



Quelles solutions de production d'électricité compatibles avec un développement soutenable ?



Bernard MULTON⁽¹⁾ et Sébastien VELUT⁽²⁾

(1) SATIE-CNRS - ENS de Cachan – Bretagne

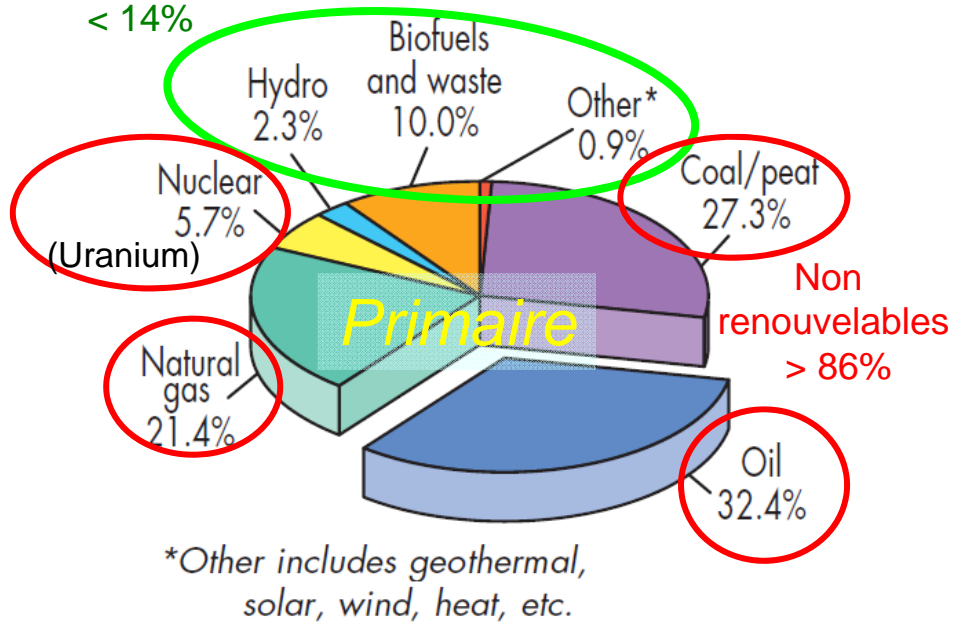
(2) CREDA-CNRS - Université de Paris 3 - Sorbonne Nouvelle



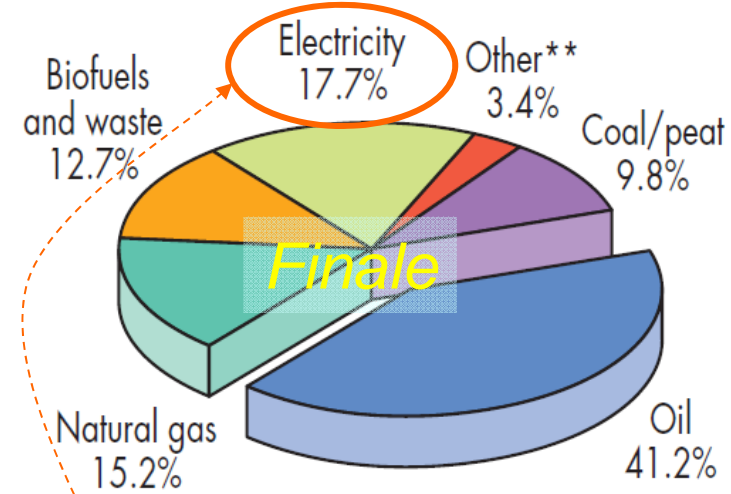
1- Place de l'électricité dans le mix énergétique mondial en 2010

Renouvelables

< 14%



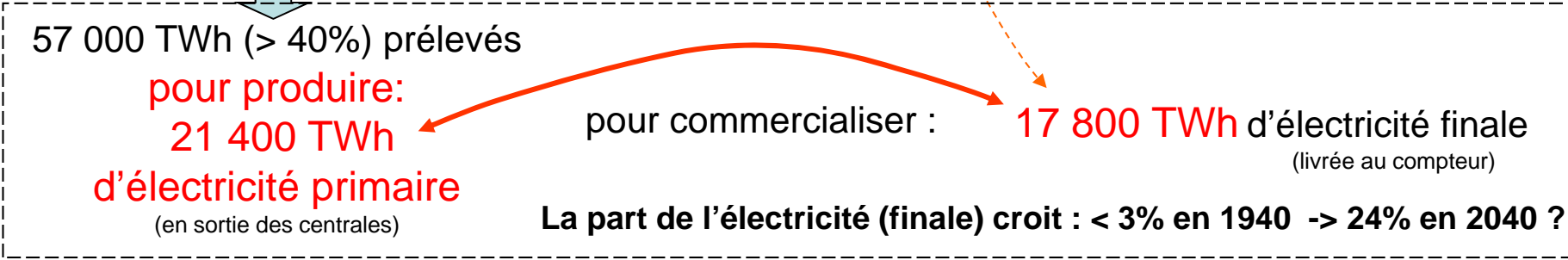
Spécificité du nucléaire (pour produire de l'électricité) :
 - 5,7% de la consommation primaire
 - 2,3% de l'énergie finale (13% de l'électricité est nucléaire)



Total \cong 12,7 Gtep
(147 000 TWh)

$\eta_{global} \cong 69\%$

Total \cong 8,77 Gtep
(100 600 TWh)



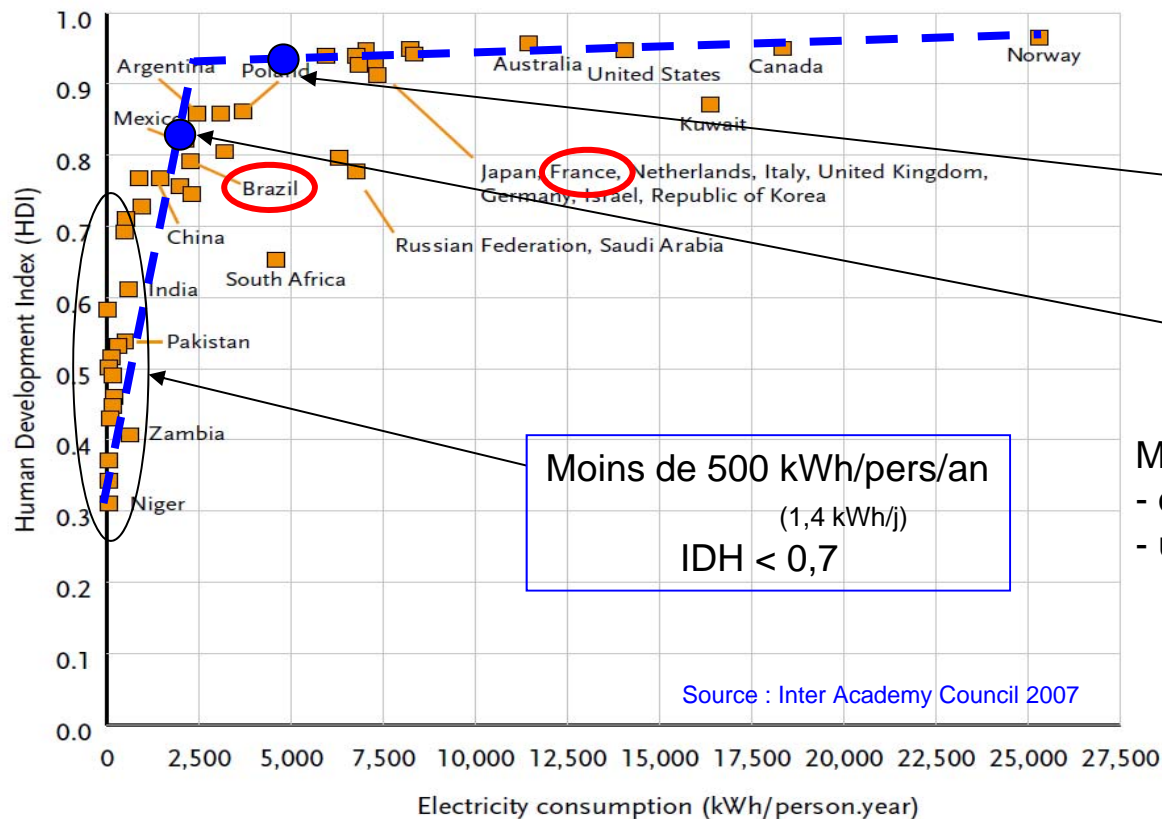
Source des données AIE (Key World Energy Stat. 2012)

2- Rôle de l'électricité dans le développement humain

Croissance rapide du taux de pénétration de l'électricité (relativement à l'énergie finale)
< 3% en 1940 - 9,4% en 1973 - **17,7% en 2010** - 25% en 2040 ?

Une forme d'énergie au potentiel majeur pour un développement humain durable :

- facilité de conversion des ressources renouvelables
- accès à de nombreux services vitaux, améliore l'IDH :



(IDH : indice quantitatif
 espérance vie, éducation, PIB/hab)

≈ 5000 kWh_e/pers/an
 pour un IDH > 0,9

2000 kWh_e/pers/an
 pour un IDH > 0,8

Moins de 500 kWh/pers/an
 (1,4 kWh/j)
 IDH < 0,7

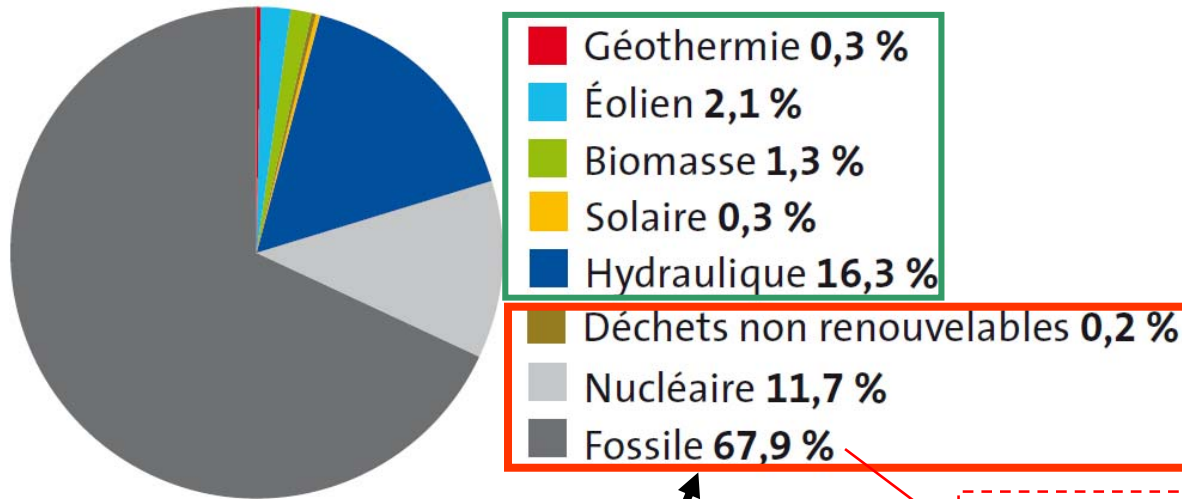
Mais :
 - où est la réelle causalité ?
 - une consommation d'électricité élevée
 n'améliore pas nécessairement l'IDH...

Il est possible qu'environ
 4000 kWh_e/pers/an suffisent ??
 11 kWh_e/pers/jour,
 toutes activités confondues...

3- Production d'électricité 2011 : **Monde**, Brésil, France

Production totale : **21 964 TWh** (+ 3,5% par an moyenne 10 ans

+ 2,8% 2010/2011)



Source : La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde Observ'ER 2012

non renouvelable :
+ 3,3% par an moyenne 10 ans

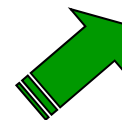
Charbon : > 40%
Gaz : > 22%
Pétrole ≈ 5%

Part renouvelable : **4447 TWh** soit **20,2 %**

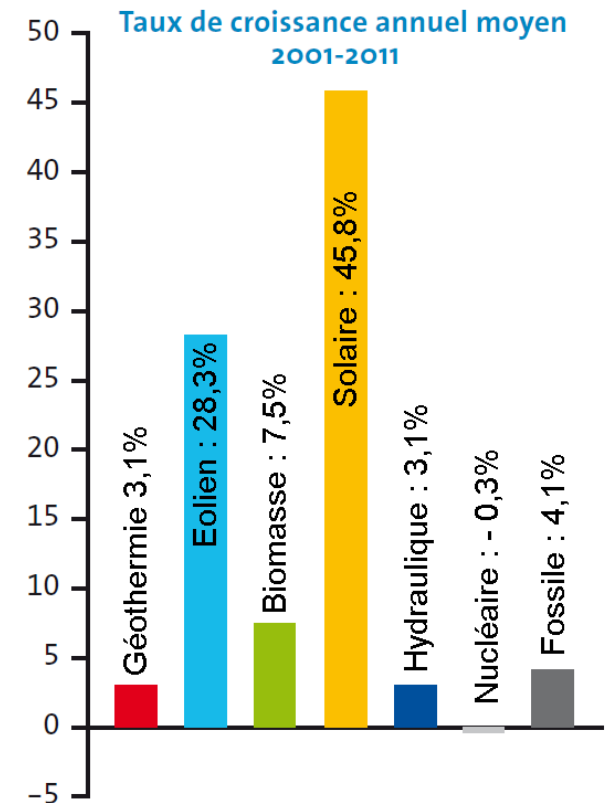
19,8% en 2010

+ 4,5% /an moyenne 10 ans

+ 5,3% 2010/2011

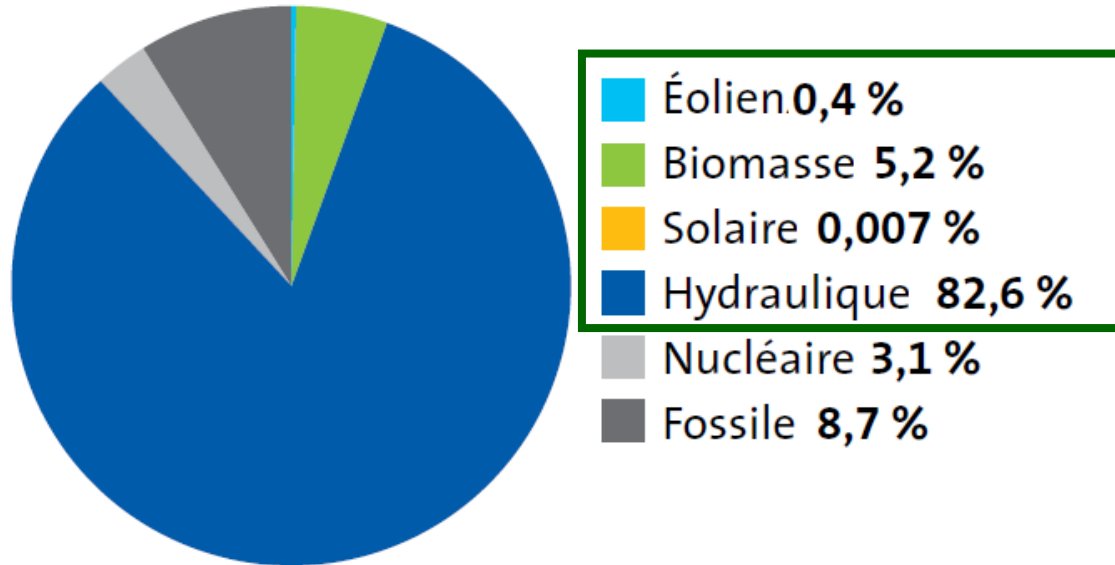


Energie finale totale :
moyenne +2,4%/an



3- Production d'électricité : Monde, **Brésil**, France

Production totale : **511 TWh** (+ 4,5% par an moyenne 10 ans
+ 3,4% 2010/2011)



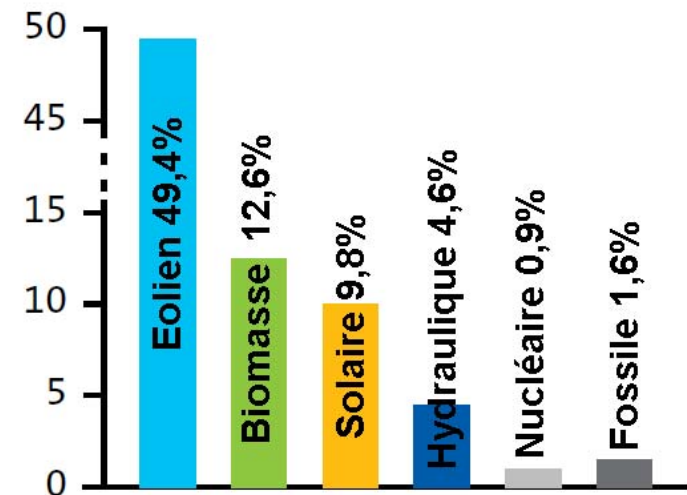
Part renouvelable :

450,8 TWh soit **88,2 %**
(85,5% en 2010)

+ 5% /an moyenne 10 ans
+ 6,8% 2010/2011



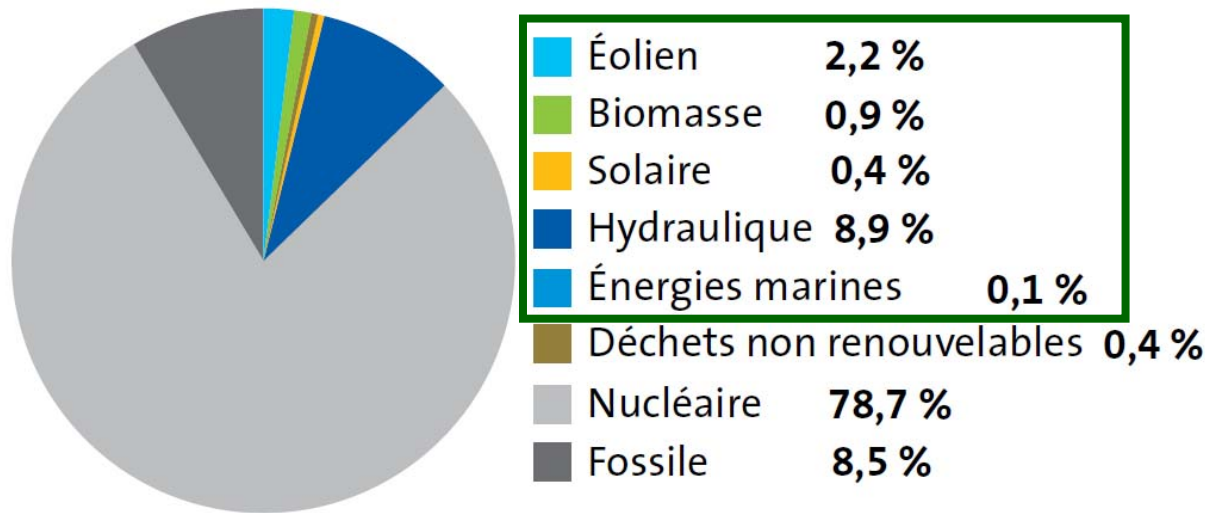
aux de croissance annuel moyen 2001-2011



Source :
La production d'électricité
d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2012

3- Production d'électricité : Monde, Brésil, France

Production totale : **562 TWh** (+ 0,2 % par an moyenne 10 ans
-1,2 % 2010/2011)

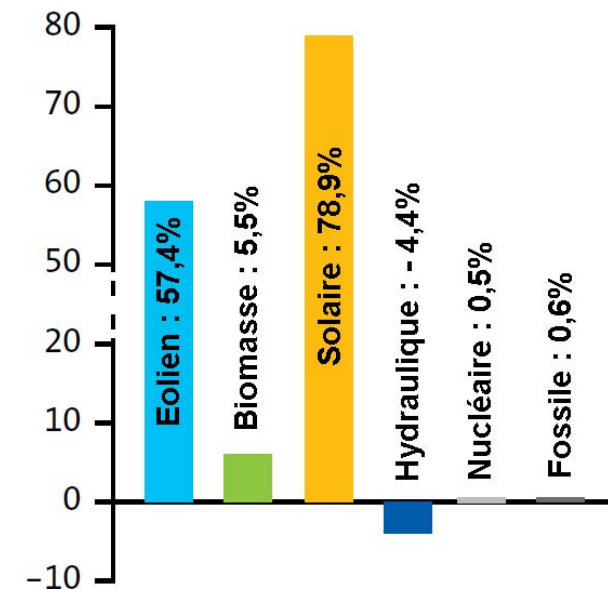


Part renouvelables :
69,8 TWh soit 12,4%
(14,5% en 2010)

-1,6%/an moyenne 10 ans
-15,5% / 2010



Taux de croissance annuel moyen 2001-2011

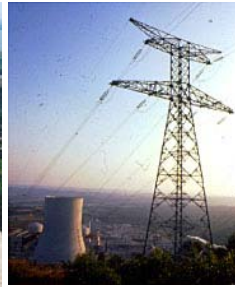


Source :
La production d'électricité
d'origine renouvelable dans le monde
Observ'ER 2012

4- Spécificités de l'approvisionnement électrique

Production centralisée

De grandes usines (hydrauliques, nucléaires, fossiles...)



puis un transport haute tension,
éventuellement à longue distance

Effets d'échelle favorables au coût de production, mais transport plus coûteux

Solutions généralement les plus impactantes, environnementalement et socialement

Production décentralisée (raccordée au réseau ou non) :

Possible également en hydraulique, fossile...



Mais **potentiel de loin le plus important** : éolien et solaire photovoltaïque

Production + consommation locale possible (systèmes autonomes)



4- Spécificités de l'approvisionnement électrique

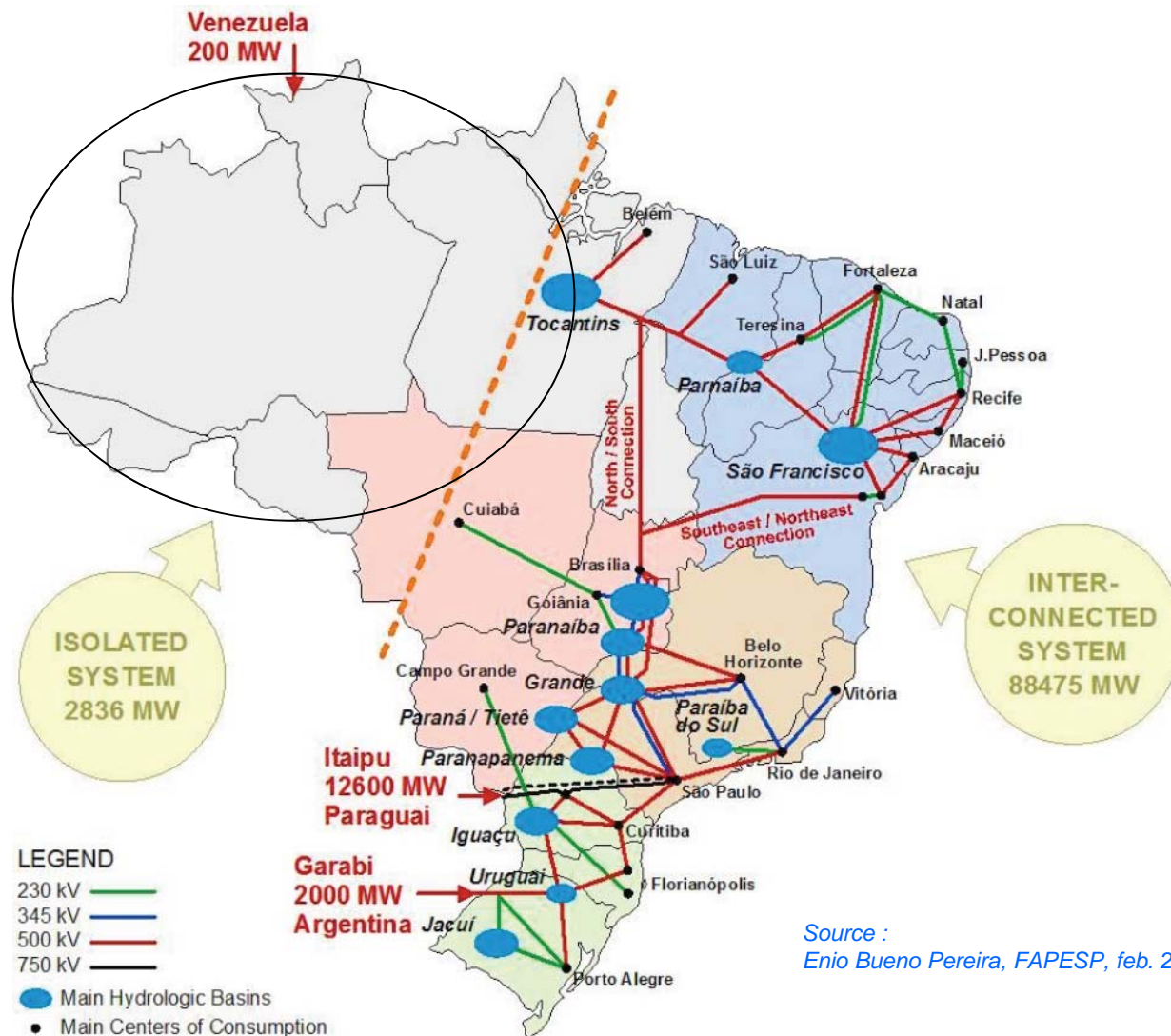
Situation du Brésil

Environ 1% de la population n'a pas encore accès à l'électricité

Près de 5% en Amazonie :

En 2003, le programme « La lumière pour tous », a touché 14,4 M de personnes.

Tarif social du kWh (plus faible pour les basses consommations)



Source :
Enio Bueno Pereira, FAPESP, feb. 2009

5- Conditions d'un développement durable

Une électricité convertie à partir de **ressources**

- **qui ne s'épuisent pas**

Fossiles, fissiles (y compris les réacteurs à neutrons rapides)
et, même fusion (deutérium-tritium) ne respectent pas ces critères....

- **qui minimisent les impacts environnementaux,**
surtout **les « plus irréversibles »**

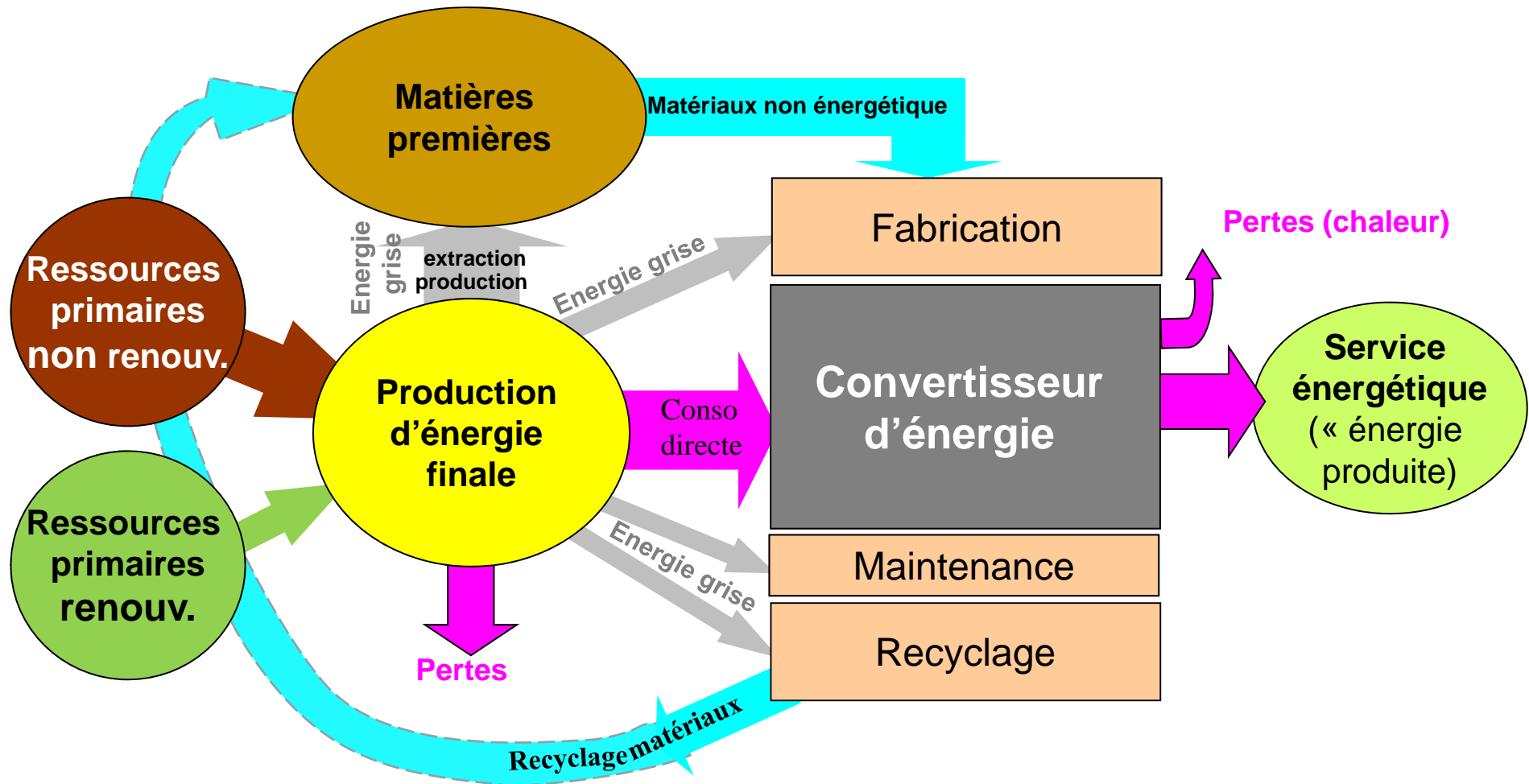
Les émissions de gaz à effet de serre qui affectent violemment le climat.
Attention les grands barrages en zone fortement végétalisée sont très impactants,
(cas étudié de **Tucuruí**, 8 GW 1982)

Les émissions radioactives qui endommagent le génome des systèmes vivants

Développement d'une économie saine

Respect des diversités culturelles et entretien de la cohésion sociale...
(cas du projet de **Belo Monte**, 11 GW en cours)

6- Nécessité de raisonner sur cycle de vie et de considérer le renouvellement des ressources



L'objectif consiste à minimiser la consommation totale de ressources non renouvelables pour réaliser le service attendu

7 : Ressources énergétiques pour une production distribuée

Ressources renouvelables :

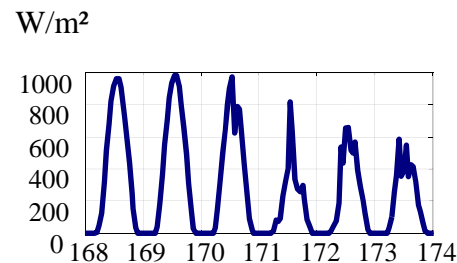
très abondantes, les plus équitablement distribuées

Mais des dépenses d'investissement
souvent plus lourdes qu'avec un groupe électrogène,
et parfois plus grande technicité requise
(installation et fonctionnement)

Rayonnement solaire :

Un gisement très élevé, très supérieur au besoin
(ressource Brésil : 4000 fois la consommation d'énergie primaire)
et des espaces de captation très suffisants

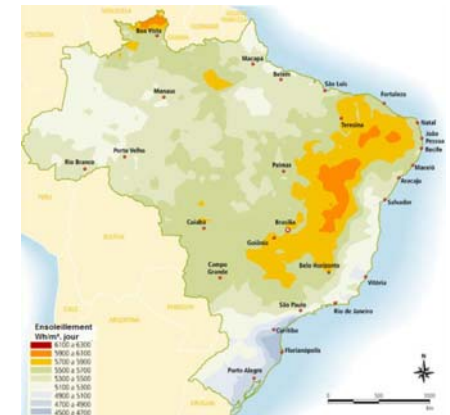
Mais variabilité diurne :



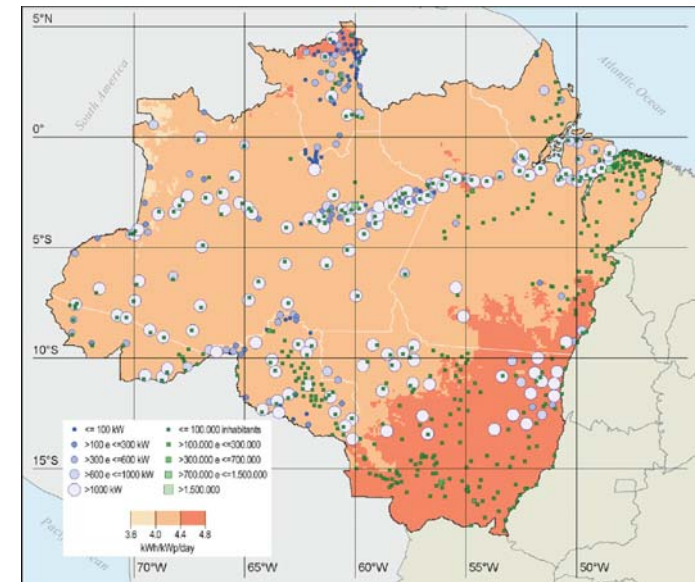
Productivité moyenne effective de :

3 à 4,8 kWh_e/kW_c/jour

4,3 à 6,3 kWh solaires/m²/j



Source : Atlas de l'Irradiation Solaire 1998



7 : Ressources énergétiques pour une production distribuée

Ressources éoliennes :

Un gisement fortement dépendant des zones géographiques

mais possibilité de productivité très élevée : **5 à 8 kWh_e/kW_c/jour**

Variabilité, mais moins d'effet diurne que le solaire,

et complémentarité saisonnière possible avec le solaire,
au Brésil avec l'hydraulique

Combustibles :

par exemple, pour une conversion dans des groupes électrogènes

Non renouvelables : essence, gasoil

- problèmes de dépendance,

- coûts de fonctionnement élevés surtout en zones reculées

(Avec 1 €/litre à 10 kWh_{PCI}/litre et $\eta = 20\%$ => **50 c€/kWh_e**)

Renouvelables :

- biomasse : éthanol, huiles végétales (diesel)...

nécessité de gestion durable

- combustibles de synthèse à partir d'électricité (hydrogène, méthane...)

8- Solutions autonomes de conversion

Systèmes centralisés ou décentralisés ?

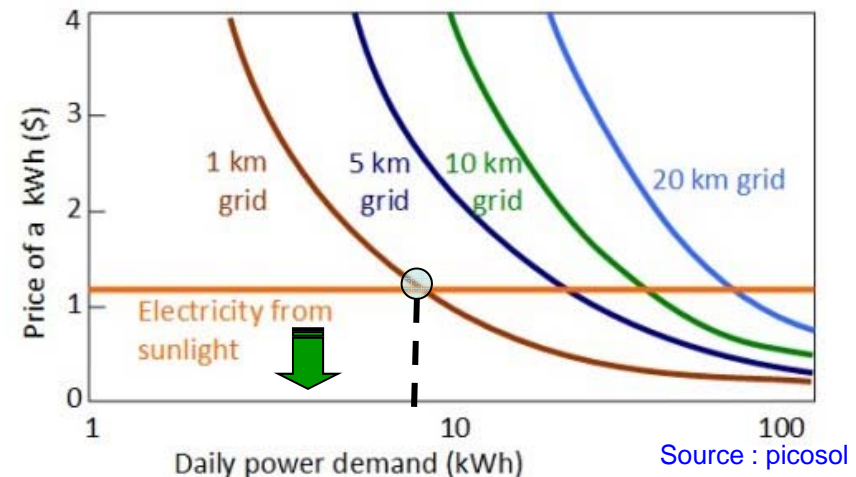
Dès que les consommateurs se trouvent à distance du réseau,
leur raccordement n'est rentable (par rapport à une solution locale)
que s'ils consomment suffisamment

Sauf politique de raccordement volontariste, la distance « critique »
est d'environ 1 km à qq km

Prix électricité photovoltaïque autonome versus raccordement réseau :

PV rentable en-dessous
d'une certaine distance
d'autant plus faible que
les besoins en énergie sont faibles :

Attention : ce ne sont que des
ordres de grandeurs, très évolutifs



Mini-réseaux ou installations individuelles :

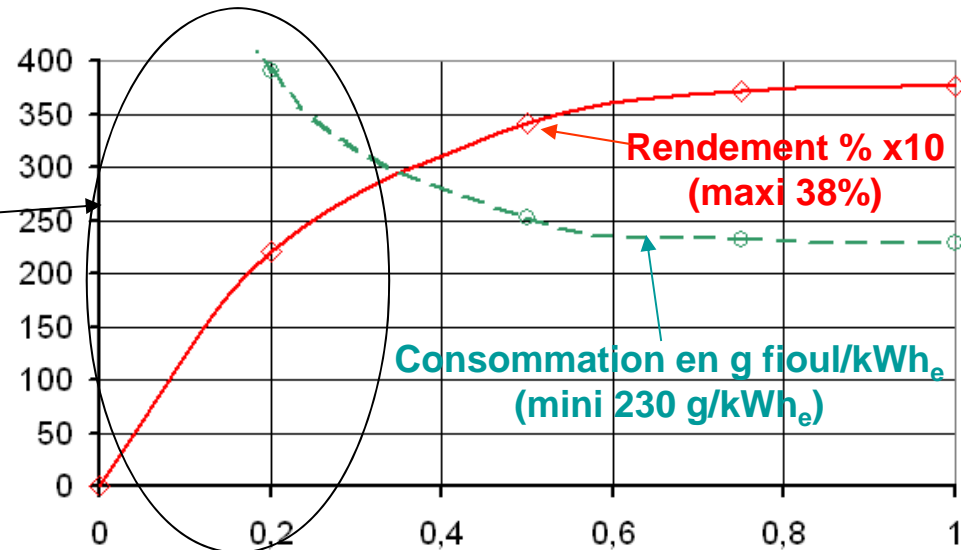
généralement un intérêt économique à mutualiser...

mais atténué par des comportements moins responsables

8- Solutions autonomes de conversion

Groupes électrogènes :

Zone de faible rendement
à faible charge



Exemple : diesel SDMO QAS 40 KD (32,9 kW / 40 kVA)

Coût d'investissement minimal : ~ 1 €/W selon coûts de transport et d'installation

Avec 15% de rendement sur cycle (30% maxi et fonctionnements à faible charge fréquents) :

1 kWh_e requiert 6,7 kWh_{PCI} soit environ 0,67 litres de carburant

=> fourchette de 10 c€ (plus bas prix du gasoil) à plus de 1 €/kWh_e

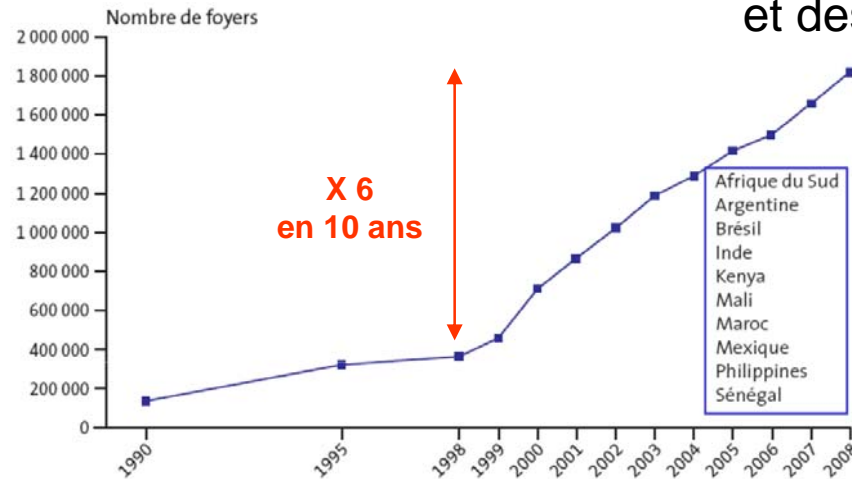
+ coûts de maintenance... et environnementaux

8- Solutions autonomes de conversion

Systèmes photovoltaïques (avec batteries) :

Une grande expérience, une très forte croissance

et des prix en forte baisse (20 R\$ ou 5 €/W_p) :



Source : BlueEnergy
P. Caumon et A.C. Impens,
master OSE, 2010



Source : América do sol



Du kit de base incluant

un module PV (50 à 100 W), un régulateur de charge, une batterie 12 V
et quelques appareils (éclairage fluorescent, TV et radiocassette)

...au système plus puissant et performant (plus cher) :

par exemple (Nouvelle Calédonie 3000 installations)

PV 800 W_c à 1 kW_c, batteries 24 V – 17 kWh, conso en DC et AC

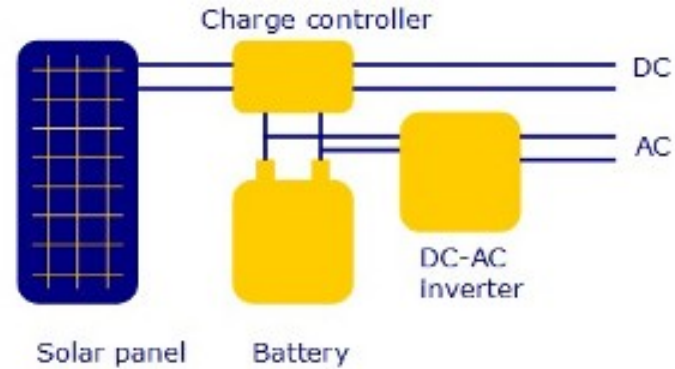
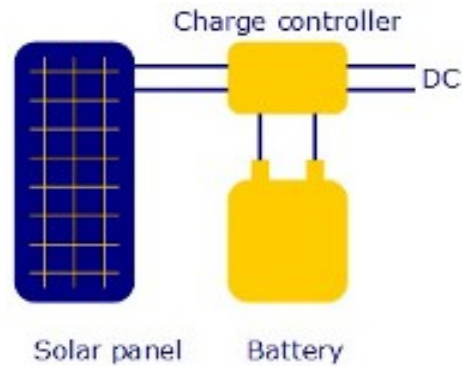
Peu d'entretien, sauf les batteries : à bien dimensionner

et bien gérer



8- Solutions autonomes de conversion

Systèmes photovoltaïques : DC (courant continu) et/ou AC (alternatif) ?

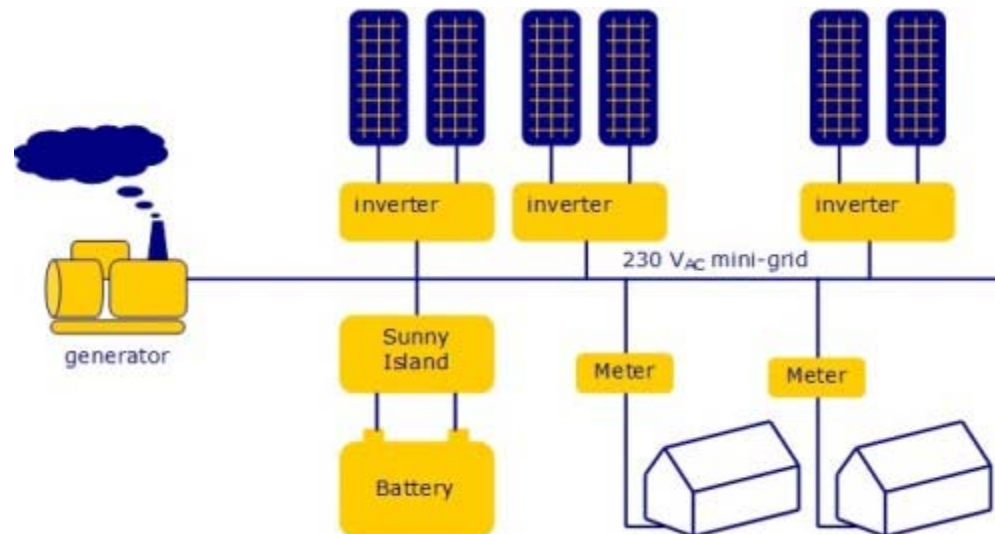


Source : picosol

DC = moins de conversions :
rendement, fiabilité, coût

AC = disponibilité d'appareils à meilleure
efficacité énergétique (marché plus dynamique)

Mini-réseaux :
par exemple
hybrides diesel – PV



Source : picosol

9- Volets économiques et sociologiques

En sites isolés, deux exigences importantes :

- baisser les coûts, à fiabilité égale ou meilleure
(l'investissement reste, la plupart du temps, un élément bloquant majeur)
- assurer la pérennité des installations
(développement de compétences locales, comportements favorisant la viabilité...)

Diminution des coûts d'investissement

Nécessité d'une prise en compte globale : système complet (production à consommation),
l'optimum global passe par des charges basse consommation.

En DC, les charges actuelles ne sont hélas souvent pas les plus performantes

Alors DC ou AC ? Une question complexe (économique et énergétique)
qui ne doit pas se limiter à l'équation suivante :

- DC BT pour les pauvres aux usages modestes
- AC pour les plus riches, gros consommateurs...

Modules PV : baisse rapide des coûts =>
la part des autres équipements (électronique, batteries...) et de l'installation croît

Eolien et Hydro : possibilités de fabrication locale sans très haute technicité,
sans doute des améliorations à apporter

9- Volets économiques et sociologiques

Assurer la pérennité des installations

Entretien sérieux (nettoyages, dépoussiérages, niveaux, réparations...)

Responsabilisation des comportements des consommateurs :

- économiser l'énergie (durée de vie des batteries)
- corréler autant que possible la consommation au productible

Nécessité d'une **meilleure connaissance** (techniciens et usagers) du fonctionnement et des modes de vieillissement pour accroître l'efficacité sur une vie plus longue

Tarifications adaptées et communication avec le consommateur :

- disjonctions en puissance et en énergie journalière, déjà pratiquées, à améliorer, à adapter aux spécificités culturelles...
- interface de communication simple, peu coûteuse et performante :
à étudier (idem...)

Prévoir l'évolutivité des systèmes pour permettre :

- l'accroissement de la demande
- la mise en réseau...

**L'électricité - énergie apparaît de façon évidente
comme un bien indispensable pour le développement humain**

Ressources renouvelables : a priori les plus aptes à offrir l'accès
à l'électricité de façon réellement équitable

Cas des populations à faibles revenus :

- meilleure accessibilité (coût et technicité)
- nécessité d'une formation minimale des
techniciens d'installation et de maintenance
- nécessité d'une implication des **consommateurs** d'électricité
pour en faire des « **consommacteurs** »

**Besoin de modes de tarification et d'interfaces homme-machine
adaptés aux spécificités culturelles**