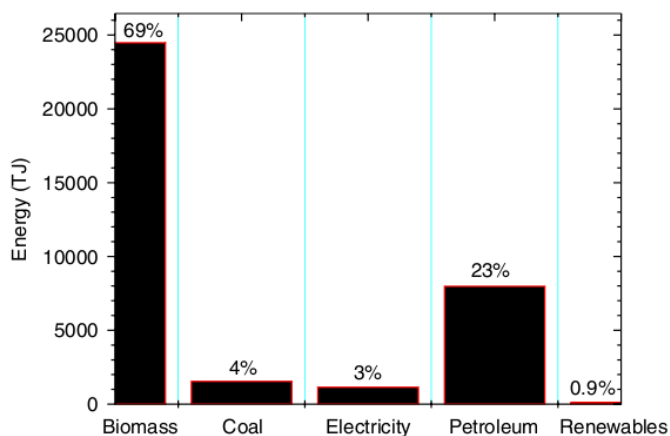


Figure 19: Profil de consommation énergétique au Lesotho.
(Source: Taele, 2007)

5.1.4. Activités de STG depuis 2005

Premier prototype

Le premier prototype d'ORC solaire a été installé en 2005 à l'école de Bethel. Ce prototype a permis d'optimiser les techniques de fabrication des paraboles et du système de poursuite à deux axes.



Figure 20: Premier prototype d'ORC solaire

Ce premier prototype n'a jamais pu produire d'électricité, le design du cycle ORC étant trop basique. Il a été démonté en 2006.

Second prototype

Le second prototype, de 1 kWe, a été installé en 2006 dans le village de Ha Teboho, voisin de Bethel. Ce site a été choisi parmi d'autres emplacements (notamment une clinique à Ha Nohana) pour son sol plat, la proximité d'une fontaine d'eau et son horizon dégagé.

La construction du système a duré une année. La phase de rassemblement du matériel nécessaire a été la plus longue: un tour et une fraiseuse ont dû être achetés à Johannesburg puis acheminés dans les montagnes, les composants nécessaires au montage, une voiture, etc. Une maison a également dû être rénovée et équipée pour héberger l'équipe. Trois ingénieurs du MIT ont participé à la construction, aidés d'un ingénieur et d'un techniciens locaux.

L'installation s'est effectuée avec l'accord du chef du village, qui s'est engagé à surveiller l'installation.



Figure 21: Second prototype d'ORC solaire, installa à Ha Teboho

Au départ de l'équipe, le système était fonctionnel: il produisait de l'eau chaude que les femmes utilisaient pour la lessive, et produisait de l'électricité servant à charger des batteries. Par manque

de temps, les performances du système n'ont pu être mesurées. L'équipe a quitté le village début 2007, en laissant le système de production d'eau chaude connecté, mais en déconnectant le système de production d'électricité.

Malheureusement, au retour du président de l'ONG après quelques mois, il s'est avéré que le système avait été entièrement vandalisé: les batteries, les alternateurs, le système de poursuite, les courroies avaient été volés et le système n'était plus fonctionnel depuis longtemps.

Troisième prototype

La construction du troisième prototype a débuté en Juin 2009. Ce prototype, d'une puissance électrique de 3kW, présente un certain nombre d'améliorations par rapport aux précédents:

- La forme des paraboles a été améliorée en utilisant des matrices en aluminium et non plus en bois.
- Les expenseurs du cycle ORC ne sont plus issus de compresseurs de climatisation automobile, mais de compresseurs HVAC résidentiels.
- Le système de poursuite sur deux axes a été remplacé par un système de poursuite sur un seul axe, plus aisé à mettre en œuvre
- Un système de stockage thermique a été inclus afin de maximiser la période de production du système.

Notons que les deux premières améliorations constituent des compromis par rapport à la philosophie du projet initial: la simplicité et la disponibilité (matrice en bois, compresseurs de voiture) on dû être quelque peu sacrifiés afin que le système présente une efficacité minimum.

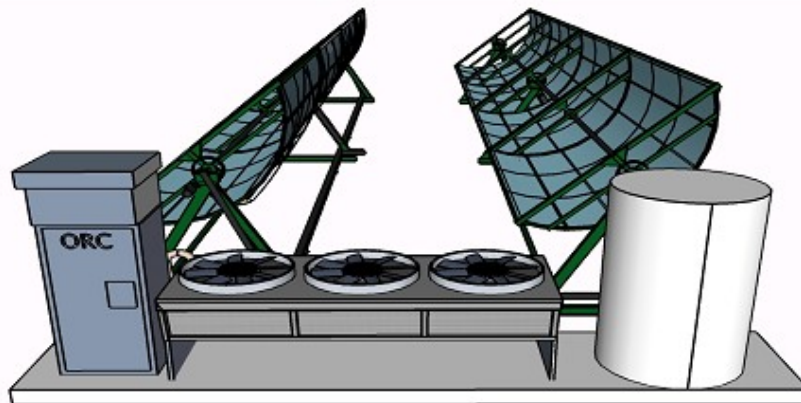


Figure 22: Vue 3D du troisième prototype en construction

L'expérience malheureuse du deuxième prototype a mené l'ONG à sélectionner un site protégé pour l'installation du système: le site sélectionné est celui d'une clinique rurale située dans le district de Berea. Le système sera entouré de grillages et le gardien de la clinique devrait dissuader les éventuels voleurs.

Ce dernier site est plus près de Maseru que Bethel ou Ha Teboho: une heure de route contre 4 ou 7 (en fonction du niveau d'eau dans la rivière toute proche) pour Bethel et Ha Teboho.

La réalisation de ce troisième prototype était toujours en cours lors de la rédaction de ce travail, les premiers tests étant prévu pour Octobre 2010.

5.2. Analyse du projet d'électrification

5.2.1. Coût

Cette section compare le coût actualisé de production du kWh électrique (Levelized electricity cost) pour diverses technologies concurrentes du système proposé.

Deux technologies possédant un même niveau de "centralisation" sont considérées: un mini-grid photovoltaïque et un mini-grid alimenté par un générateur diesel. Deux autres technologies, largement répandues sont également considérées: le système photovoltaïque individuel (solution purement décentralisée) et l'extension du réseau électrique.

ORC solaire.

Le système envisagé est un système novateur, qui n'existe pas commercialement, et n'a été testé que partiellement et sous forme de prototype. Aucune donnée empirique ne permet donc d'évaluer ses performances. Afin d'évaluer la quantité de kWh électriques produits annuellement par le système, le recours à des modèles thermodynamiques et de radiation solaire est inévitable. Chaque composant du système a donc été modélisé et la quantité de radiation disponible a été évaluée à l'aide de modèles radiatifs appliqués à la latitude, à la longitude et à l'altitude du Lesotho. Les modèles proposés proviennent de la littérature scientifique, ou bien ont été développés spécifiquement pour certains composants peu courants. Lorsque des données étaient disponibles, ces modèles ont été validés expérimentalement. La modélisation de chaque composant est décrite dans l'Annexe 1.

Parallèlement à ce modèle thermodynamique, il est important de définir un modèle de coût pour chaque composant. Les modèles proposés sont des corrélations de coût provenant de la littérature ou de l'expérience acquise lors du montage des prototypes successifs au Lesotho. Les corrélations de coût utilisées sont disponibles en annexe 2.

Le coût total relatif au matériel est de 39635 USD. Afin de calculer le prix de revient réel au kWh, il faut y ajouter le coût de la main d'œuvre, le coût de la maintenance, et les coûts relatifs à l'actualisation des sommes futures (dus notamment aux taux d'intérêt). Ces coûts sont nettement moins faciles à chiffrer que les coûts de matériel et des hypothèses sont requises:

- Les coûts de main d'œuvre sont estimés à 25% du coût de matériel.
- Les coûts de maintenance sont estimés à 2000 USD (soit 5% du coût du matériel). Ce chiffre, relativement élevé, se justifie par la nécessité de maintenances régulières et efficaces, mises en évidence en section 4.1.4.. La technologie étant nouvelle, on peut également prévoir des frais de maintenance accrus par rapport à une technologie éprouvée comme celle du photovoltaïque.
- Le taux d'actualisation est fixé à 12%. Ce taux, sensiblement plus élevé que les taux utilisés en Europe ou aux Etats-Unis, reflète la difficulté d'accès au crédit dans les régions rurales des pays en développement. Il s'agit également du taux préconisé par Chaurey (2010) dans le cas de mini-grids en Inde.
- La durée de vie du système est évaluée à 15 ans

Moyennant ces hypothèses, un coût de 0.406 USD/kWh est obtenu, pour un investissement de 49700 USD.

Comme indiqué en section 5.1.2., le système proposé produit aussi de l'eau chaude, permettant

des activités comme la lessive. Il est cependant très difficile de chiffrer le bénéfice d'une telle production, qui sera considéré comme un produit dérivé bénéfique dans le présent travail, mais sans lui attribuer de valeur pécuniaire.

Mini-grid photovoltaïque.

La solution la plus proche du système proposé en termes de taille et de source d'énergie est la mini-centrale solaire photovoltaïque.

Les coûts d'installation du système au Lesotho sont estimés grâce à une visite effectuée dans un hôpital de campagne financé par la Banque Mondiale à Nkau, près de Taba-Tseka: le système installé possède une puissance crête de 3 kW_e et une capacité de stockage de 8 kWh. Le détail du coût des composants est disponible dans l'Annexe 3. Il s'élève à un total de 19.200 USD.



Figure 23: Système photovoltaïque de 3 kW_e

Notons que les experts gouvernementaux d'"Appropriate Technology Solutions (ATS)" considèrent un coût installé du photovoltaïque nettement supérieur à celui calculé plus haut: Une moyenne de 27 USD/kW installé est considérée, ce qui semble très élevé. Dans le présent travail, un coût total de 26.000 USD pour le système de 3 kW est considéré comme raisonnable, ce qui correspond à 8,6 USD/kW installé. Afin de calculer le coût actualisé du kWh avec ce système, les hypothèses suivantes sont formulées:

- La radiation solaire moyenne journalière pour le Lesotho est de 5 kWh/m² (source: Tael, 2007)
- Les coûts de maintenance sont estimés à 1000 USD/an (soit 3.8% du coût du matériel).
- Le taux d'actualisation est fixé, comme précédemment, à 12%.
- La durée de vie du système est évaluée à 15 ans (période recommandée par Chaurey, 2010).

Le coût calculé est de 0.34 USD/kWh, pour un investissement de 26.000 USD.

Notons que Chaurey (2010) effectue un calcul similaire pour le cas de l'Inde, et obtient un coût au kWh largement supérieur, de 0.505 USD/kWh⁸. Cette différence est notamment due à des coûts d'opération et de maintenance nettement plus élevés (environ 6.3% du coût d'investissement) dans le calcul de Chaurey.

Mini-grid diesel

Le cas du groupe électrogène (ou générateur diesel) diffère des deux cas précédents

8 Il faut remarquer que Chaurey utilise une méthode de calcul différente pour le coût au kWh: il ne calcule pas un coût actualisé, mais un coût correspondant à des annuités fixes pour le système sur toute sa durée de vie. Le coût annoncé de 0.505 a donc été recalculé selon notre méthode de calcul.

principalement au niveau du coût d'investissement: celui-ci est en effet très limité. En revanche, les coûts annuels sont nettement plus élevés, principalement à cause du prix du carburant. Les hypothèses suivantes sont considérées:

- Le coût d'achat du système est de 662 USD (cfr annexe 4)
- Le coût annuel d'entretien est de 300 USD/an
- Le coût du carburant est de 1.03 USD/l⁹
- Une augmentation du prix du carburant est supposée. Elle est fixée à 4%/an.
- Le taux d'actualisation est fixé, comme précédemment, à 12%.
- La durée de vie du système est évaluée à 15 ans

Le coût au kWh obtenu avec ces hypothèses de travail est de 0.464 USD/kWh, avec un coût initial relativement faible, de 660 USD.

Système photovoltaïque individuel

Selon Taelle (2007) un système photovoltaïque individuel de 40W coûte 794 USD au Lesotho. En partant de ce coût initial, on peut formuler les hypothèses de calcul suivantes:

- La radiation solaire moyenne journalière pour le Lesotho est de 5 kWh/m² (source: Taelle, 2007)
- Les coûts de maintenance sont estimés à 400 USD/an.
- Le taux d'actualisation est fixé, comme précédemment, à 12%.
- La durée de vie du système est évaluée à 15 ans.

Moyennant ces hypothèses, un coût très élevé de 2.99 USD/kWh est obtenu, avec un coût initial de 794 USD. Miller (2000) obtient des coûts semblables, variant de 6 à 8 USD/kWh pour un système de 35 W et selon la région du monde dans lequel il est installé.

Extension du réseau électrique

Comme indiqué en section 4.1.6., le coût du kWh issu du réseau électrique dépend très fortement du nombre de ménages connectés et de leur consommation. Ces deux paramètres sont très difficiles à identifier sans une enquête de terrain approfondie. Pour la présente analyse, le nombre de ménages connectés sera exprimé comme paramètre de la fonction de coût. Au niveau de la consommation électrique, on peut légitimement s'attendre à une consommation accrue en cas de connexion au réseau par rapport à un système purement décentralisé ou à un mini-grid. Des consommations très différentes sont reportées dans la littérature:

- Chaurey (2010) base ses calculs sur une consommation de 76 kWh/an pour le cas de l'Inde;
- Camblong (2009), au travers d'une étude prospective de mini-grid, estime la consommation moyenne par ménage à environ 1000 kWh/an pour un village moyen (en guise de comparaison, un ménage belge typique non muni de chauffage électrique consomme environ 3500 kWh/an.)
- Zomers (2001) estime une consommation de 981 kWh/an pour les zones rurales reliées au réseau.
- Shamannay (1996) estime la consommation moyenne d'un ménage rural au Bangladesh à 330 kWh/an.
- Krothapalli (2007) Estime qu'en zone rurale, un minimum de 219 kWh est nécessaire pour couvrir une consommation de base, telle que l'éclairage ou la télévision.
- Zhou et Byrne (2002) ont estimé, au travers au travers d'un grand nombre d'interviews auprès de ménages chinois, une fourchette variant de 110 à 580 kWh de besoins de base en

9 source: <http://www.shell.co.za/vpower/pprice.htm>, prix en vigueur fin juillet 2010

électricité.

Au vu de ces estimations très divergentes, une consommation de 500 kWh/an est considérée comme raisonnable pour les zones rurales d'un pays comme le Lesotho. Les hypothèses de calcul sont les suivantes:

- Les coûts de maintenance sont estimés à 2.5% de l'investissement¹⁰
- Le taux d'actualisation est fixé, comme précédemment, à 12%.
- La durée de vie du système est évaluée à 20 ans.
- Le coût de génération de l'électricité est supposé égal au prix d'achat de 2010, soit 0.08 USD/kWh. Ce coût est considéré comme un coût "de carburant" dans le calcul du coût unitaire.
- Seuls les coûts des lignes moyenne tension (33 kV) sont considérés. La longueur des lignes de distribution basse tension (généralement monophasée avec retour par la terre) étant nettement plus difficile à évaluer, leur coût est négligé. Ce coût est estimé à 40.000€/km pour une longueur de 35 km (cfr annexe 5).

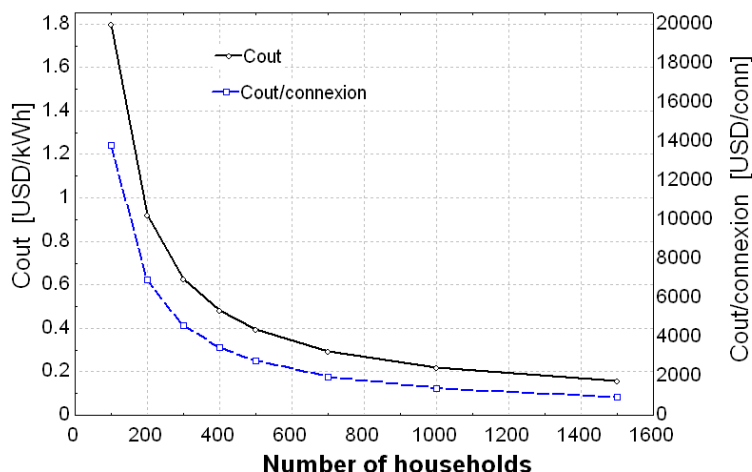


Figure 24: Coût du kWh et coût de connexion en fonction du nombre de ménages connectés

La Figure 24 présente le coût au kWh et le coût d'investissement par connexion en fonction du nombre de ménages connectés.

Conclusion

Les coûts calculés dans cette section sont des coûts évalués à partir des données disponibles et de valeurs typiques obtenues dans la littérature. La marge d'erreur est donc relativement importante.

On constate, comme l'ont souligné plusieurs auteurs, des coûts très élevés pour l'électrification rurale par rapport à l'électrification urbaine. Ces coûts calculés ne sont cependant pas extravagants: Zomers (2001) évalue par exemple le coût de production d'électricité en zone rurale entre 0.11 et 0.46 USD/kWh pour l'année 1996, ce qui est du même ordre de grandeur que les valeurs calculées plus haut.

¹⁰ Comme recommandé par Zomers (2001)

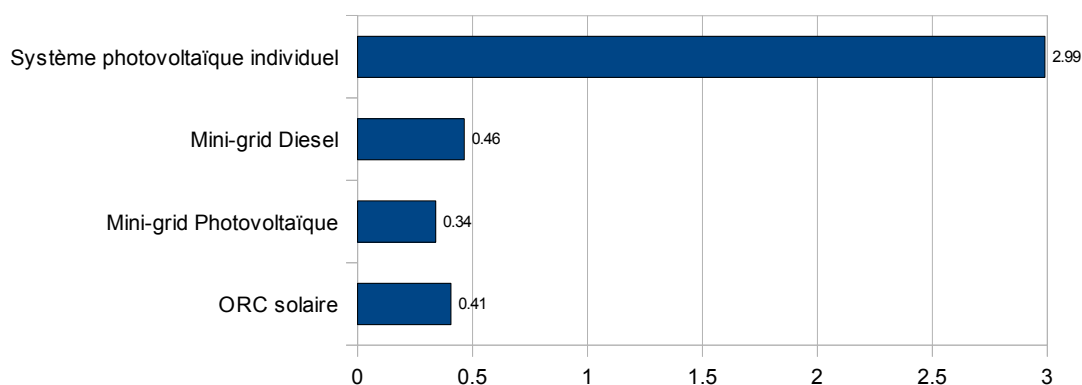


Figure 25: Coût du kWh produit selon différentes filières

On constate que des 4 solutions présentées dans la Figure 25, le mini-grid photovoltaïque est celle qui présente le coût au kWh le plus faible, suivi de l'ORC solaire, puis du mini-grid diesel. Le coût du système PV individuel est très élevé, notamment à cause de la très faible puissance installée.

L'extension du réseau est également assez coûteuse. Elle atteint un coût raisonnable (inférieur à 0.4 USD/kWh) à partir de 500 ménages connectés, ce qui semble difficilement réalisable vu la taille des villages et la faible densité de population dans la région étudiée, les villages comprenant en moyenne 27 ménages (GTZ, 2009).

Le coût d'investissement de l'accès à l'électricité est plus difficilement comparable, notamment à cause des consommations très variables en termes de kWh pour les différents systèmes. On peut cependant noter que le coût d'investissement pour le générateur diesel est négligeable par rapport aux autres systèmes, que le coût d'investissement du système ORC est supérieur à celui de photovoltaïque, et que le coût de connexion est très variable en fonction du nombre de connexions.

Notons encore que les différences entre les trois solutions les meilleur marché sont relativement limitées, et sont probablement inférieures à la marge d'erreur due aux différentes hypothèses qui ont été formulées.

Le coût au kWh du système proposé semble acceptable lorsqu'il est comparé aux autres technologies (bien qu'il ne soit pas le moins élevé), mais ce coût comporte une part de risque nettement plus importante, qui est due aux incertitudes et au manque de maturité de la technologie proposée.

Le coût d'investissement est en revanche très élevé, ce qui peut représenter une barrière à sa diffusion dans des zones où l'accès au crédit est malaisé.

Le problème du coût des externalités (coûts additionnels non pris en charge tels que le coût du réchauffement climatique) pour les différents systèmes n'est pas abordé dans ce travail par manque de données et à cause de la difficulté d'évaluer le coût d'émissions de NO_x, de SO_x ou de gaz à effet de serre. Cependant, le coût très élevé de l'électrification rurale rend les externalités presque négligeables: Dones et Heck (2005) évaluent en effet le coût des externalités en Europe pour des centrales classiques (charbon, gaz, pétrole) à 5 €cents/kWh et celui du photovoltaïque à moins de 0.5 €cents/kWh. Ces coûts ont été calculés pour l'Europe. On peut donc s'attendre à ce qu'ils soient différents pour l'électrification rurale en Afrique, mais ils restent néanmoins faibles vis-à-vis des coûts de production au kWh.

5.2.2. Niveau de participation des bénéficiaires

Au Lesotho, il existe une demande pour l'accès à l'électricité, principalement pour l'éclairage, la radio, la télévision et la recharge des batteries de GSM. Dans le village de Bethel, par exemple, l'unique ménage possédant des panneaux PV propose un service (rémunéré) de recharge de batteries GSM. On estime que la moitié de la population non-électrifiée du Lesotho sait ce qu'est le PV. 74% d'entre eux l'ont appris en voyant un système fonctionner dans le voisinage, et 15% en ont eu connaissance par la radio (Niewuenhout et al., 2001).

La demande pour les systèmes photovoltaïques individuels semble donc avérée. En revanche, il est beaucoup moins sûr que la population soit demandeuse d'un système novateur comme celui proposée par STG, d'une part parce que la technologie peut sembler plus complexe (plus des composants, système mécanique, etc.) et d'autre part parce que cette technologie est forcément communautaire (un ORC solaire de quelques dizaines de kW n'est pas envisageable).

Lors de l'installation du prototype à Ha Teboho, l'interlocuteur principal était le chef du village, qui avait accepté de mettre l'emplacement à disposition de STG. Cependant, aucun membre de la communauté n'a été convié à la planification, à la conception, ou à l'installation du système. Aucune association locale n'a été créée pour la maintenance du système.

Le mode de distribution des bénéfices envisagé par l'ONG lors de l'installation du prototype au milieu du village peut également être questionné. Au niveau de l'électricité, le système était destiné à recharger des batteries qui pouvaient être utilisées par les habitants. Dans un second temps, l'installation d'un mini-grid était également envisagée. Au niveau de l'eau chaude, un réservoir était installé à côté du système, où les femmes du village pouvaient venir remplir des bassines et des bidons. Les quantités d'eau chaude et d'électricité disponibles étant limitées, elles ouvrent le champ à ce que Hardin nommait "La tragédie des biens communs"(Hardin, 1968): un système de gestion commun doit être mis en place, sans quoi la surexploitation peut mener à la détérioration du système. Les batteries, par exemple, ne peuvent être déchargées en dessous d'un certain seuil, sinon leur capacité décroît rapidement. La question de savoir si un tel système de gestion commune peut être facilement mis en place dans un village comme Ha Teboho ne peut être résolue dans le présent travail par manque de données de terrain. Une enquête anthropologique plus poussée semble nécessaire.

Le projet semble donc être un projet monté de toute pièce par STG et "livré" à une population locale consentante mais non demandeuse. Le dépouillement du système et le vol des pièces détachées lorsque celui-ci a cessé de fonctionner début 2007 en sont des indices supplémentaires.

5.2.3. Démonstrateur et adoption de la technologie

La technologie étant nouvelle, le recours à un démonstrateur est une condition nécessaire mais non suffisante à son adoption. C'est effectivement l'option sélectionnée par STG: l'idée est d'installer des démonstrateurs dans certains lieux spécifiques (village, clinique, école) afin de familiariser la population à la technologie pour créer une demande locale. Cette demande doit ensuite être couverte par des initiatives privées venant notamment des techniciens formés lors de la conception du système.

On peut cependant regretter que les phases de prototypage et développement soient confondues avec la phase de démonstration. En effet, la technologie devant encore être mise au point, les pannes sont fréquentes et le service n'est pas satisfaisant pour la population. Il est à craindre que l'effet inverse à celui escompté soit produit: la technologie pourrait être considérée comme non fonctionnelle et rejetée au lieu d'être adoptée.

Notons que la technologie proposée reste flexible et évolutive, caractéristiques importantes soulignées par M. Akrich. La puissance électrique du système peut en effet facilement être modulée (elle a d'ailleurs été multipliée par 3 entre le deuxième et le troisième prototype) et la production d'eau chaude peut être favorisée ou non selon les besoins des utilisateurs.

5.2.4. Technologie appropriée et fiabilité

Il est évident que le système proposé n'est pas mature technologiquement. Celui-ci n'est en effet pas disponible commercialement et n'existe que sous forme de prototypes dans une poignée de laboratoires dans le monde. Il n'a donc pas encore pu démontrer sa fiabilité ni sa durabilité.

La fiabilité est une condition *sine qua non* à la diffusion d'une technologie. Le photovoltaïque par exemple, bien qu'il s'agisse d'une technologie vieille de 50 ans, posait encore de nombreux problèmes de fiabilité dans les années 90, ce qui a fortement compromis nombre de programmes d'électrification rurale. On peut donc s'attendre à ce que le système proposé connaisse également des problèmes de jeunesse durant les premières années de fonctionnement.

Si l'on compare avec la technologie photovoltaïque, on peut s'attendre à ce que la probabilité de panne soit nettement plus élevée. Contrairement au panneaux PV, l'ORC solaire possède une série de composants en mouvement (concentrateurs solaire, pompes, expanseurs), qui nécessitent un entretien plus régulier et qui constituent une source de pannes non négligeable.

Ajoutons à cela que certains composants, comme les expanseurs, sont utilisés dans des conditions de fonctionnement pour lesquelles ils n'ont pas été prévus, et qu'aucune étude ne certifie que la durée de vie d'un expanseur soit aussi longue que celle du compresseur duquel il est issu.

La revue bibliographique met également en évidence l'importance de la simplicité du système. Si l'on compare le photovoltaïque et le générateur diesel à l'ORC solaire, il semble évident que ce dernier comporte un nombre de composants beaucoup plus important, ce qui le rend *de facto* plus complexe. Les principes physiques mis en œuvre sont aussi plus nombreux et souvent plus complexes dans le cas de l'ORC solaire, car des rudiments de thermodynamique sont requis pour le comprendre le cycle ORC et le stockage, et des connaissances en mécanique sont nécessaires pour appréhender le système de poursuite solaire. Dans le cas du système PV au contraire, tous les composants (principalement, les cellules PV, le système de contrôle, et les batteries) sont statiques et leurs rôles facilement appréhendables. Dans le cas du générateur diesel, la technologie des moteurs à combustion interne étant très répandue, il est peu probable qu'elle pose problème.

L'ORC solaire semble donc être une technologie moins accessible pour les non spécialistes. L'appropriabilité du système est réduite, même si celui-ci est plus facilement modifiable et adaptable que les autres technologies.

5.2.5. Transferts de technologie et maintenance

Dès le début du projet, l'ONG a mis l'accent sur la formation d'ingénieurs et de techniciens locaux. Ces techniciens ont participé à la construction des prototypes successifs, ont été inclus dans la définition du système et dans la résolution des problèmes. Une série de 8 à 10 cours théoriques ont également été dispensés dans des domaines comme la thermodynamiques appliquée, les circuits électriques ou l'énergie solaire.

STG dispose maintenant de deux personnes locales capables de construire les concentrateurs du début à la fin. En revanche aucun des ingénieurs locaux n'a participé à la construction du cycle ORC et des techniciens restent donc à former dans ce domaine.

Plusieurs autres techniciens locaux ont également participé à la construction des certaines parties

du système, notamment les techniciens d'"Appropriate Technology Service (ATS)" (un service gouvernemental) mis à disposition de l'ONG.

Le pari est que ces techniciens se transforment ultérieurement en entrepreneurs indépendants, capables de répliquer le système. Sur ce point, il semble que du chemin reste à parcourir. Les techniciens locaux prennent en effet régulièrement le rôle "d'employé" de l'ONG, qui est par définition subordonné à son employeur. Même s'ils participent au design du système en apportant conseils et idées, il est rare qu'ils prennent des initiatives s'éloignant de la tâche qui leur a été assignée.

Les formations prodiguées font appel à des compétences particulière, principalement en soudage et en mise à forme des matériaux (tournage et fraisage). Les connaissances acquises lors de ces formations pourront ensuite être réutilisées dans d'autres domaines, élargissant ainsi l'impact potentiel des formations.

L'une des principale difficulté rencontrée lors de la construction du prototype était l'absence d'infrastructure amont. Pour les deux premiers prototypes, STG a dû acquérir et transporter depuis Johannesburg un tour et une fraiseuse, qui ont été installés dans l'école de Bethel. Pour le troisième prototype, un tour a été acheté à Johannesburg et installé à Maseru, dans les locaux d'ATS. Ce matériel, bien que mis à la disposition des travailleurs locaux, n'a jamais été utilisé en dehors des activité de STG. Il est d'ailleurs intéressant de constater que le tour installé dans les ateliers d'ATS est resté un an sans être utilisé car personne n'avait pris la peine de réaliser les connexions électriques nécessaires. Pourtant, au dire des techniciens, ce tour pouvait leur être d'une utilité certaine dans le cadre de leur activité (principalement la réalisation de foyers métalliques efficaces). De la même manière, dans l'école de Bethel, le tour et la fraiseuse auraient pu être utilisés pour des cours de machine-outil aux étudiants, et pour fournir des services additionnels aux villages alentours, comme la réparation de pièces mécaniques, mais ça n'a pas été le cas.

L'absence d'infrastructure et de fournisseurs a constitué un frein important aux projets d'installation des prototypes successifs. On peut estimer que, pour chacun de ces projets, la moitié du temps de travail a été consacrée à des problèmes d'approvisionnement et de logistique: d'innombrables voyages ont en effet dû être réalisés vers Bloemfontein en Afrique du Sud, qui est la ville la plus proche (4 heures aller-retour) disposant de revendeurs de matériel comme des roulements mécaniques ou du matériel de réfrigération. D'autres voyages moins réguliers devaient être effectués vers Johannesburg (environ 14 heures aller-retour) pour acheter les matériaux moins courants (réflecteurs MIRO, poste à souder MIG, etc.).

En résumé, la formation des techniciens locaux est couronnée d'un succès relatif, ceux-ci ayant développé des compétences transversales et réutilisables dans les domaines de l'usinage, du soudage et de la mécanique. Il n'est cependant pas acquis que cette expérience soit suffisante pour générer spontanément de l'activité locale grâce au système proposé. L'absence d'infrastructure amont est problématique. Elle ralentit fortement les processus de montage et d'installation des prototypes et augmente substantiellement leur coût.

5.2.6. Identification des besoins

L'idée du projet vient principalement de l'expérience acquise par Matt Orosz en tant que volontaire "Peace Corp" dans les zones rurales du Lesotho de 2000 à 2002. Pendant deux ans, il a vécu au sein de la population locale, ce qui lui a permis, selon lui, d'identifier les besoins principaux des communautés villageoises, ces besoins étant l'électricité et l'eau chaude.

Si cette expérience semble solide, on peut malgré tout s'interroger dans quelle mesure ces

besoins sont perçus au travers du prisme du mode de vie occidental. Les besoins réels ne sont-ils pas réinterprétés et biaisés par notre connaissance des technologies auxquelles nous avons accès quotidiennement et qui nous paraissent "nécessaires"?

Une enquête auprès de la population n'a malheureusement pas pu être effectuée dans le cadre de ce travail, par manque de temps et à cause de la barrière de la langue. On peut cependant se fier aux résultats de Niewuenhout et al. (2001), selon lequel la majorité des 74% de la population ayant connaissance de l'existence de systèmes PV est demandeuse de tels systèmes. On peut donc s'attendre à ce qu'un système similaire, si son prix est concurrentiel et ses caractéristiques satisfaisantes, fasse aussi l'objet d'une demande importante de la part de la population locale.

5.2.7. Décentralisation

La faible densité de population, les fortes dénivellations, la consommation faible sont autant de facteurs qui plaident pour une génération décentralisée de l'électricité au Lesotho.

Comme l'a montré la section 4.1.6., les solutions décentralisées sont effectivement moins coûteuses aux kWh que l'extension du réseau. Le plan d'électrification proposé par le gouvernement du Lesotho prévoit d'ailleurs en grande partie la subsidiation de systèmes décentralisés (principalement le photovoltaïque) plutôt que l'extension du réseau (Mdee, 2010).

D'un point de vue de la sécurité d'approvisionnement, la décentralisation pourrait également constituer une solution intéressante dans le cas particulier du Lesotho. Le réseau est en effet très instable (fluctuations de tension, service intermittent), aussi bien au Lesotho qu'en Afrique du Sud (voir par exemple Bearak et Dugger, 2008), et l'on constate un nombre important d'organismes, institutions ou cliniques munis de leurs propres générateurs pour palier à ce service déficient.

D'un point de vue social, on constate actuellement un exode rural relativement fort au Lesotho, soit vers les quelques centres du pays (Maseru, Thaba-Tseka, Leribe, ...) soit vers l'Afrique du Sud (Taele, 2007). La création d'entreprises de fourniture d'énergie décentralisée peut en ce sens contribuer à créer de l'activité locale et à limiter l'exode rural.

5.2.8. Impact environnemental

Afin de comparer l'impact de diverses technologies renouvelables et non renouvelables en termes d'émissions de polluants, il est nécessaire de considérer les émissions sur l'ensemble du cycle de vie du dispositif et pas seulement lorsqu'il génère de l'électricité.

On considère par exemple généralement que les systèmes photovoltaïques possèdent un important contenu en énergie grise: pour l'Europe, la quantité de CO₂ émise lors de sa production n'est récupérée qu'après 3 ou 4 ans de fonctionnement du système.

Source	Proportion	Empreinte CO ₂ [gCO ₂ /kWh]
Charbon	94.00%	980
Nucléaire	4.30%	5
Hydro-électrique	1.50%	7
Autres	0.20%	0
Mix	100.00%	921.52

Table 10: Calcul du contenu carbone du Mix énergétique Sud Africain.
Sources des données: Surrey Heath Borough Council, 2010; IEA, 2007;
Zomers, 2001

On considère que le mix énergétique (la proportion de chaque source d'énergie primaire dans la production d'électricité) du Lesotho est similaire à celui de l'Afrique du Sud, une grande partie de l'électricité du Lesotho étant importée. Moyennant cette hypothèse, le détail du calcul du nombre de gramme de CO₂ générés par kWh électrique est présenté à la Table 10. On obtient une empreinte carbone de 921 gCO₂/kWh.

Il n'existe pas dans la littérature de calcul de l'empreinte carbone d'un ORC solaire comme celui proposé ici. Le système le plus proche pour lequel cette valeur a été calculée est la centrale solaire à concentration de grande taille (plus d'une dizaine de MWe). Ce système diffère de l'ORC solaire sur deux caractéristiques principales:

- La puissance installée de l'ORC solaire est environ 1000 fois inférieure à celle de la centrale solaire classique. Par effet d'échelle, son rendement est inférieur et son contenu carbone doit donc être supérieur. Afin de tenir compte de cet effet d'échelle, on peut supposer que l'augmentation relative de l'empreinte carbone est égale à l'augmentation relative du coût spécifique (le coût au kW installé), ce coût étant grossièrement proportionnel à la quantité de matériaux nécessaire et donc à leur empreinte carbone. On sait qu'une centrale classique possède une empreinte carbone d'environ 25 gCO₂/kWh. Le coût spécifique d'une telle centrale est typiquement de 3500 USD/kWe. Le système proposé dans ce travail possède un coût spécifique de 16500 USD/kWe. On peut donc estimer que son empreinte carbone est de 118 gCO₂/kWh
- Le fluide de travail dans le cycle thermodynamique est du R245fa au lieu de l'eau. Or, le R245fa possède un pouvoir de réchauffement global (Global Warming Potential, GWP) de 980 (cad qu'un kg de R245fa possède le même pouvoir de réchauffement global que 980 kg de CO₂ émis dans l'atmosphère). On considère que la totalité du fluide (dont la masse est estimée à 10 kg) est perdue à l'atmosphère en fin de vie du système. En supposant une production annuelle du système de 10050 kWh pendant 15 ans, on peut estimer l'empreinte carbone due au fluide de travail à 65 gCO₂/kWh.

L'estimation de l'empreinte carbone totale du système est obtenue en sommant les deux valeurs calculées plus haut, soit 183 gCO₂/kWh.

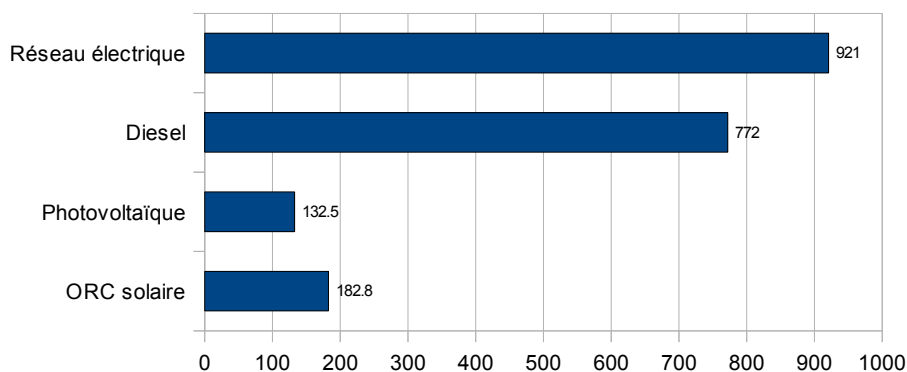


Figure 26: Contenu carbone (en gCO₂/kWh) pour plusieurs technologies

La Figure 26 montre la comparaison entre les empreintes carbone respectives des différents systèmes retenus pour la comparaison. On constate que l'empreinte au kWh de l'ORC solaire est nettement inférieure à celle du réseau électrique ou du générateur diesel, mais qu'elle reste néanmoins légèrement supérieure à celle de la technologie photovoltaïque.

La Figure 27 montre l'empreinte carbone annuelle d'un ménage utilisant ces différentes technologies. Pour la réalisation de ce graphique, on a estimé que la consommation des ménages en kWh est différente selon de le degré de décentralisation: Pour le système PV décentralisé de

40W, une consommation de 82 kWh/an est estimée; pour les systèmes mini-grid, une consommation de 200 kWh/an est estimée et pour le système centralisé (le réseau électrique), la consommation est estimée à 500 kWh/an (cfr section 5.2.1. pour la justification des valeurs sélectionnées).

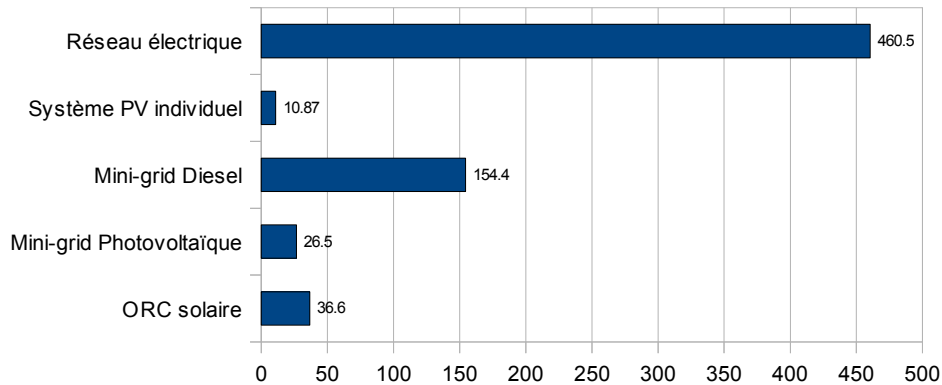


Figure 27: Emissions de CO2 d'un ménage pendant un an (en kg deCO2) pour plusieurs technologies.

Un calcul similaire est effectué pour les émissions de SO2 et NO2. Les résultats montrent qu'un kWh produit par l'ORC solaire est presque 5 fois moins émetteur de SO2 qu'un kWh électrique provenant du réseau, mais qu'il est 8.7 fois plus émetteur qu'un kWh photovoltaïque. Pour les NOx, l'ORC solaire est 4 fois moins émetteur que le réseau électrique, 12 fois moins émetteur que le générateur diesel, mais 4 fois plus émetteur que le photovoltaïque.

En conclusion, on constate que l'ORC solaire émet moins d'émissions polluantes que le générateur diesel ou le réseau électrique, mais légèrement plus que la technologie PV.

5.2.9. Mode d'introduction sur le marché

Le projet dans son état actuel étant toujours en phase de démonstration et non de diffusion/commercialisation, il a été décidé de ne pas aborder les critères relatifs à l'introduction du système sur le marché, d'une part parce que cela semble prématuré, et d'autre part à cause de la rareté des données nécessaires au traitement de ce sujet.

5.2.10. Subsidies

A l'instar du point précédent et pour les mêmes raisons, il a été décidé de ne pas aborder les critères relatifs à la subsidiation.

5.3. Résumé et application de la grille d'analyse

La Table 11 résume l'analyse effectuée à la section 5.2 pour chaque principe sélectionné. Une appréciation est attribuée au projet pour chaque principe à la lumière de la concordance de celui-ci avec les critères établis dans la grille d'analyse.

Une échelle de 5 appréciations différentes est utilisée, allant de "--", qui correspond à une non-adéquation totale du projet évalué avec les critères de succès, en passant par "+-", et jusqu'à "++" qui correspond au cas idéal de respect des critères énoncés. Bien que le projet soit évalué sur base de critères clairement définis, il est important de remarquer que cette appréciation comporte une certaine part de subjectivité qui vient principalement du poids accordé à chaque critère pour l'évaluation d'un principe.

Principe	Critères retenus	Évaluation
Coût par rapport à la concurrence technologique	Coût unitaire actualisé, Capital de départ, Externalités	-
Participation des bénéficiaires	Demande pour le produit, Identification des interlocuteurs appropriés, Inclusion dans les processus décisionnels, Autonomie vis-à-vis du pouvoir politique	-
Démonstrateurs et adoption de la technologie	Pertinence, Connaissance et persuasion, Implication locale, Evolutivité	+ -
Technologie adaptée	Fiabilité, Maturité technologique, Simplicité, Appropriabilité, Adaptabilité	-
Transferts de technologie et maintenance	Formation, Infrastructure amont, Matière premières, Création d'activité	+
Décentralisation	Situation géographique, Densité de consommation, Coût, Gouvernance	++
Identification des besoins	Consommation, Enquêtes, Evolutivité	+ -
Impact environnemental	Cycle de vie, Polluants atmosphériques, Pollutions diverses	+
Marché	Marché concurrentiel, Accès au crédit et au microcrédit, Mode d'introduction sur le marché	NE
Financement et Subsidiation	Niveau de subsidiation, Caractère ciblé, Non-gratuité, Limitation dans le temps	NE

Table 11: Évaluation et appréciation pour chaque principe
Légende: -- Non adéquation totale du projet avec les critères énoncés
- Peu d'adéquation du projet avec les critères
+ - adéquation partielle, respect de certains critères
+ bonne adéquation du projet avec les critères
++ adéquation idéale du projet avec les critères
NE: Non évalué

6. Conclusions et recommandations

L'accès à l'énergie est une préoccupation centrale dans la problématique du développement. A l'heure actuelle, un très grand nombre de personnes n'a toujours pas accès aux formes « modernes » d'énergie telles que l'électricité, le LPG ou les énergies renouvelables. La demande est majoritairement couverte par des combustibles traditionnels, qui, en plus d'être très peu efficaces, posent de graves problèmes de santé et de pollution atmosphérique.

Le lien entre quantité d'énergie et indicateurs sociaux est significatif pour la majorité des pays du globe. Il semble avéré qu'un accès accru à l'énergie puisse améliorer les conditions d'éducation, de santé ou d'environnement dans les pays en développement, et plus particulièrement dans les régions rurales.

Le lien entre consommation d'énergie et produit national brut est lui aussi significatif pour la plupart de pays, mais les études de causalités montrent qu'on ne peut pas systématiquement affirmer qu'un accès à l'énergie stimule la croissance économique. Cela est principalement vrai pour les pays en développement.

L'accès à l'énergie passe notamment par l'accès à l'électricité en zone rurale. Les différentes expériences dans ce domaine montrent que cet accès permet une élévation du niveau de vie, et a un impact positif sur plusieurs aspects de la vie sociale: le niveau de santé est amélioré; l'étude et l'éducation sont améliorées grâce à l'éclairage; les femmes passent moins de temps aux tâches ménagères et à la collecte du bois. Une électrification bien menée peut aussi avoir des effets bénéfiques sur l'environnement, en diminuant les émissions de CO₂ dues aux combustibles fossile, ou en diminuant l'impact des populations rurales sur la couverture végétale (déforestation).

En revanche, tout comme pour le lien entre énergie et PNB, les différentes études ne permettent pas d'établir un lien de cause à effet entre électrification rurale et création d'activité locale. On ne peut donc pas affirmer qu'elle soit une condition suffisante au développement économique, même si elle semble en être une condition nécessaire.

Les expériences d'une série de projets d'électrification rurale évaluées dans la revue bibliographique ont permis la définition d'une grille d'analyse, qui reprend une série de principes qui semblent importants à respecter afin de garantir le succès d'un projet d'électrification. Il est intéressant de constater que, pour la grande majorité de ces principes, peu de divergences de point de vue ont été relevées dans les différentes publications scientifiques. L'hypothèse de départ selon laquelle il est possible de définir une série de principes généraux applicables à des projets d'électrification divers et en différentes zones géographiques semble donc vérifiée. Les critères de l'introduction sur le marché et celui de la subsidiarité sont les deux seuls pour lequel il n'y avait pas de consensus.

L'application de ces principes et de ces critères au projet d'électrification des zones rurales du Lesotho de STG a permis de souligner une série de faiblesses du projet:

- Contrairement aux affirmations de l'ONG, le coût du système proposé ne semble pas être inférieur au coût des systèmes photovoltaïques
- Le système proposé comporte un grand nombre de composants, est relativement complexe et n'est pas mature technologiquement. Ces faiblesses risquent de provoquer un rejet de la technologie par la population.
- Les communautés locales ne sont pas ou peu conviées aux processus décisionnels, ce qui ne favorise pas leur adhésion au projet. En outre, les enquêtes de terrain permettant d'évaluer leur niveau de demande et d'adhésion au projet semblent lacunaires.

Parallèlement à ces faiblesses il est important de souligner le soin accordé par l'ONG à la formation de techniciens locaux. Ceux-ci ont été inclus dans le développement des prototypes successifs depuis le début du projet et ont de ce fait acquis un savoir-faire non négligeable dans ce domaine. Même s'il existe peu d'infrastructure amont, le matériel acquis par l'ONG pourra être réutilisé de façon productive par ces techniciens, même dans le cadre d'autres activités.

Notons encore que l'approche décentralisée semble être la plus appropriée pour ces régions du Lesotho. La densité de consommation y est effectivement très faible et l'extension du réseau électrique ne semble pas être une solution envisageable.

En conclusion, il semble peu probable que la technologie proposée et le projet d'électrification soient pérennes dans leur état actuel. A la lumière de l'analyse proposée dans ce travail, plusieurs recommandations peuvent être formulées en vue d'améliorer la technologie et l'approche proposées par STG International:

- Même si le développement de la technologie sur place permet d'associer des techniciens/entrepreneurs locaux, les difficultés logistiques propres au Lesotho en termes d'accès aux composants ou d'infrastructures locales rendent le développement d'un dispositif expérimental sur place relativement fastidieux. Il semblerait préférable que les dispositifs expérimentaux soient développés au sein du MIT, où la logistique et l'accès aux connaissances et infiniment plus simple. Une fois le système opérationnel et mature, son montage pourrait être répliqué sur place avec le matériel et les techniciens locaux.
- Une enquête plus poussée auprès des habitants semble nécessaire afin d'évaluer leur niveau d'adhésion potentiel à la technologie proposée. Cela pourrait permettre de ne pas reproduire les expériences malheureuses du passé, comme celle de la vandalisation du système.
- Pour que le système puisse entrer en compétition avec la technologie photovoltaïque, il est nécessaire que son coût soit inférieur ou du même ordre de grandeur, ce qui ne semble pas être le cas avec le prototype actuel. La solution la plus évidente consisterait à augmenter la puissance installée du système. En effet, les coûts de main d'œuvre pour un système de 1 kW ou pour un système de 10 kW sont presque constants, tout comme une partie des composants (par exemple le système de contrôle). Augmenter la puissance permettrait donc des économies d'échelle relativement importante pour l'ORC solaire, alors que cela n'est pas possible avec les systèmes photovoltaïques (le coût principal étant celui des cellules PV, qui est proportionnel à la puissance installée).

Dans la mesure du possible, ces recommandations seront prises en compte pour les projets futurs de l'ONG. L'objectif de proposer un système de génération d'électricité décentralisé, bon marché, et développé sur place ne doit pas être abandonné, mais il semble qu'il doive être révisé. Certains des principes initiaux, comme l'utilisation exclusive de matériaux locaux, ou la puissance inférieure à 5kW devront être revus afin que le projet puisse être adopté et répliqué.

Références

Articles scientifiques

- Able Thomas, U. (1996). "Models of renewable energy technology transfer to developing countries." *Renewable Energy* 9(1-4): 1104-1107.
- Akrich M. (1987). "Comment les innovations réussissent?", *Recherche et Technologie* 4: 26-34
- Akrich M. (1993) "Les formes de la médiation technique", *Réseaux. Communication – Technologie – Société* 11: 87 – 98
- Akrich M., Callon M., Latour B. (2002) "The Key to Success in Innovation" *International Journal of Innovation Management* 6 (2): 187-206.
- Alanne, K. and A. Saari (2006). "Distributed energy generation and sustainable development." *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 10(6): 539-558.
- Auffhammer M., Carson R.T. (2006) "Forecasting the Path of China's CO2 Emissions: Offsetting Kyoto" Department of Agricultural & Resource Economics, UCB, University of California, Berkeley
- Beresford B. (2001) "Le coût économique et social du sida" *Afrique Relance* 15: 19
- Cabraal, R. A., D. F. Barnes, et al. (2005). "Productive uses of energy for rural development." *Annual Review of Environment and Resources* 30: 117-144.
- Camblong, H., J. Sarr, et al. (2009). "Micro-grids project, Part 1: Analysis of rural electrification with high content of renewable energy sources in Senegal." *Renewable Energy* 34(10): 2141-2150.
- Chakrabarti, S. and S. Chakrabarti (2002). "Rural electrification programme with solar energy in remote region - a case study in an island." *Energy Policy* 30(1): 33-42.
- Charles E (1987) "Haiti: Against All Odds." *National Geographic*, Vol. 172, No. 5: 645-670. Photo by James Blair
- Chaurey A., K. T. (2010). "A techno-economic comparison of rural electrification based on solar home systems and PV microgrids." *Energy Policy*.
- Chontanawat, J., L. C. Hunt, et al. (2008). "Does energy consumption cause economic growth?: Evidence from a systematic study of over 100 countries." *Journal of Policy Modeling* 30(2): 209-220.
- Císcar, J.C. (1999) "Tecnología Fotovoltaica y Electrificación Rural en los Países en Vías de Desarrollo: la Dimensión Socioeconómica" IPTS, Institute for Prospective Technological Studies.
- del Río, P. and M. Burguillo (2008). "Assessing the impact of renewable energy deployment on local sustainability: Towards a theoretical framework." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12(5): 1325-1344.
- Dones R, Heck T. (2005) "LCA-based evaluation of ecological impacts and external cost of current and new electricity and heating systems" Material Research Society Fall Meeting, Symposium G: Life Cycle Analysis Tools for 'Green' Materials and Process Selection, Boston, MS.
- Fulford DJ., M. P., Gill A. (2000). "Recommendations on the use of micro-hydro power in rural development." *Journal of International Development* 12: 975-983.
- Garcia, C. (1997) "Metodología para evaluación de oferta y demanda de energía en zonas no interconectadas", Ministerio de Minas y Energía y Unidad de Planeamiento Minero Energética (UNME).

- Hardin, G. (1968) "The Tragedy of the Commons", *Science*, Vol. 162, No. 3859, pp. 1243-1248
- Hiremath, R. B., B. Kumar, et al. (2009). "Decentralised renewable energy: Scope, relevance and applications in the Indian context." *Energy for Sustainable Development* 13(1): 4-10.
- Jacobson, A. (2007). "Connective Power: Solar Electrification and Social Change in Kenya." *World Development* 35(1): 144-162.
- Jones, G. J. and G. Thompson (1996). "Renewable energy for African development." *Solar Energy* 58(1-3): 103-109.
- Kammen, D. M. and C. Kirubi (2008). "Poverty, energy, and resource use in developing countries - Focus on Africa." *Reducing the Impact of Poverty on Health and Human Development: Scientific Approaches* 1136: 348-357.
- Kanagawa, M. and T. Nakata (2007). "Analysis of the energy access improvement and its socio-economic impacts in rural areas of developing countries." *Ecological Economics* 62(2): 319-329.
- Kanagawa, M. and T. Nakata (2008). "Assessment of access to electricity and the socio-economic impacts in rural areas of developing countries." *Energy Policy* 36(6): 2016-2029.
- Karani, P. (2002). "Technology transfer to Africa : Constraints for CDM operations." *Refocus* 3(3): 20-23.
- Kirubi, C., A. Jacobson, et al. (2009). "Community-Based Electric Micro-Grids Can Contribute to Rural Development: Evidence from Kenya." *World Development* 37(7): 1208-1221.
- Krothapalli A., Greska B. (2007) "Concentrating Solar-Hydrogen Power System for Sustainable Rural Development", *Worldenergy*
- Lemort, V., S. Quoilin, et al. (2009). "Testing and modeling a scroll expander integrated into an Organic Rankine Cycle." *Applied Thermal Engineering* 29(14-15): 3094-3102.
- Lew, D. J. (2000). "Alternatives to coal and candles: wind power in China." *Energy Policy* 28(4): 271-286.
- Lorenzo, E. (1997). "Photovoltaic rural electrification." *Progress in Photovoltaics* 5(1): 3-27.
- Mallett, A. (2007). "Social acceptance of renewable energy innovations: The role of technology cooperation in urban Mexico." *Energy Policy* 35(5): 2790-2798.
- Martinot, E., A. Chaurey, et al. (2002). "Renewable energy markets in developing countries." *Annual Review of Energy and the Environment* 27: 309-348.
- Miller, D. and C. Hope (2000). "Learning to lend for off-grid solar power: policy lessons from World Bank loans to India, Indonesia, and Sri Lanka." *Energy Policy* 28(2): 87-105.
- Ministère des ressources naturelles du Lesotho (2008) "Lesotho Renewable Energy-Base rural electrification project", LREBRE, Annual Report, Maseru
- Nassen, J., J. Evertsson, et al. (2002). "Distributed power generation versus grid extension: An assessment of solar photovoltaics for rural electrification in Northern Ghana." *Progress in Photovoltaics* 10(7): 495-510.
- Nieuwenhout, F. D. J., A. van Dijk, et al. (2001). "Experience with solar home systems in developing countries: A review." *Progress in Photovoltaics* 9(6): 455-474.
- Orosz M., Mueller A., Quoilin S., and Hemond H. (2009) "Small Scale Solar ORC system for distributed power" in *Proceedings of the 2009 SolarPaces Conference*, Berlin
- Quadrelli, R. and S. Peterson (2007). "The energy-climate challenge: Recent trends in CO₂ emissions from fuel combustion." *Energy Policy* 35(11): 5938-5952.
- Quoilin S., Orosz M., and Lemort V. (2008) "Modeling and experimental investigation of an Organic Rankine cycle system using scroll expander for small scale solar applications" *Proceedings*

of the the 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Building (EUROSUN), Lisbonne

Shamannay, U (1996) "A socio-economic impact evaluation of the rural electric program in Bangladesh", REB Bangladesh, NRECA, Sheladia Ass, Dhaka

Taele, B. M., K. K. Gopinathan, et al. (2007). "The potential of renewable energy technologies for rural development in Lesotho." *Renewable Energy* 32(4): 609-622.

Wamukonya, N. (2007). "Solar home system electrification as a viable technology option for Africa's development." *Energy Policy* 35(1): 6-14.

Ying, W. Z., G. Hu, et al. (2006). "China's achievements in expanding electricity access for the poor." *Energy for Sustainable Development* 10(3): 5-16.

Zhou, A. and J. Byrne (2002). "Renewable Energy for Rural Sustainability: Lessons From China." *Bulletin of Science, Technology & Society* 22(2): 123-131.

Zilles, R., E. Lorenzo, et al. (2000). "From candles to PV electricity: A four-year experience at Iguape-Cananeia, Brazil." *Progress in Photovoltaics* 8(4): 421-434.

Livres

Barkat, A., Human Development Research Centre (Dhaka Bangladesh), et al. (2002). *Economic and social impact evaluation study of the rural electrification program in Bangladesh*. Dhaka, NRECA International, Ltd.

Barnes, D. F. (2007). *The challenge of rural electrification : strategies for developing countries*. Washington, DC, Resources for the Future : Energy Sector Management Assistance Program.

Cernea, M. M. and World Bank. (1991). *Putting people first : sociological variables in rural development*. New York, Oxford University Press.

El Bassam, N. and P. Maegaard (2004). *Integrated renewable energy for rural communities : planning guidelines, technologies, and applications*. Amsterdam ; Boston, Elsevier.

Freris, L. L. and D. G. Infield (2008). *Renewable energy in power systems*. Chichester, U.K., John Wiley & Sons.

GEF (2009). *Investing in Renewable Energy – The GEF Experience*, Washington, DC

Harbaugh, W., A. Levinson, et al. (2000). *Reexamining the empirical evidence for an environmental Kuznets curve*. Cambridge, MA., National Bureau of Economic Research.

IEA (2006) *World Energy Outlook 2006*. International Energy Agency, OECD/IEA, Paris

The Institute of Development Studies at the University of Sussex (2003). *Energy, Poverty and Gender: a Review of the Evidence and Case Studies in Rural China*, Rapport pour la Banque Mondiale, Grande Bretagne

Morris E., Chowdhary S. (2009) *Las Microfinanzas en la Expansión del Acceso a los Servicios de Energía*. Resumen de Conclusiones, CITI Fundcation & USAID, Mexico

Rogers, E. M. (1983). *Diffusion of innovations*. New York London, Free Press ; Collier Macmillan.

Schumacher, E. F. (1973). *Small is beautiful; economics as if people mattered*. New York,, Harper & Row.

United Nations. Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. (2005). *Energy services for sustainable development in rural areas in Asia and the Pacific : policy and practice*. New York, United Nations.

United Nations. Statistical Division. (2007). World statistics pocketbook. New York, United Nations: v.

Willis, H. L. and W. G. Scott (2000). Distributed power generation : planning and evaluation. New York, Marcel Dekker.

World Bank. (1996). Rural energy and development : improving energy supplies for two billion people. Washington, D.C., World Bank.

World Bank (2002). Rural Electrification and Development in the Philippines: Measuring the Social and Economic Benefits, Washington DC

World Bank. Independent Evaluation Group. (2008). The welfare impact of rural electrification : a reassessment of the costs and benefits ; an IEG impact evaluation. Washington, World Bank.

Zerriffi, H. (2007). Making Small Work: Business Models for Electrifying the World, Stanford University.

Zomers, A.N. (2001). Rural Electrification: Utilities' Chafe or Challenge, Twente University Press, Enschede, Pays-Bas

Sources Internet:

Bearak B., Dugger C., "Power Failures Outrage South Africa", New York Times, Publié le 31 Janvier 2008

Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) (2009) Mohale's Hoek district information handbook – A compilation of crucial information for the district, <http://www.gtz.de/de/dokumente/en-lesotho-mohale-hoek-info-handbook.pdf> (Consulté le 9 août 2010)

Lineo K. Mdee, Renewable Energy-based Rural Electrification in Lesotho, http://www.undp.org.ls/energy/renewable_energy.php (consulté le 15 Juillet 2010)

STG International, <http://www.stginternational.org/> (consulté le 22 Juillet 2010)

Annexe 1: Modèle d'ORC solaire

Modèle de radiation solaire

Le modèle de radiation solaire calcule la quantité de radiation directe incidente sur les réflecteurs paraboliques, avec une poursuite à un seul axe. Les variables d'entrée sont la latitude, la longitude, l'altitude, la date et l'heure. A partir de la constante solaire et des relations géométriques et trigonométriques décrivant la rotation de la terre autour du soleil, l'angle d'incidence et la masse d'air sont calculés pour chaque heure de la journée, ce qui permet d'estimer la quantité d'énergie incidente sur une journée, et par extension, sur une année.

Cette valeur doit être corrigée pour tenir compte de la couverture nuageuse. Pour ce faire, une base de donnée météorologique de la NASA (2009) est interpolée pour la location étudiée. La radiation totale est corrigée, sachant que la présence de nuages correspond à une radiation directe de 0.

Modèle du collecteur solaire

Ce module, largement inspiré de Forristall (2003), possède comme variables d'entrée les valeurs de radiation solaire calculées plus haut. Il s'agit d'un modèle 1D, discrétisé en 15 segments. Les transferts de chaleur radiatifs et convectifs sont calculés dans chaque segment, en négligeant la conductivité axiale. Les propriétés d'absorptivité (infrarouge et lumineuse), d'émissivité infrarouge, de conductivité, ainsi que les propriétés du fluide de transfert sont utilisées pour calculer les échanges entre chaque composant (fluide, tube en acier, couronne d'air, enveloppe de verre, air ambiant). Les corrélations utilisées pour le calcul de coefficients de transfert en convection sont celles utilisées par Forristal (2003).

Le module permet ainsi de calculer le rendement thermique du collecteur et la chaleur transmise au fluide de transfert.

Modèle de stockage

Les modèles proposés ci-dessus sont des modèles statiques (c-a-d valables pour des conditions de régime établi). Or, afin de modéliser le stockage et le déstockage dans le réservoir, un modèle dynamique est requis.

Cependant, afin d'éviter la connexion, généralement peu fructueuse, de modèles statiques et de modèles dynamiques, le modèle de stockage n'est pas implémenté dans le modèle global.

On suppose ici que le stockage permet d'atténuer les variations rapides des conditions de travail du système (par exemple dues au passage d'un nuage), mais qu'il n'augmente pas le temps de fonctionnement du système. Il s'agit donc d'une hypothèse conservatrice.

Modèle du cycle ORC

Le modèle du cycle ORC est très largement inspiré de celui proposé par Quoilin et al. (2010):

- L'évaporateur et le condenseur sont modélisés en 3 zones avec les corrélations de transfert de chaleur appropriées.
- Les pertes de charge sont négligées dans tous les échangeurs.
- La modélisation de l'expandeur prend en compte les pertes par inadaption et l'influence du rapport de volume interne.
- La pompe est modélisée par une efficacité constante

Il s'agit d'un modèle de dimensionnement, ce qui veut dire que l'utilisateur impose les conditions de travail (température d'évaporation, surchauffe en sortie d'évaporateur, sous-refroidissement en sortie de condenseur, nature et conditions des sources chaude et froide) et le modèle recalcule la surface d'échange nécessaire, la cylindrée de l'expandeur (sélectionnée à partir du catalogue Emerson), la cylindrée de la pompe, la vitesse des expandeurs, etc.

Références

NASA Surface Meteorology and Solar Energy <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse> Accessed 2009

Forristall, R. "Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver" NREL/TP-550-34169 October 2003

Quoilin S., Lemort V. & Lebrun J., Experimental study and modeling of an Organic Rankine Cycle using scroll expander, in « Applied Energy », Volume 87, Issue 4, April 2010, Pages 1260-1268

Annexe 2: Évaluation du coût des composants

Pour chaque composant, des corrélations de coût sont utilisées. Les corrélations proviennent soit de la littérature, soit de l'expérience acquise lors de la construction des prototypes successifs. Dans ce dernier cas, les coûts sont obtenus pour le système de référence de 3 kWe et sont mis à l'échelle afin de couvrir une large gamme de puissances.

Concentrateurs:

- **Réflecteur:** $80 \cdot A_{\text{ouverture}}$
Le coût est basé sur le prix d'achat du matériaux réfléchissant (MIRO4, acheté à Johannesburg) et de la structure métallique de support (profilés d'acier, achetés à Maseru). $A_{\text{ouverture}}$ est la surface de collecteur, projetée sur une surface perpendiculaire aux rayons du soleil. Elle est exprimée en m².
- **Collecteurs:** $69 \cdot L$
L est la longueur du collecteur, exprimée en mètres.
Basé sur le coût du tuyau d'acier galvanisé 60.3mm chez Macsteel (\$21/m) et des enveloppes de verre "OD DURAN" 80mm de chez Schott¹¹ (\$48/m).
- **Trackers:** $23.3 \cdot A_{\text{ouverture}}$
Les trackers doivent être installés à chaque rangée de collecteurs. On peut donc exprimer le coût en fonction de la surface de collecteurs. Le coût comporte les capteurs de position (*RedRok*, \$50/pièce) et les moteurs pas à pas (*Leeson 0.75 chevaux 24 VDC*, \$388/pièce)¹².
- **La pompe à glycol:** $184 \cdot \dot{W}_{\text{exp}}$
 \dot{W}_{exp} est la puissance produite par le (les) expasseur(s), exprimée en kW.
Pour un système de 3.2 kWe, le coût de la pompe (*Hypro Gear NG11V-PH*) est de 588 USD chez "Grainger"¹³. On estime en première approximation que pour des puissances supérieures, le coût varie proportionnellement à la puissance à l'arbre de l'expasseur.
- **Le moteur de pompe:** $125 \cdot \dot{W}_{\text{exp}}$
 \dot{W}_{exp} est la puissance produite par le (les) expasseur(s), exprimée en kW.
Le moteur de référence est le *LEESON 1hp 24VDC NEMA56C*, coûtant 400 USD pour le système de 3.2 kW¹².

Cycle ORC:

- **Expansieurs:** $2 \cdot (221.2 + 305372 \cdot \dot{V}_{\text{exp}})$
 \dot{V}_{exp} est le débit volumique de l'expasseur à sa vitesse nominale, en m³/s.
Il est important de noter qu'il n'existe pas actuellement d'expasseur scroll sur le marché. Dans le cadre de ce projet, les expansieurs sont obtenus en modifiant des compresseurs de réfrigération. Cette opération est relativement complexe, car elle implique l'ouverture du compresseur hermétique à l'aide d'une disqueuse, le retrait des clapets antiretour, le blocage d'une vanne de by-pass appelée "floating seal", la soudure au MIG de couronnes (bolt-it) autour des deux parties disquées, et le boulonnage des deux parties. On estime que le coût d'un expasseur obtenu par modification d'un compresseur est égal à deux fois le prix du

11 <http://www.schott.com/>

12 <http://www.mcmaster.com/>

13 <http://www.grainger.com/>

compresseur. Le prix du compresseur en fonction de sa cylindrée est obtenu à partir du catalogue Emerson¹⁴.

- **Échangeurs à plaques:** $1.27 \cdot (388 + 480 \cdot A)$
A est la surface d'échange, exprimée en m².
Le coût des échangeurs est obtenu à partir d'une publication¹⁵ traitant du coût des ORCs de petites taille
- **Condenseur à air:** $78 \cdot \dot{Q}_{cd}$
 \dot{Q}_{cd} est le flux de chaleur échangé, exprimé en watts.
La corrélation est obtenue à partir d'offres de prix obtenues chez la compagnie DCNE¹⁶
- **La pompe ORC:** $160 \cdot \dot{W}_{exp}$
 \dot{W}_{exp} est la puissance produite par le (les) expenseur(s), exprimée en kW.
Pour un système de 3.2 kWe, le coût de la pompe (Hypro Plunger, 4gpm) est de 510 USD chez "Grainger"¹⁷. On estime en première approximation que pour des puissances supérieures, le coût varie proportionnellement à la puissance à l'arbre de l'expenseur.
- **Le moteur de pompe:** $125 \cdot \dot{W}_{exp}$
 \dot{W}_{exp} est la puissance produite par le (les) expenseur(s), exprimée en kW.
Le moteur de référence est le "LEESON 1hp 24VDC NEMA56C", coûtant 400 USD pour le système de 3.2 kW¹².

Stockage:

- **Réservoir:** $250 \cdot Vol_{tank}$
 Vol_{tank} est le volume du réservoir, exprimé en m³.
Cette corrélation se base sur l'achat d'un réservoir de 2000l d'occasion pour environ 500 USD au Lesotho (ils sont très courants dans les régions rurales).
- **Quartzite:** $90 \cdot Vol_{mat}$
 Vol_{mat} est le volume de quartzite exprimé en m³. Il est obtenu par $Vol_{mat} = Vol_{tank} \cdot (1 - \epsilon)$, ϵ étant la porosité du matériau.
- **Glycol:** $60 \cdot Vol_{glycol}$
 Vol_{glycol} est le volume de glycol dans le réservoir, exprimé en m³. Il est obtenu par $Vol_{glycol} = \epsilon \cdot Vol_{tank}$
- **Isolant:** $8 \cdot A_{tank}$
 A_{tank} est la surface extérieure du réservoir, qui doit être isolée.

Divers:

Les coûts divers sont estimés par sommation de tous les coûts annexes auquel l'ONG a été confrontée lors de la commande du matériel nécessaire. Le décompte exact n'étant pas disponible,

14 <http://www.emersonclimate.com>

15 Bertrand F. Tchance, S. Quoilin, S. Declaye, G. Papadakis and V. Lemort, Economic Optimization of Small Scale Organic Rankine Cycles, in Proceedings of the 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Lausanne, 2010

16 <http://www.dene.com/>

17 <http://www.grainger.com/>

les montants annoncés sont ceux estimés par le responsable de l'ONG, Matt Orosz.

Tableau récapitulatif

Composant	Corrélation [USD]	Coût [USD]
Concentrateur solaire:		
Réflecteur	$80 \cdot A_{ouverture}$	9200
Collecteur	$69 \cdot L$	3174
Tracker	$23.3 \cdot A_{ouverture}$	2680
Pompe	$184 \cdot \dot{W}_{exp}$	868
Moteur Pompe	$125 \cdot \dot{W}_{exp}$	591
Cycle ORC:		
Expanseurs	$2 \cdot (221.2 + 305372 \cdot \dot{V}_{exp})$	11327
Échangeurs à plaque	$1.27 \cdot (388 + 480 \cdot A)$	2229
Condenseur à air	$78 \cdot \dot{Q}_{cd}$	3396
Pompe	$160 \cdot \dot{W}_{exp}$	753
Moteur pompe	$125 \cdot \dot{W}_{exp}$	591
Stockage:		
Réservoir	$250 \cdot Vol_{tank}$	565
Quartzite	$90 \cdot Vol_{mat}$	142
Glycol	$60 \cdot Vol_{glycol}$	41
Isolant	$8 \cdot A_{tank}$	78
Divers:		
Électronique de contrôle (PIC, composant, câblage, etc.)	1000	1000
Petit matériel (Capteurs, manos, batteries, structure, isolant)	3000	3000

Annexe 3: Coût du système photovoltaïque

Les coûts présentés ci-dessous sont établis sur base du prix d'achat d'un système PV de 3 kW dans une clinique rurale à Nkau. Ces coûts n'incluent pas les coûts de main-d'oeuvre pour l'installation du système.

Coût de capital (TVAC)					
Description	Vendeur	Constructeur	Coût unitaire	Nombre	Coût total
Collecteur solaire 150W (24V)	SolarDome	Sharp	6200	20.0	124000
Régulateur 40A (48V)	SolarDome	Outback	4681	2	9362
Batterie 102 Ah (12V)	Battery Center	Deltec	600	8	4800
Onduleur 2000W (48V)	SolarDome	Cotek	1500	1	1500
Cablage (collecteurs vers batteries): d	2.44 Summit		3	19.9	59.7
cablage (batteries): d=	2.44 Summit		3	7.6	22.8
Cablage (collecteurs)	Summit		2	21.5	43
Structure	Teengs				907.5
Sous-total (ZAR)					140695
Sous-total (ZAR)					19264.52218

Annexe 4: Coût et rendement des générateurs diesel

Il existe relativement peu de données concernant les générateurs diesel dans la littérature, malgré leur importante pénétration du marché en zones rurales. Afin de déterminer leur prix et leur rendement, qui sont des données nécessaires au calcul du coût du kWh, les sources suivantes sont considérées:

1. Selon le site web d'*ICM Industries*¹⁸, un générateur diesel de 5 kWe vaut 4250 ZAR. Son réservoir, d'une capacité de 25l, se vide en 9h en cas de fonctionnement à pleine charge. Connaissant la densité (0.835) et pouvoir calorifique inférieur (42 MJ/kg) du diesel, il est aisé de calculer le rendement du générateur, soit 18.5%.
2. Selon le site web *Practical Answers*¹⁹, le rendement d'un générateur diesel à pleine charge est d'environ 25%. Lorsqu'il est utilisé à un cinquième de sa capacité, ce rendement tombe à environ 10%.
3. Selon Miller (2000), les groupes électrogènes de 500W installés en Inde peuvent consommer jusqu'à 0.75l/h de diesel. Cela correspond, tout calcul fait, à un rendement de 6.8%.

En conclusion, même si les sources sont peu nombreuses et relatives à des systèmes différents, il semble que le rendement des groupes diesel varie entre 7 et 25% en fonction du régime dans lequel on se trouve. Pour le présent travail, en considérant que le générateur travaille très rarement à pleine charge, un rendement moyen de 15% est considéré comme raisonnable.

Au niveau du prix, le système de 5 kW est considéré comme équivalent à un système photovoltaïque de 3kW avec batteries en termes de puissance maximale délivrable. Un coût de 4250 ZAR est considéré, soit 581 USD.

18 <http://www.icmsa.co.za/10KVA%20petrol%20Generators.htm>

19 http://practicalaction.org/practicalanswers/product_info.php?products_id=34

Annexe 5: Coût de l'extension du réseau.

Afin d'évaluer le coût de l'extension du réseau, il est nécessaire de connaître la distance à parcourir par les lignes moyenne tension. Cette distance est évaluée à la Figure 28, à l'aide du trait rouge pour le village de Ha Teboho dans la région de "Phamong". Elle est évaluée à 35 km.

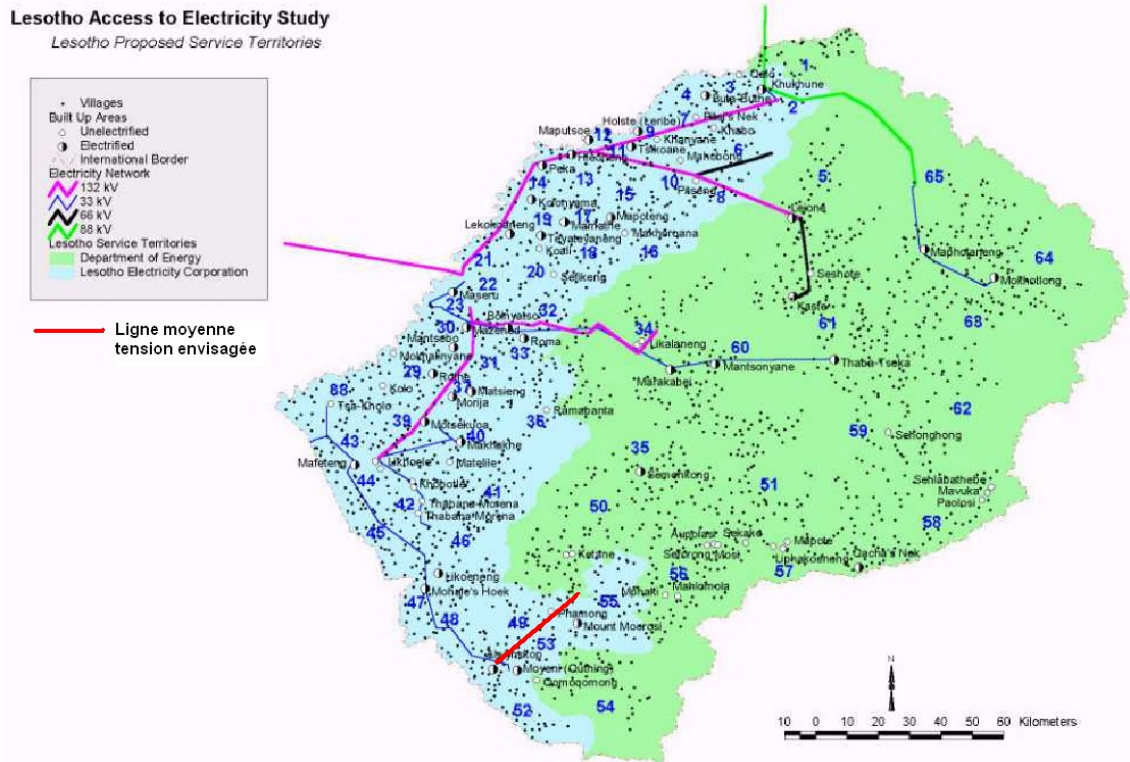


Figure 28: Electrification actuelle au Lesotho et extension envisagée