

Ressources énergétiques et solutions pour l'alimentation en électricité des populations isolées

Bernard MULTON⁽¹⁾, Gérard MOINE⁽²⁾, Judicaël AUBRY⁽¹⁾, Pierre HAESSIG⁽¹⁾, Cédric JAOUEN^(1,3),
Yaël THIAUX⁽¹⁾, Hamid BEN AHMED⁽¹⁾

⁽¹⁾ SATIE, ENS Cachan Bretagne, CNRS, UEB, av. Robert. Schuman F-35170 Bruz,

⁽²⁾ TRANSENERGIE 3D, allée Claude Debussy F-69130 Ecully

⁽³⁾ Laboratoire des Systèmes Solaires CEA-INES, 50, avenue du Lac Léman, 73377 Le Bourget du Lac

RESUME – Une proportion significative (un peu moins du quart) de la population mondiale n'a pas accès à l'électricité, un bien pourtant considéré aujourd'hui comme indispensable pour vivre décemment. Cela concerne essentiellement les populations pauvres qui n'y ont pas encore accès, mais également des populations plus aisées, trop éloignées des grands réseaux pour qu'il soit rentable de les raccorder. Ce papier propose un bilan des principales ressources disponibles pour être converties en électricité mais également une analyse des besoins énergétiques. Ensuite, sont balayées assez rapidement les différentes solutions technologiques actuellement employées (diesel, photovoltaïque et éolien autonomes, hybrides, pico-hydroélectriques...). Les aspects sociologiques, qui jouent un rôle très important dans le bon fonctionnement et dans la pérennité des systèmes, sont également évoqués car ils doivent être pris en compte par le technicien, l'ingénieur et le chercheur afin de proposer des solutions plus en adéquation avec les réalités du terrain.

ABSTRACT – A significant proportion (about a quarter) of the world's population has no access to electricity, that is, a service regarded today as being essential to have a decent life. This concerns essentially the poor populations which still lack access to electricity, but also some better-off ones, which are too far away from the major power grids so that it is not profitable to connect them. This paper provides an overview of the main resources available to be converted into electricity but also of the energy needs. Then, the various technological solutions used at present are fairly quickly analysed (diesel, photovoltaic and wind autonomous, hybrid, picohydro...). The sociological aspects, which play a very important role in the good operating and sustainability of systems, are also discussed because they should be taken into account by technicians, engineers and researchers, in order to provide solutions more in line with the reality in the field.

MOTS-CLES – Electrification des sites isolés, photovoltaïque autonome, petit éolien, petite hydraulique, groupes électrogènes, systèmes hybrides de production, tarification, maintenance, comportement du consommateur.

KEYWORDS – Electrification of remote communities, autonomous photovoltaic, small wind turbines, small hydropower, fueled engine-driven generator, hybrid energy systems, electricity pricing, maintenance, consumer behaviour.

1. Introduction

L'électricité constitue sans aucun doute le vecteur énergétique le plus performant, c'est ce qui explique son formidable développement. Au niveau mondial, la part de l'électricité dans l'énergie finale est en effet passée de 2,5% en 1940 à plus de 17% en 2008 [1] et cette progression est loin d'être terminée. L'essentiel de sa production mondiale et de sa consommation s'effectue à travers des grands réseaux plus ou moins maillés et via des outils de production relativement centralisés, même si la voie de la décentralisation est maintenant vivement engagée. Dans le passé, le développement des réseaux a généralement relevé de choix politiques d'aménagement des territoires, associés à une notion de service public prioritaire. Dans tous les pays dits développés et dans de nombreux pays en fort développement, l'électrification a été généralisée y compris pour raccorder des zones à faible densité de population et dépourvues de moyens de production. Par exemple, la quasi-totalité de la population chinoise a aujourd'hui accès à l'électricité (taux d'électrification de 99,4% en 2009, 99% en zone rurale et 100% en zone urbaine).

Cependant, depuis les années 1990, les investissements en services publics sont en recul, mais les progrès technologiques permettent désormais de proposer des solutions autonomes moins coûteuses qu'un raccordement au réseau dès que la distance dépasse un ou deux kilomètres. Cette distance dépend de divers paramètres comme l'intensité

des ressources localement disponibles et les niveaux de consommation du nouveau consommateur. C'est ainsi que, même en France métropolitaine, des sites isolés ont été électrifiés souvent en photovoltaïque plutôt que d'effectuer un raccordement jugé trop coûteux. Dans les régions dont le développement électrique a été plus tardif, les choix ont consisté à étendre les réseaux dans la limite d'une densité de population suffisante ; ailleurs (petites îles et zones reculées) des solutions autonomes, non raccordées au réseau, ont été retenues, c'est par exemple ce qu'ont fait le Maroc et la Nouvelle-Calédonie. Enfin, dernier cas de figure, celui des régions pauvres à divers degrés, dans lesquelles les investissements publics pour l'électricité sont inexistantes ou, au mieux, ne concernent que les zones urbanisées. C'est le cas, entre autres, de l'Afrique sub-saharienne, et de quelques pays d'Asie et d'Amérique latine. On y observe des phénomènes d'exode rural massif, car l'absence d'accès à l'électricité représente un facteur d'exclusion insupportable pour les populations rurales. Mais cet exode constitue lui-même un facteur d'accroissement de la misère, c'est pourquoi des programmes d'aide, financés par le PNUD (Programme des Nations Unies pour le développement), le PNUE (PNU pour l'environnement), la Banque Mondiale et des ONG, permettent la mise en place de solutions d'accès à l'électricité via des systèmes autonomes à l'échelle de villages (micro-réseaux), de petites communautés ou de foyers pour leur permettre de créer une activité économique et d'accéder à une vie plus décente.

Si le nombre d'habitants sans aucun accès à l'électricité a régressé, passant de 2 milliards (à la fin du 20^{ème} siècle) à environ 1,4 milliards aujourd'hui sur un total de 7 milliards, il reste un effort considérable à fournir. Il apparaît [2] qu'une possibilité pour accélérer le développement des populations pauvres réside dans l'installation de systèmes décentralisés. Ces petits systèmes non raccordés, pourront l'être dans le futur grâce aux possibilités des technologies actuelles telles que celles offertes par l'électronique de puissance, les grands réseaux constituant de formidables instruments de mutualisation. Mais la situation économique des régions pauvres limite souvent leur accès aux plus élémentaires de ces systèmes, ceci est d'autant plus exaspérant qu'une autre frange du monde croule sous les équipements. Citons de façon purement symbolique [2] le N^{ème} téléviseur dont s'équipent les habitants des pays riches et dont le prix est sensiblement égal à celui du kit d'électrification photovoltaïque de base qui permettrait de sortir de la précarité un foyer pauvre (plus de 200 millions de TV sont vendues annuellement dans le monde)...

La figure 1 (WEO AIE [11]) montre les valeurs des taux moyens d'électrification des pays en développement en 2009. Ces chiffres cachent d'importantes dispersions au sein des pays représentés. En effet, ce sont surtout les zones rurales qui sont les plus touchées (environ 1,2 milliards d'habitants ruraux sur un total de 1,4 n'ayant aucun accès à l'électricité). En 2005 [3], le taux moyen d'électrification des zones urbaines, au niveau mondial, atteignait 74% (contre 58% en 2000) alors que celui des zones rurales n'est que de 14,2% (contre 8,6% en 2000).

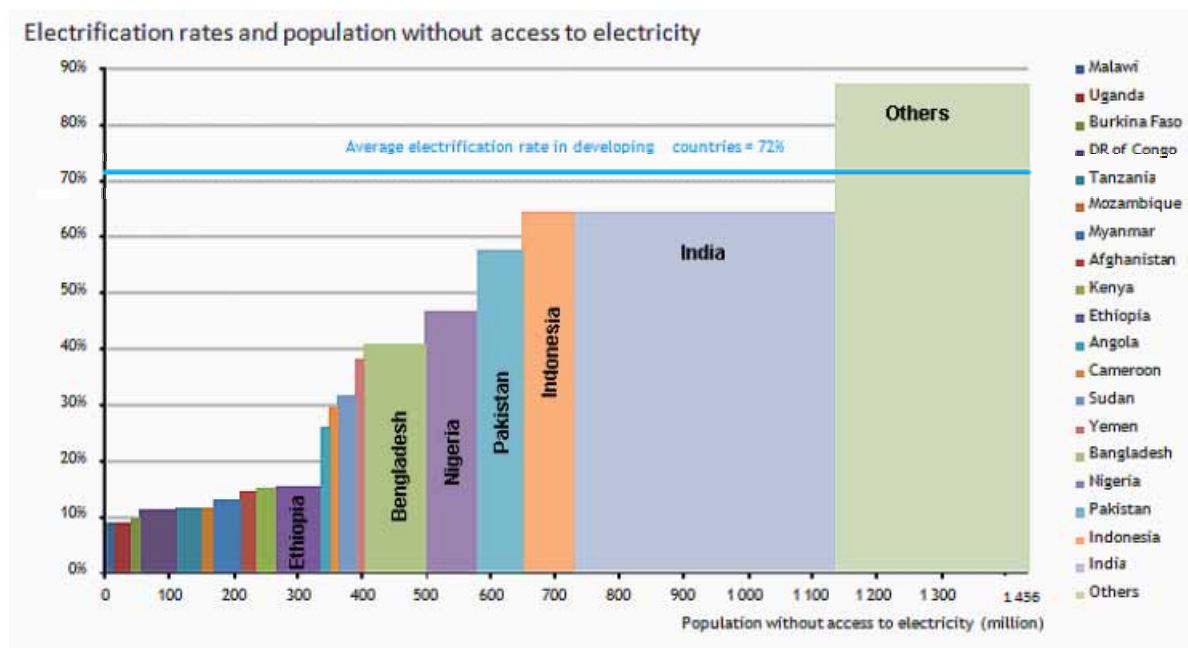


Figure 1 : Taux d'électrification moyen des pays en développement dans le monde (Source : WEO [11]) (la largeur des rectangles correspond au nombre d'habitants sans électricité du pays considéré)

Différentes études ont mis en évidence la relation entre l'Indice de Développement Humain (IDH) et la consommation moyenne par habitant (moyenne qui masque, là aussi, de grandes disparités entre populations rurales et urbaines). L'IDH est un indicateur, complémentaire du PIB, utilisé par l'ONU (PNUD) pour évaluer le niveau de développement humain, il prend en compte l'espérance de vie, l'éducation et le niveau de vie des populations. La figure 2 [5] montre cette relation entre IDH et consommation d'électricité. On peut ainsi constater à quel point les premiers kWh semblent importants pour faire décoller l'IDH. Un premier seuil apparaît aux environs de 2000 kWh par an et par habitant, il est associé à un IDH de plus de 0,8, l'asymptote de 0,95 étant atteinte avec des consommations de l'ordre de 5000 kWh/an. Il faut cependant noter que le niveau de richesse, lui-même corrélé à l'IDH, joue un rôle important dans la possibilité de

consommer (et de gaspiller ?) beaucoup d'électricité. A noter aussi que ces valeurs correspondent à l'ensemble des usages électriques des nations considérées et non aux seules consommations domestiques.

Quoi qu'il en soit, il est probablement vrai qu'atteindre un IDH élevé (supérieur à 0,9) nécessite un minimum d'électricité, minimum dont la valeur est sans doute à la fois subjective et difficile à déterminer, notamment si l'on considère les consommations industrielles. Sachant en outre que l'efficacité énergétique et la sobriété pourraient faire diminuer la consommation électrique mais qu'à l'opposé le déplacement vers l'électricité d'usages habituellement satisfaits par d'autres formes d'énergie finale pourrait conduire à leur accroissement.

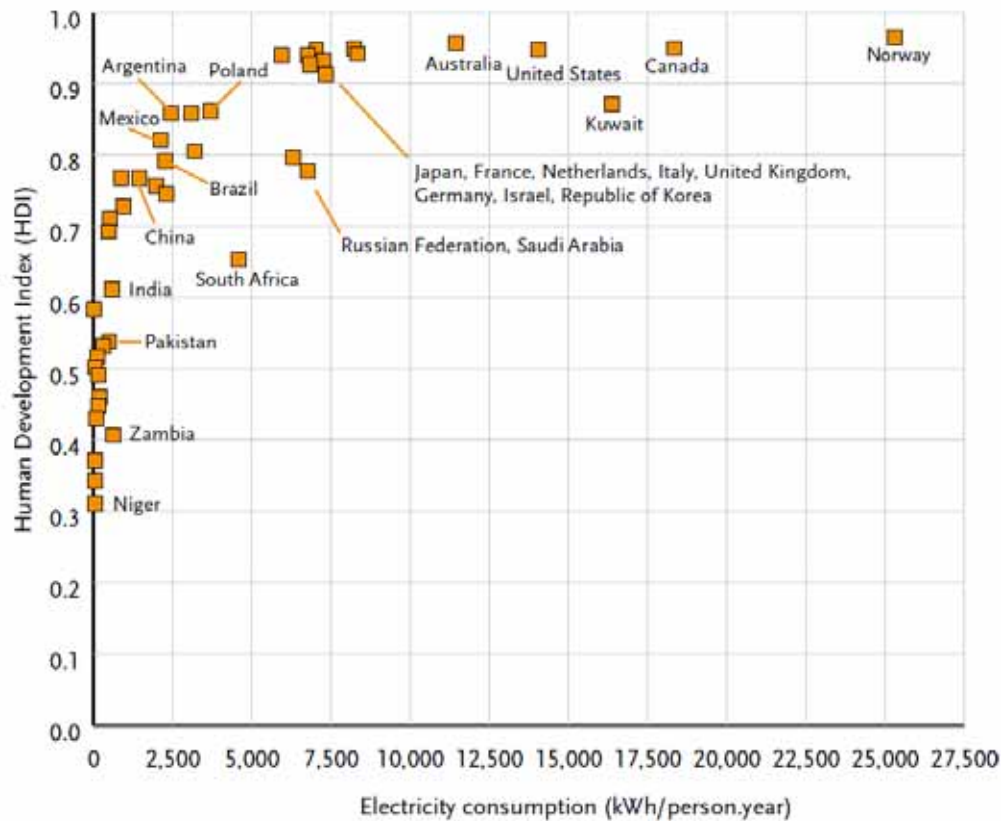


Figure 2 : Indice de développement humain en fonction de la consommation annuelle d'électricité (2003-2004) [5]

Il est aujourd'hui largement reconnu que, pour les populations les plus pauvres, accéder à l'électricité permet d'améliorer très sensiblement la vie quotidienne [9], en particulier celle des femmes souvent totalement saturées de tâches harassantes (piler le mil, ramener de l'eau, du bois...). L'accès à l'énergie, notamment électrique, leur permet ensuite de consacrer plus de temps à l'éducation de leurs enfants. L'électricité contribue également à une meilleure santé via la conservation des vaccins et, dans les cas les plus favorables, des aliments. L'accès à l'éducation est également facilité, par exemple l'éclairage des salles de cours permet aux adultes de suivre des cours du soir d'alphabétisation. Enfin, l'électricité favorise le développement de l'économie locale et l'amélioration des conditions de vie des populations, tout particulièrement en zone rurale, en leur évitant de s'exiler dans les villes pour chercher un emploi.

2. Ressources énergétiques et besoins

2.1 Ressources

Rappelons que les ressources renouvelables représentent un gisement considérable [1], soit plus de 8000 fois la consommation mondiale d'énergie primaire. Actuellement, plus de 80% de l'énergie finale mondiale est encore d'origine non renouvelable. Quant à l'électricité, représentant elle-même environ 17% de l'énergie finale, elle est également à plus de 80% d'origine non renouvelable. Mais l'électricité est la forme finale d'énergie la plus aisément convertible à partir des renouvelables, c'est ce qui explique également l'accroissement de la part de ce mode de production.

Les ressources majeures sont le soleil, l'hydraulique et le vent et leur disponibilité dépend fortement des caractéristiques locales. Le soleil est quasiment disponible dans toutes les zones habitées, avec des gisements souvent élevés dans les régions les plus pauvres où les niveaux de rayonnement annuels atteignent aisément 2000 kWh/m². Quant aux ressources hydraulique et éolienne, elles sont plus inégalement réparties, mais peuvent offrir des modes de productions tout à fait intéressants.

L'intermittence du rayonnement solaire et du vent nécessite de faire appel soit à une hybridation avec un groupe électrogène (exploitation d'un stock non réversible de carburant), soit à un stockage électrique réversible, soit les deux à la fois. Typiquement, un système photovoltaïque installé en zone tropicale reçoit un rayonnement annuel de l'ordre de 2000 kWh/m² avec une faible variabilité saisonnière, ce qui conduit avec les technologies photovoltaïques courantes (silicium polycristallin), à une productivité quotidienne effective d'environ 4 kWh/kW_c installé et environ 400 Wh/m² de cellules. Sous les latitudes tempérées, telles qu'en France métropolitaine, le rayonnement annuel est plus faible (de l'ordre de 1000 kWh/m²) et surtout la variabilité saisonnière est plus forte. Le dimensionnement doit alors considérer le besoin, par exemple s'il s'agit d'usages hivernaux ou estivaux. Les pires des cas sont rencontrés en hiver où la productivité est la plus faible (de l'ordre de 100 à 150 Wh/m² utiles), elle peut même être nulle au-delà du cercle polaire.

Quant au petit éolien, il peut être pertinent lorsque les vents sont suffisamment intenses (vitesse moyenne supérieure à 5 m/s) et qu'ils sont disponibles toute l'année ou alors lorsqu'il y a une bonne complémentarité saisonnière avec l'ensoleillement comme c'est le cas de certaines îles aux latitudes tempérées. Dans ce dernier cas, l'hybridation solaire/éolien peut conduire à un coût global plus faible par rapport à une solution mono-source. La productivité quotidienne moyenne des éoliennes peut atteindre 5 à 8 kWh/kW installés.

L'hydroélectricité nécessite des cours d'eau ayant des débits suffisamment réguliers, ce que l'on trouve dans les régions intertropicales où il pleut régulièrement. C'est une solution, qui moyennant une régulation de la puissance, permet de se passer de stockage. Le rendement des petites installations hydroélectriques dépend fortement de la technologie utilisée. Un barrage avec retenue et canalisation forcée permet d'obtenir un rendement de l'ordre de 50% pour des puissances de l'ordre du kW mais certaines turbines en courant libre et dont la position de l'axe est mal optimisée ont des rendements beaucoup plus faibles, ce qui n'est pas nécessairement un problème lorsque la ressource est renouvelable et abondante. On rappelle que la puissance hydraulique brute de l'écoulement s'exprime par la formule :

$P_h = \rho \cdot g \cdot h \cdot d$, où ρ est la masse volumique de l'eau (1000 kg/m³), g l'accélération de la pesanteur, h la hauteur de chute et d le débit en m³/s.

De façon un peu plus anecdotique et à condition que cela ne se fasse pas aux dépens de la production de nourriture, des biocarburants locaux, comme l'huile de coprah (albumen séché de la noix de coco) ou de palme, peuvent servir à alimenter des groupes électrogènes diesel. La productivité annuelle est élevée en zone tropicale, de l'ordre de 2 (pour l'huile de coprah) à 3,5 tonnes par hectare (pour l'huile de palme, exploitation non intensive). Avec une valeur énergétique PCI (pouvoir calorifique inférieur) d'environ 10 kWh/kg et un rendement de conversion sur cycle de 25% (groupe électrogène), un hectare peut donner 5 à 8000 kWh électriques soit approximativement la consommation électrique annuelle (tous usages confondus) d'un occidental. Mais cette même superficie peut nourrir environ 2 à 6 personnes selon la productivité des sols... Le biogaz obtenu à partir de la méthanisation de déchets peut également constituer une ressource appréciable. Fin 2009, plus de 200 MW d'installations non raccordées au réseau étaient exploitées en Inde [6].

La traction animale peut également permettre de générer de l'électricité. Ainsi, le « bœuf qui tourne » est une solution mise au point par RFI Planète Radio [4] pour alimenter ses stations d'émission de radio dans certains pays d'Afrique (République Démocratique du Congo, République Centrafricaine...). Il s'agit d'un manège, comme il en existe pour pomper l'eau. Deux bœufs entraînent une génératrice via un multiplicateur de vitesse qui permet de délivrer un peu moins de 1 kW utiles. Mais il faut des animaux disponibles et bien nourris et la durée de travail à ce niveau de puissance peut difficilement dépasser 2 heures consécutives. La chaîne de conversion (rustique et peu coûteuse) est composée d'un multiplicateur (environ 1,5 tr/min pour le manège) dont le rapport est adapté aux animaux, d'un alternateur associé à un redresseur à diodes, d'une batterie de 24 V en tampon (pour lisser les fluctuations de puissance mécanique) et d'un onduleur. Le rendement global de la chaîne vaut environ 50% à la puissance de 800 W [7].



Figure 3 : Le traditionnel groupe électrogène [6] et le générateur « bœuf qui tourne » [4]

Dans les sites isolés, la solution la plus « simple » est d'exploiter un groupe électrogène alimenté à partir de combustibles fossiles, généralement du fioul. Mais on peut avoir des difficultés à obtenir du carburant et les coûts de fonctionnement se révèlent élevés. A titre d'exemple, avec un rendement de l'ordre de 33%, et un litre à 1 €, le kWh électrique coûte, rien qu'en carburant, 30 c€. Ces coûts peuvent même devenir prohibitifs si le carburant doit être acheminé par hélicoptère ou par avion (situation rencontrée en zone isolée riche). Exploiter des ressources locales renouvelables pour la production d'électricité permet une plus grande sécurité et une réduction de la vulnérabilité aux variations des prix du fioul ou de gaz liquéfié, seuls combustibles fossiles aisément transportables.

2.2 Besoins énergétiques électriques

Tout électricien comprendra sans difficultés que les besoins se quantifient en énergie qu'il faut produire à partir de ressources, et en puissance que l'installation doit être capable de délivrer en instantané. La présence d'un dispositif de stockage permet en particulier de découpler la puissance du système de production de la puissance totale consommée.

Ces besoins sont extrêmement variables en fonction du niveau de vie et de richesse, des conditions climatiques mais aussi en fonction de la disponibilité de la ressource car il faut parfois faire avec ce que l'on a quand la ressource apparaît belle et bien limitée au consommateur. Une spécificité majeure des populations isolées, qu'elles soient riches ou pauvres, est qu'elles sont normalement plus concernées par les contraintes de production et que l'existence de limites leur est plus familière que dans le cas de l'alimentation par des réseaux, dits de puissance infinie ! Tous usages confondus, les moyennes quotidiennes nationales par habitant varient de 85 kWh pour l'Islande à environ 0,025 kWh pour le Tchad, en passant par des valeurs telles que 20 kWh (France), 15 kWh (Union Européenne), 2,3 kWh (Algérie), 0,39 kWh (Nigéria), 0,13 kWh (Niger)...

La part de la consommation pour les usages domestiques est plus difficile à estimer et varie ici encore beaucoup en fonction des modes de vie. On peut remarquer toutefois que, malgré un accroissement de l'efficacité énergétique des appareils électriques, les consommations continuent en moyenne à croître ou au mieux se stabilisent (« effet rebond¹ »).

Dans le cas des pays pauvres, les besoins essentiels concernent l'éclairage, les divertissements (TV, radio-cassette, DVD, voire PC...), la réfrigération souvent collective (médicaments), le pompage de l'eau (collectif), la recharge de téléphones mobiles, mais également des appareils qui permettent de générer une activité économique (machines à coudre, outillage, petites machines-outils...). Les besoins de la population du Kenya, où le taux d'électrification est de 14%, ont été évalués en 2009 par Parshall, et al [10]. Les auteurs différencient les besoins pour les habitations des besoins collectifs et prennent en compte le niveau de pauvreté ainsi que la densité de population (voir tableau 1).

Tableau 1. Classification pour la demande en énergie électrique d'un pays peu électrifié, le Kenya [10]

Catégories	Densité population (hab/km ²)	Taux de pauvreté ² (%)	Demande pour l'habitat (kWh/foyer/jour)	Demande activités annexes (pompage, commerces...) (kWh/ foyer /jour)
Pauvres, faible densité	< 256	> 54	1	0,14
Non pauvres, faible densité	< 256	< 54	1,6	0,28
Pauvres, forte densité	> 256	> 54	1	0,21
Non pauvres, forte densité	> 256	< 54	5	0,93

La variabilité des profils temporels de consommation joue un rôle très important sur le dimensionnement des systèmes et sur leur efficacité énergétique. Par exemple, une consommation d'énergie essentiellement *nocturne*, nécessite un stockage plus important, et dans le cas de l'utilisation d'un groupe électrogène, les fonctionnements à faible charge s'accompagnent de mauvais rendements. Les profils sont évidemment très variés en fonction des situations. Le tableau 2 (source Transénergie [12]) donne un exemple de profils que l'on retrouve fréquemment dans les projets d'électrification villageoise. Les valeurs présentées sont des pourcentages, en moyennes horaires, de la consommation énergétique quotidienne de chaque catégorie de charges. Par exemple, le poste « éclairage habitat » consomme entre 19h et 20h 20% de l'énergie journalière associée à ce poste. Pour obtenir des profils en puissance moyenne horaire, il reste à pondérer par les valeurs de la consommation cumulée quotidienne des équipements utilisés.

Pour les « riches », en situation isolée, qui ont les moyens d'avoir un mode de vie similaire aux habitants raccordés au réseau, leur consommation dépend fortement de leur implication dans le financement du système complet et des coûts de fonctionnement. Si l'électricité leur est vendue au tarif réseau (ce qui est le cas en France), le risque est élevé pour qu'il y ait un dérapage des consommations. A l'inverse, la prise en compte d'un tarif plus réaliste correspondant à l'optimum économique du système, incluant appareils de production et de consommation, conduit à optimiser les

¹ Wikipedia : les économies d'énergie ou de ressources initialement prévues par l'utilisation d'une nouvelle technologie sont partiellement ou complètement compensées suite à une adaptation du comportement de la société.

² Le taux de pauvreté correspond à la proportion de la population vivant en dessous du seuil de pauvreté.

usages électriques et à adopter des produits avec les classes énergétiques les plus performantes. L'eau chaude sanitaire, incluant le lave-linge et le lave-vaisselle doit alors être produite, sauf exception, par d'autres moyens, par exemple un chauffe-eau solaire, voire des combustibles. On peut également employer des lave-linge à eau froide.

Tableau 2. Profils typiques détaillés (en % de chaque catégorie) de la consommation quotidienne des principales charges que l'on retrouve fréquemment dans les projets d'électrification villageoise (Transénergie [12])

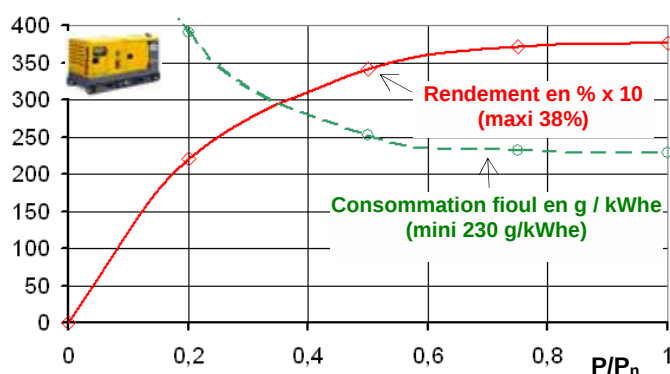
Heures	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
Eclairage Habitation	1	0,5	0,5	0,5	0,5	1	2	3	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	10	15	20	20	16	3
TV Radio Habitation	0	0	0	0	0	0	0	3	3	3	2	2	8	8	2	2	2	2	6	14	15	15	10	3
Ventilation Habitation	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	5	5	3	3	3	7	10	12	12	12	12	12
Appareils Ménagers Habitation	0	0	0	0	0	0	0	0	3	6	10	10	11	11	10	10	10	10	6	3	0	0	0	0
Eclairage Ecole	0	0	0	0	0	0	0	0	6	11	11	11	11	11	11	11	11	6	0	0	0	0	0	0
TV Radio Ecole	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,66	16,66	16,66	16,66	0	0	16,66	16,66	16,66	0	0	0	0	0	0
Eclairage Artisanat	0	0	0	0	0	0	33,33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33,33	33,33	0	0	0	0
Equipeement Artisanat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Eclairage Commerce	0	0	0	0	0	0	0	2	11	11	11	11	3	3	11	11	11	11	2	2	0	0	0	0
TV Radio Commerce	0	0	0	0	0	0	0	12,5	12,5	12,5	12,5	12,5	0	0	12,5	12,5	12,5	12,5	0	0	0	0	0	0
Ventilation Commerce	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16,66	16,66	0	0	16,66	16,66	16,66	16,66	0	0	0	0	0	0
Eclairage Bar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	4	4	2	2	4	2	13	13	13	13	13	13
TV Radio Bar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4	4	4	4	4	6	10	13	13	13	13
Ventilation Bar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6	6	6	6	6	11,5	11,5	11,5	11,5	6	6
CULTE	1	1	1	1	1	1	1	5	5	10	10	10	10	5	5	5	5	5	5	5	5	1	1	1
SANTE	6	6	6	6	6	6	6	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	6	6	6	6	6	6
Eclairage Publique	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69	7,69
POMPE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	14	16	16	16	14	12	0	0	0	0	0	0	0	0
FROID	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166	4,166

Enfin, l'énergie peut-être consommée en courant alternatif (AC) ou en continu (DC) ce qui peut simplifier la chaîne de conversion dans les installations autonomes fonctionnant à partir du soleil ou du vent. La plupart des appareils électriques modernes (éclairage à alimentation électronique : décharge, leds, appareils électroniques...) sont susceptibles de fonctionner en courant continu mais l'offre du marché est relativement réduite et leur prix élevé surtout pour ceux qui ont des performances énergétiques élevées (réfrigérateurs DC, éclairage à leds,...). Ajouté au fait que les onduleurs, bénéficiant du vaste marché des applications connectées au réseau, voient leurs prix fortement baisser et leurs performances (rendement et durée de vie) s'améliorer, la tendance est plutôt à une expansion de la consommation en AC. Nous reviendrons sur ce point important dans la dernière partie.

3. Solutions de conversion, exemples

3.1 Groupes électrogènes

Qu'il fonctionne au gasoil ou à base biodiesel local, un groupe électrogène a un rendement qui dépend de son régime de charge. Dans la zone optimale de rendement (au voisinage de la puissance nominale : typiquement entre 70 et 100% de P_n), on atteint des valeurs comprises entre 25% et 38%, valeurs d'autant plus élevées que le moteur est perfectionné. Les moteurs les plus performants à injection directe haute pression sont actuellement mal adaptés aux huiles biodiesel de fabrication artisanale et sont coûteux. Ainsi les consommations au régime nominal s'échelonnent entre 190 g/kWh pour les plus puissantes et les plus performants à 290 g/kWh pour les plus médiocres. La figure 4 montre les courbes de consommation spécifique (en grammes de fioul par kWh_e) et de rendement d'un groupe électrogène diesel performant (injection directe, turbocompressé, contrôle électronique, rendement maxi 38%) ainsi qu'un tableau de caractéristiques génériques (très approximatives) des groupes de production électrique à moteur diesel. On remarquera la dégradation du rendement à faible taux de charge (en dessous de 40% de la puissance nominale) et l'envolée des consommations spécifiques correspondantes. En petite puissance, les générateurs sont monophasés et en forte puissance (typiquement au-delà de 20 à 30 kVA) ils sont triphasés.



Données générales groupes électrogènes diesel	
Coût investissement	≈ 0,7 €/W
Génie civil	≈ 1 €/W
Réservoir	≈ 1 €/W ?
Consommation fioul (selon rendement)	190 à 290 g/kWh
Durée de vie (avec entretien sérieux)	20 000 heures
Période maintenance (vidange, filtres...)	250 à 300 h
Pénalité d'usure des démarrages	10 h ou plus (selon température)

Figure 4 : Caractéristiques (rendement et consommation en fonction du taux de charge) d'un groupe électrogène diesel SDMO QAS 40 KD (32,9 kW / 40 kVA) et tableau de données générales approximatives concernant les groupes diesel

De façon simplifiée, la consommation (en kg/h) d'un groupe électrogène à moteur diesel fonctionnant à vitesse constante peut être modélisée par une loi affine (ce que l'on peut constater sur la figure 4) :

$C \cong P_n (C_0 + K.P/P_n)$ où C_0 est un paramètre de consommation à vide/W fonction de la vitesse de rotation et de la cylindrée, et P_n la puissance électrique nominale du dispositif.

Avec un gasoil de qualité standard (11,6 kWh_{PCI}/kg), une consommation de 1 kg/h correspond à une puissance thermique (PCI) de 11,6 kW. Aux prix actuels du gasoil, notamment dans les zones reculées, la production d'électricité par groupe électrogène coûte très cher en fonctionnement, son seul intérêt réside dans le bas coût d'investissement.

Compte tenu des mauvais rendements à faible charge des moteurs diesel et, in fine, du générateur complet, les rendements sur cycle se révèlent faibles dans les cas classiques de consommation villageoise (fortes variations de la consommation). Ajouter un système de stockage constitue une voie d'amélioration en permettant au groupe électrogène de ne fonctionner que quelques heures par jour, à la pleine puissance, ce qui permet par ailleurs de réduire les nuisances sonores.

3.2 Systèmes photovoltaïques et éoliens autonomes

Les systèmes photovoltaïques [13] autonomes sont maintenant bien connus et bénéficient d'un retour d'exploitation de plusieurs décennies. Ils sont très bien adaptés aux petites installations individuelles. En 2008, environ 220 MW_c³ étaient installés dans le monde et, selon une étude limitée à 10 pays en développement, plus de 2 millions de foyers étaient équipés [6] comme le montre la figure 5. Les technologies les plus couramment utilisées sont, pour les modules PV, le silicium polycristallin, et l'amorphe (le silicium monocristallin étant plus cher pour un faible gain de superficie de captation) et le plomb-acide pour le stockage. Les batteries au plomb qui offrent la plus longue durée de vie sont celles de type *ouvert*, mais elles nécessitent un entretien régulier pour la mise à niveau de l'électrolyte (période de 3 à 6 mois environ en zone tropicale). Si le dimensionnement est bien fait et qu'elles ne sont pas en situation de décharge profonde trop fréquente, leur durée de vie peut atteindre la dizaine d'années sans difficultés. A l'opposé, l'utilisation de batteries de démarrage (moindre coût d'investissement) mal entretenues, peut conduire à une durée de vie de l'ordre de l'année.

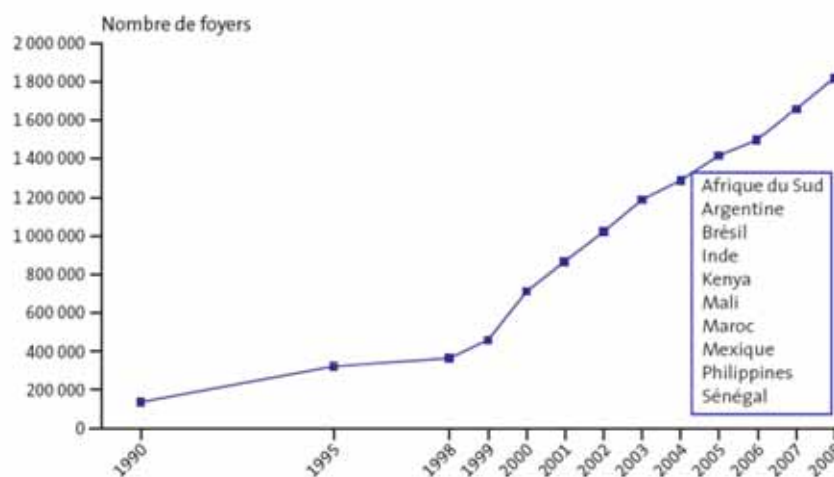


Figure 5 : Evolution du nombre de foyers équipés en systèmes PV autonomes dans 10 pays [6]

Le dimensionnement (puissance installée) des modules PV est fondé sur les besoins énergétiques durant la saison de plus faible irradiation solaire. Les batteries électrochimiques sont quant à elles dimensionnées sur la base du nombre maximal probable de journées consécutives sans rayonnement solaire. La recette usuelle conduit à considérer une capacité de stockage de 3 à 5 fois la consommation quotidienne (pour les régions fortement ensoleillées). Un régulateur de charge (convertisseur DC-DC PWM, éventuellement à contrôle MPPT) permet de protéger la batterie contre les surcharges et les décharges profondes en délestant la production ou la consommation (coupure d'alimentation du consommateur). Un onduleur est nécessaire si une distribution en AC est requise.

Le coût de ces installations, à des niveaux de puissance de l'ordre de la centaine de watts (fréquemment 75 W), est d'environ 12 €/W (fourchette de 5 à 30) dont environ la moitié pour le générateur PV (incluant son installation), un quart pour les batteries et un quart pour les équipements électriques incluant les appareils d'éclairage. Les coûts élevés s'expliquent notamment par le transport du matériel et la contribution de techniciens non locaux.

La Nouvelle-Calédonie, dont les habitants ont un niveau de vie élevé, a choisi de déployer largement son réseau sauf dans les zones trop isolées où l'opérateur Enercal gère environ 3000 systèmes PV autonomes avec distribution en 24 V-DC (Congélateur 750 Wh/j à 32°C, réfrigérateur 400 Wh/j à 32°C, 13 lampes fluocompactes 13 W) et en 230 V-50 Hz AC (audio-visuel, PC...) via un onduleur de 600 VA à 2 kVA. La puissance crête du générateur PV vaut 800 W à 1 kW

³ A noter qu'à la fin de 2008, ce sont plus de 15 GW_c PV qui étaient raccordés aux réseaux des pays développés.

et la capacité de stockage dans les batteries au plomb ouvertes vaut 16,8 kWh (durée de vie constatée 9 à 12 ans). Le coût d'investissement de ces installations relativement haut de gamme est compris entre 16 et 18 €/W_c. L'électricité est facturée au consommateur comme s'il était raccordé au réseau, cependant une *limite de consommation quotidienne* est imposée au niveau du compteur et au-delà de laquelle il y a disjonction comme en cas de dépassement de puissance.

Quant aux systèmes éoliens, ils sont fondés sur la même architecture générale que les systèmes PV, à ceci près que la turbine éolienne nécessite des protections spécifiques contre l'emballement en cas de défaut. La solution de chaîne de conversion aujourd'hui la plus répandue en petite puissance est constituée d'une génératrice à aimants entraînée directement par la turbine et débitant directement sur le bus DC via un pont de diodes [14]. Les inductances du bobinage d'induit, qui sont normalement relativement élevées, autorisent une protection par mise en court circuit directe en amont du pont de diodes en cas de défaut. Les petites éoliennes disponibles sur le marché sont chères et leur installation est également plus délicate (mât, haubans...) que celle de panneaux PV, c'est la raison pour laquelle, dans les régions pauvres, des solutions artisanales sont réalisées (pales en bois, génératrice fabriquée avec les moyens locaux...) [6]. La figure 6 montre quelques étapes de la fabrication locale (Nicaragua) d'une éolienne de 1 kW (turbine de 3,6 m de diamètre et génératrice discoïde à aimants). Notons que les structures à bobinage dans l'air ne présentent peut-être pas des inductances suffisantes pour obtenir le fonctionnement décrit précédemment (nous n'avons pas connaissance de résultats expérimentaux).



Figure 6 : Fabrication d'une éolienne artisanale au Nicaragua (blueEnergy, extrait du diaporama du master OSE [6])

3.3 Systèmes hybrides (diesel/PV/éoliens)

Au-delà d'une certaine puissance, l'hybridation constitue une solution généralement optimale du point de vue économique, elle est plus particulièrement indiquée pour les mini-réseaux. Le choix du solaire PV ou/et de l'éolien en complément du groupe électrogène dépend des conditions météorologiques locales.

Le tableau 3 (Transénergie [12]) montre quelques exemples de dimensionnement de systèmes hybrides diesel-PV.

Tableau 3. Exemples de caractéristiques de systèmes hybrides groupe électrogène - PV (données Transénergie [12])

Puissance de l'onduleur	Puissance champ PV	Parc batterie		Chargeur	Groupe électrogène	Application	Energie journalière
		Tension nominale	Capacité batterie à C10				
5 kVA	3,7 kWc	120 V	250 Ah		12 kVA monophasé	Clinique, Tanzanie	
9 kVA	9 kWc	48 V	2240 Ah	6 kW 120 A	15 kVA monophasé	Petit village, Madagascar	30 à 50 kWh
15 kVA	15 kWc	120 V	1245 Ah	9 kW 75 A	20 kVA triphasé	Collège, République Dominicaine	50 à 75 kWh
	19 kWc	240 V	950 Ah		25 kVA triphasé	Petite île, Maldives	85 kWh
30 kVA	30 kWc	240 V	1245 Ah	24 kW 100 A	40 kVA triphasé	Village moyen, Indonésie	100 à 150 kWh
	20 kWc	240 V	1050 Ah		43 kVA triphasé	Île moyenne, Maldives	115 kWh
50 kVA	45 kWc	240 V	1560 Ah	36 kW 150 A	80 kVA triphasé	Grand Village, Guyane	150 à 225 kWh

Une étude menée par le NREL (National Renewable Energy Laboratory) [8] met en évidence la pertinence de l'hybridation diesel/PV et batteries au-delà d'une certaine consommation, ici de 4 kWh/jour sur un exemple particulier (voir figure 7a) avec du fioul à 0,5 \$/litre et une consommation de 0,3 L/kWh (la seule part du carburant représente 0,15 \$/kWh) et une irradiation solaire de 5,4 kWh/jour. Le système diesel avec batteries (pour assurer un fonctionnement 100% du temps avec un temps de fonctionnement du diesel à son rendement optimal et sur une durée limitée) offre un coût de l'énergie toujours supérieur au système hybride diesel-PV+batteries. Plus le prix du fioul est élevé plus le seuil de rentabilité du système hybride est bas et il existe même un prix du carburant au-delà duquel le système PV autonome offre toujours le meilleur prix de revient de l'électricité fournie quel que soit le besoin.

La figure 7b montre le synoptique [15] de l'installation hybride diesel/PV/éolienne de l'île de Saint Nicolas des Glénan datant de 1996 (en « zone riche »). Le bus DC est à 240 V, l'installation de pompage d'eau gérée par la mairie fonctionne en triphasé mais toute la distribution des 14 clients particuliers et 6 professionnels est en monophasé. Une rénovation en 2003 a quelque peu modifié les caractéristiques (15,2 kW PV, batteries 1200 Ah), et l'architecture de l'installation gérée par ERDF⁴. Le financement a été assuré par les collectivités territoriales et par EDF (30%) qui effectue également la maintenance. Les clients, de type professionnel (tourisme été) et particulier, bénéficient des tarifs continentaux de l'électricité avec une limitation de la puissance souscrite. Seuls, les clients particuliers ont également une limitation en énergie journalière ce qui conduit les professionnels à des consommations excessives en période de forte activité (consommation proche de la puissance souscrite en continu, avec des appareils parfois très énergivores...).

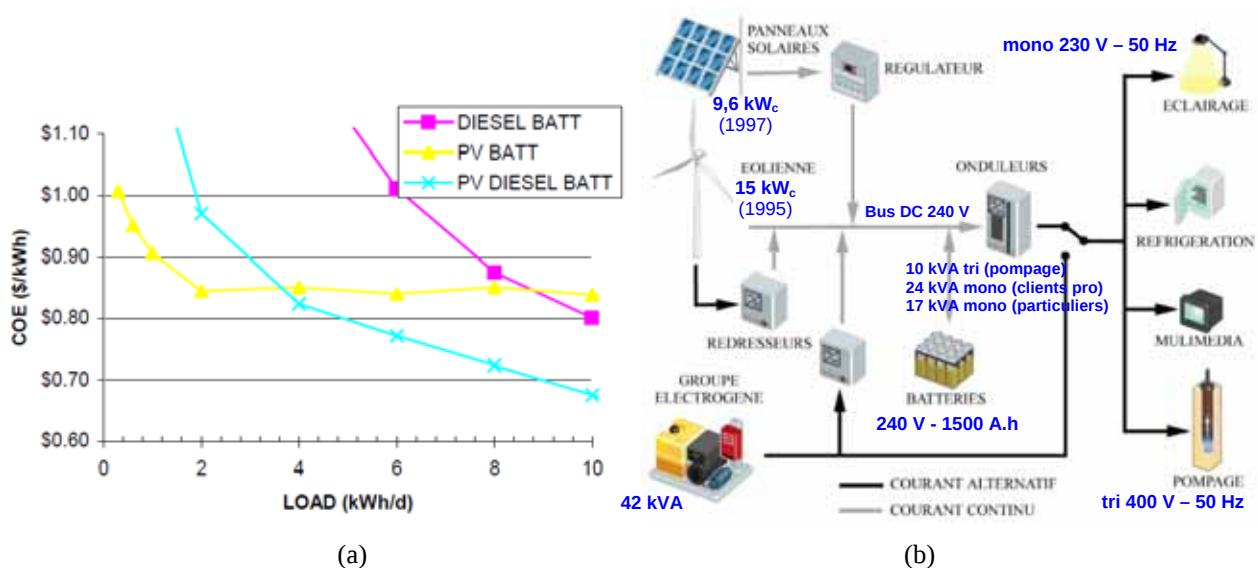


Figure 7 : a- Exemple de comparaison de rentabilité pour une irradiation solaire de 5,4 kWh/j et le fioul à 0,5\$/L (NREL [8]).
b- Synoptique de l'installation hybride diesel PV éolien de l'île de St Nicolas des Glénans (Transénergie [15])

3.4 Installations hydroélectriques

La particularité des installations hydroélectriques est de disposer d'un potentiel de production suffisant pour s'affranchir d'un dispositif de stockage ce qui permet d'éliminer un point faible des systèmes précédents. Mais pour cela il faut disposer de la ressource et généralement d'investissements relativement importants en génie civil. Le « Practical Manual » [16] rédigé par P. Maher et N. Smith est un document de référence pour dimensionner et réaliser localement les installations pico-hydroélectriques (environ moins de 10 kW).

Un procédé électrotechnique remarquable est celui commercialisé par la société Ecowatt-IREM qui consiste à réguler la distribution électrique en dissipant le surplus d'énergie dans des résistances ballast contrôlées électroniquement (gradateur) [17]. Les génératrices sont de type synchrones triphasées pour générer un réseau autonome. Si une distribution monophasée est requise, on peut utiliser un transformateur Leblanc (ou Scott) triphasé/monophasé pour que la génératrice voie une charge triphasée équilibrée.

Signalons enfin les kits chinois adaptés aux basses chutes, très diffusés en Asie (Chine, Laos, Vietnam...), avec des centaines de milliers d'unités en service grâce à un coût très bas de l'ensemble turbine générateur aux environs de 0,3 à 0,5 \$/W dans la gamme 100 W à 1 kW [18], mais au prix d'une durée de vie faible (2 à 5 ans).

⁴ Les informations concernant la rénovation de 2003 et la consommation ont été fournies par Yves Caytan, d'ERDF Direction des opérations Ouest, que nous remercions.



Figure 8 : Pico turbines (100 à 500 W) au Laos : systèmes de basse chute, installations en rivière, génératrice [18]

4. Volets généraux et sociologiques

Deux aspects nous semblent importants quant aux installations d'alimentation en électricité des populations isolées. D'une part, leurs performances économiques, surtout pour les plus pauvres qui en ont le plus besoin et pour lesquels les coûts d'investissement des systèmes occidentaux sont souvent prohibitifs. D'autre part, la pérennité des systèmes installés et leur coût sur l'ensemble du cycle de vie dépendent de nombreux facteurs comportementaux. Ce sont les deux points, fortement imbriqués, que nous proposons d'aborder dans cette dernière partie.

4.1 Accéder à des installations au meilleur compromis coût/productivité

Dans la partie 3, nous avons balayé quelques unes des nombreuses solutions technologiques pour produire de l'électricité au meilleur coût en sites isolés et autant que possible en exploitant des ressources locales renouvelables. Partant du principe qu'il existe des mécanismes financiers d'aide des populations en développement, il est nécessaire pour que le plus grand nombre puisse en profiter de réaliser des installations peu coûteuses et aussi performantes que possibles.

La technologie photovoltaïque offre sans doute le plus grand potentiel, avec d'intéressantes possibilités de standardisation, mais fabriquer des modules PV n'est pas accessible aux « bricoleurs ». Cependant, sous l'effet d'un marché mondial en très forte croissance tiré par les applications connectées au réseau, les prix baissent considérablement et la part des coûts d'installation est devenue non négligeable. C'est donc sur la formation de techniciens locaux compétents pour installer qu'il nous semble important de miser, sachant que ceux-ci joueront également un rôle essentiel pour la maintenance durant toute la phase de vie du système.

Quant aux technologies éoliennes et hydroélectriques, nous avons volontairement évoqué des solutions à faible coût fabriquées localement ou importées. Leur fiabilité reste sans doute à améliorer mais nous pensons qu'il est possible de réfléchir à la conception de solutions électromécaniques dont la fabrication peut être réalisée par des techniciens locaux. Les structures d'enseignement supérieur et de recherche peuvent ici apporter leur concours en étudiant des solutions simplifiées et robustes et en mettant largement à disposition des méthodes de dimensionnement associées au système et à leurs composants (par exemple des génératrices électriques qui s'avèrent réalisables localement, expérience blueEnergy [6]), et à l'image de ce qu'on fait les Anglais de l'Université de Nottingham [16] en pico-hydroélectricité.

Aujourd'hui, mis à part le cas des plus pauvres pour lesquels les capacités d'investissement représentent une limite majeure, les usages de l'électricité en courant alternatif (AC) se généralisent, principalement parce que l'offre du marché est là mais également parce que l'étiquetage énergétique ne concerne que les produits AC. On peut le regretter car des usages en DC éviteraient des conversions DC-AC et AC-DC inutilement consommatrice d'énergie (pertes). Mais pour que la distribution en DC perçoive, il reste du chemin à parcourir. Afin d'y contribuer, nous avons abordé ce problème scientifiquement via une optimisation du dimensionnement des différents constituants sur tout le cycle de vie [19].

4.2 Assurer le bon fonctionnement et la pérennité de systèmes limités en productible énergétique

En tant qu'occidentaux habitués à une électricité abondante avec peu de limites, si ce n'est la puissance maximale, en général limitée par contrat (puissance souscrite), nous avons parfois du mal à raisonner lorsque l'énergie consommable est également limitée. C'est ce que l'on remarque parfois dans les installations autonomes des « zones riches » où la facturation de l'électricité se fait dans les mêmes conditions (par seul souci d'équité) que pour les installations raccordées au réseau et où les consommateurs ont souvent du mal à accepter une limitation des ressources en énergie.

Or bien utiliser une électricité d'origine renouvelable locale, en l'absence de la mutualisation qu'offre l'interconnexion des réseaux, nécessite des comportements adaptés et responsables.

Pour cela, il est indispensable d'avoir une compréhension minimale des notions énergétiques et du fonctionnement des systèmes afin d'être des « consommateurs ». Ceci concerne aussi bien le choix des appareils électriques (les plus efficaces) que leurs usages. Lorsque les ressources sont fortement fluctuantes comme c'est le cas du soleil et du vent, il y a un grand bénéfice à tirer d'une meilleure corrélation (dans la mesure du possible) de la consommation avec la productivité naturelle, cela réduit les sollicitations des systèmes de stockage, accroît leur durée de vie et/ou permet de les dimensionner à moindre coût. Les travaux menés dans la thèse de Yaël Thiaux [20] ont permis de mettre en évidence les gains d'un pilotage de « charges non prioritaires » pour améliorer la corrélation des profils de consommation avec les profils de productivité.

Enfin, une maintenance de qualité est indispensable dans tous ces systèmes. Les niveaux de technicité sont très variables puisque la maintenance concerne une vaste gamme d'opérations comme le nettoyage des modules PV, le dépoussiérage des dissipateurs des convertisseurs, le nettoyage des filtres à air des moteurs thermiques, leur vidange, le graissage des paliers des machines tournantes, la lutte contre l'oxydation, la mise à niveau de l'électrolyte des batteries ouvertes et bien sûr toutes les réparations associées aux inévitables défaillances. Dans tous les cas, le sérieux de l'entretien joue un rôle majeur sur les performances énergétiques et sur la durée de vie des systèmes, mais encore faut-il en être convaincu et comprendre les causes de l'usure et des défaillances. Un enseignement sur les processus de vieillissement peut ici également jouer un rôle important.

Un autre point important concerne les modes de tarification qui jouent aussi un rôle important sur le comportement des consommateurs et sur l'efficacité et la vie du système. Les systèmes autonomes qui fonctionnent le mieux sont ceux qui comportent une facturation à l'énergie consommée mais avec une limitation à la fois en puissance et en énergie journalière. Il faut également faire en sorte de gérer efficacement les évolutions de consommation (en particulier pour les nouveaux accédants à l'électricité), en prévoyant la possibilité d'accroître les capacités du système et d'éviter les dérives pour ceux qui ont déjà accès à des services suffisants.

En somme, l'économie des installations autonomes collectives constitue à elle seule un problème techno-socio-économique complexe et auquel il est nécessaire d'apporter des réponses adaptées au cas par cas.

Si l'on analyse les comportements vis-à-vis de la consommation d'énergie, il apparaît manifestement que plus le système de production est centralisé (ici avec une distribution en mini-réseau), plus la part des usagers ayant des comportements peu responsables sur le plan énergétique croît.

En somme, il n'y a pas que les techniciens qui doivent être formés à la fabrication, l'installation et la maintenance, mais aussi les usagers qui doivent autant que possible interagir avec leurs systèmes de production. Pour cela, il faut travailler sur la recherche des signaux nécessaires (pas seulement économiques...) pour établir une communication pas trop compliquée, entre usagers et système de production, mais suffisante afin de favoriser le meilleur fonctionnement possible. Dans ce contexte, avoir accès à des informations détaillées de consommation peut-être très utile, mais mesurer (capteurs, transmission et affichage...) coûte assez cher et cela ne sera sans doute pas accessible aux plus pauvres dans l'immédiat.

5. Conclusion

Dans le contexte particulièrement prégnant d'un développement soutenable de l'humanité, l'accès à l'électricité joue un rôle majeur, en témoignent notamment les corrélations entre consommation d'électricité et indice de développement humain. L'accès à l'énergie électrique devrait sans doute constituer un droit au même titre que celui à la nourriture, à la santé et à l'éducation, dans le sens où elle en facilite grandement l'accès. En effet, un minimum d'énergie électrique (quelques kilowattheures par humain et par jour ?) est sans doute nécessaire pour offrir une vie décente à tout Terrien. Attention toutefois à ne pas transformer la « fée électricité » en vecteur moderne de misère, en effet, dans certains cas, l'endettement associé à l'acquisition des systèmes électriques conduit les nouveaux bénéficiaires de l'électricité à devoir travailler jour et nuit (à la lumière électrique...) aux limites de l'esclavage pour rembourser leurs dettes...

Il apparaît que les ressources renouvelables sont généralement suffisamment abondantes et plutôt bien réparties dans les zones habitées de notre planète et plus encore dans une grande partie des zones les plus pauvres. En outre leurs impacts environnementaux sont beaucoup plus faibles que ceux dus à l'exploitation des ressources fossiles et fissiles. Or les évolutions technologiques permettent aujourd'hui de les convertir aisément en électricité à des coûts de plus en plus accessibles. Ceci est tout particulièrement vrai dans les zones rurales à faible densité de population des pays les plus pauvres, où les niveaux d'investissements pour le déploiement des réseaux sont souvent hors de portée.

Les solutions non raccordées aux grands réseaux peuvent être à l'échelle de l'habitat (systèmes individuels) ou d'une communauté (mini-réseaux). Nous avons mis en évidence le spectre assez large des possibilités technologiques en focalisant sur quelques unes d'entre elles à la technicité assez faible mais permettant d'être réalisées et entretenues localement avec un minimum de dépenses ou d'importations.

Nous n'avons pas évoqué les systèmes sophistiqués à base de pile à combustible ou même simplement de groupes électrogènes à vitesse variable qui permettent d'améliorer l'efficacité énergétique, mais il est possible que ces solutions percent un jour lorsque leur robustesse sera suffisante pour fonctionner sur de longues durées avec un minimum de maintenance et d'investissement.

Enfin, nous avons souhaité insister sur l'importance de considérer les aspects humains (sociologiques, comportementaux), aussi bien pour les techniciens locaux que pour les consommateurs, afin de permettre un meilleur fonctionnement et une plus grande durabilité des systèmes électriques (de la production à la consommation). Nous espérons que cette modeste analyse sensibilisera les « ingénieurs », les enseignants et les chercheurs à ce volet du problème trop souvent écarté des réflexions et les incitera à contribuer à la résolution de ces enjeux majeurs.

Références

- [1] B. Multon, Y. Thiaux, H. Ben Ahmed, "Consommation d'énergie, ressources énergétiques et place de l'électricité", Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique, D3900v2, fev. 2011.
- [2] M. Barbut, "Le jeu des nombres de l'énergie", Notre Planète, PNUE, vol 16, n°4, 2006, pp.6-7.
- [3] Site web du « Système d'information énergétique du Sénégal » www.sie-energie.gouv.sn/spip.php?article37 consulté le 15 juin 2011.
- [4] RFI Planète Radio, "Le bœuf qui tourne. Production d'électricité par traction animale", <http://www.rfiplaneteradio.org/pub/proj.php?idN=62> consulté le 15 juin 2011.
- [5] InterAcademy Council, "Lighting the way. Toward a sustainable energy future", oct. 2007.
- [6] P. Caumon et A.C. Impens, "L'électrification rurale décentralisée", cours du master OSE, mars 2010.
- [7] A. Vallée, P. Beckmans, "Expertise concernant le projet : le bœuf qui tourne", Compte rendu ESF R&D CR140907, oct. 2007.
- [8] T. Givler and P. Lilienthal, "Using HOMER® Software, NREL's Micropower Optimization Model, to Explore the Role of Gen-sets in Small Solar Power Systems. Case Study: Sri Lanka", Technical Report NREL/TP-710-36774, May 2005.
- [9] EDF Panorama de l'électricité. Electricité et développement durable. Accès à l'énergie. <http://www.edf.com/html/panorama/durable/energie/developpement.html> consulté en septembre 2011.
- [10] L. Parshall, et al., "National electricity planning in settings with low pre-existing grid coverage: Development of a spatial model and case study of Kenya", Elsevier Energy Policy 37 (2009) 2395–2410.
- [11] International Energy Agency, World Energy Outlook, 2009.
- [12] Transénergie, rapport de la tâche 1 du projet ANR SOLEDO, février 2007.
- [13] S. Astier, "Conversion photovoltaïque : de la cellule au système", Techniques de l'Ingénieur, Traités de Génie Electrique D3936, mai 2008.
- [14] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed, "Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance", Electrotechnique du Futur 2001, Nancy, nov. 2001, pp.17-22.
- [15] G. Moine, "Electrification villageoise. Présentation de différentes configurations de systèmes hybrides (photovoltaïque+diesel)", rapport Transénergie-ADEME Guyane, déc. 2002.
- [16] P. Maher et N. Smith, "Pico Hydro For Village Power. A practical Manual for Schemes up to 5 kW in Hilly Areas", UK Dpt for Internat. Devel., Ed. 2.0, may 2001.
- [17] IREM, Micro Hydroelectric Power Plant: Ecowatt AC4/75, Installation and operation manual, MAN01200E/3.
- [18] M. Smits, "Technography of pico-hydropower in the Lao PDR", Lao Institute for Renewable Energy, oct. 08.
- [19] C. Jaouen, B. Multon, F. Barruel, " Une approche de dimensionnement sur cycle de vie pour l'analyse du potentiel de la distribution en courant continu dans le bâtiment ", EF 2011, Belfort, dec. 11.
- [20] Y. Thiaux, "Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides : Évaluation du potentiel de la technologie Li-ion", Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan soutenue le 8 juillet 2010.