

# *Les Energies Renouvelables*

## 1<sup>ère</sup> partie: le soleil et l'air

**Diaporama et commentaires de Bruno Bourgeon**



**Présenté au CAFECO 170 le 22 novembre 2011**

## **Relevé des commentaires**

# CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

## Diapo 01

Aujourd'hui nous visitons le paysage des énergies renouvelables, et dans cette première partie, ce que l'on peut tirer de l'air et du soleil.

## Diapo 02

Voici les différentes techniques d'EnR dont on parlera ce soir et fin janvier. Elles nous proviennent:

- Du soleil, dont le rayonnement est vecteur de transport de l'énergie thermique et photonique
- Du vent : énergie éolienne
- Du cycle de l'eau : hydroélectricité
- De l'océan : vagues (énergie houlomotrice), courants (énergie hydrolienne), différence de température (océanothermie ou énergie thermique des mers)
- De la terre, de sa chaleur interne, la géothermie
- Du système terre-lune, avec l'énergie marémotrice;

Somme toute, quoi de plus naturel? Seuls la biomasse et le biogaz relèvent de l'activité humaine (encore que pour la biomasse, une bonne part vient des forêts, pas forcément de la sylviculture...)

## Diapo 03

Sur ce graphique, on observe la croissance inéluctable de la production électrique mondiale (+ 130% depuis 1980, + 70% depuis 1990), et nous distinguons que la croissance la plus importante concerne le fossile surtout depuis 1990 (+ 70%). A partir de 1990, la croissance des énergies renouvelables est plus rapide (+ 60% environ), surtout par l'hydroélectricité. On constate aussi que le nucléaire croît beaucoup moins depuis la fin des années 80' (+ 20% environ). Au regard de ce graphique, on pourrait dire que le nucléaire est une énergie des années 80', et qu'elle est désormais dépassée, n'en déplaise à M. Hollande et à l'accord PS/EELV.

## Diapo 04

Et dans les énergies renouvelables, l'hydroélectricité n'est pas encore totalement exploitée, et continue de croître. Ensuite viennent la biomasse et l'éolien, loin devant le géothermique, le PV ou les énergies marines.

## Diapo 05

Et en France? Permettez-moi de vous rappeler les objectifs pointés par le scénario Négawatt en 2050:

Avec le bâtiment, résidentiel ou tertiaire, une économie de 600 TWh, soit – 65%; avec les transports, 400 TWh, soit – 67%; dans l'industrie et l'agriculture, 200 TWh, soit – 50%.

Et à La Réunion? Les tendances ne sont pas de cet ordre, pour la première et bonne raison que les dépenses énergétiques du chauffage sont quasi-nulles. En revanche, un effort redoublé doit être réalisé dans les transports.

## Diapo 07

Ce camembert est issu aussi d'un diaporama précédent sur l'énergie à La Réunion, pour rappeler que le chauffage ne contribue qu'à 7% de la dépense énergétique, l'électricité au quart, et que les transports sont aux deux-tiers!

62,1% pour le transport

24,2% pour l'électricité

6,8% pour la chaleur

6,8% pour l'agriculture, l'industrie et le résidentiel-tertiaire

## Diapo 08

Egalement pour ces camemberts, les quelque 2,7 GWh, consommés par les Réunionnais en 2010, sont répartis et évoluent comme suit:

- 3,7% d'EnR (éolien, PV, biogaz) (contre 1% en 2008)
- 18% de fuel et gazole (contre 13,3% en 2008)
- 20% d'hydraulique (contre 24,8% en 2008)
- 10% de bagasse (contre 10,7% en 2008)
- 49% de charbon (contre 50,2% en 2008)

# CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

## Diapo 09

On distingue une augmentation drastique de la part du charbon et une baisse du fuel, l'hydraulique et la bagasse restant stables. Minuscule percée des énergies renouvelables (en jaune).

**La Réunion, c'est « Coke en stock », et les EnR, c'est « Tintin »!**

## Diapo 10

L'évolution de la part de consommation des EnR par filière n'est pas à la hauteur des enjeux. Seule le solaire thermique a crû, par une réelle volonté de défiscalisation des panneaux en partenariat entre l'état et la région.

## Diapo 11

Depuis 2006, le taux d'EnR dans la production d'électricité n'a cessé de décroître... Ce qui est la logique inverse d'une volonté d'autonomie énergétique, mais cela est dû à un accroissement non maîtrisé de la consommation et à une impossibilité de compenser cette hausse.

## Diapo 12

Ainsi dressé le tableau réunionnais que je vous présenterai de nouveau le 24 janvier, parlons un peu du PV.

## Diapo 13

Un peu de chimie, dans la classification de Mendeleïev, le silicium se situe dans la colonne du carbone, c'est comme lui un atome tétravalent. De là à imaginer une civilisation alien basée sur des entités silice et non des entités carbone...

La nuance (de taille) est que le dioxyde de silicium, la silice, est solide (quartz, feldspath) alors que le dioxyde de carbone est gazeux aux températures usuelles, ce qui permet bien d'autres constructions moléculaires.

La silice est un composant du verre, et toxique pour l'organisme humain qui ne sait pas s'en débarrasser, et a ces quatre dernières décennies connu de nouveaux usages.

## Diapo 16

L'**effet photoélectrique** (EPE) désigne en premier lieu l'émission d'électrons par un matériau soumis à l'action de la lumière. Par extension, il regroupe parfois l'ensemble des phénomènes électriques d'un matériau provoqués par l'action de la lumière. On distinguera alors deux effets : des électrons éjectés du matériau (émission photoélectrique) et une modification de la conductivité du matériau ([photoconductivité](#), effet photovoltaïque lorsqu'il est en œuvre au sein d'une [cellule photovoltaïque](#), effet photoélectrochimique, effet photorésistif).

Les électrons ne sont émis que si la [fréquence](#) de la lumière est suffisamment élevée et dépasse une fréquence limite appelée **fréquence seuil**. Cette fréquence seuil, qui dépend du matériau, est directement liée à l'énergie de liaison des électrons émis, Le nombre d'électrons émis qui détermine l'intensité du courant électrique est proportionnel à l'intensité de la source,

L'énergie cinétique des électrons émis dépend linéairement de la fréquence de la lumière. Le phénomène d'émission photoélectrique se produit dans un délai  $< 10^{-9}$  s, phénomène quasi instantané.

Différentes techniques:

- les **modules solaires monocristallins** possèdent le meilleur rendement au m<sup>2</sup> et sont essentiellement utilisés lorsque les espaces sont restreints. Le coût, plus élevé que celui d'autres installations de même puissance, contrarie le développement de cette technique ;
- les **modules solaires polycristallins** ont actuellement le meilleur rapport qualité/prix, c'est pourquoi ce sont les plus utilisés. Ils ont un bon rendement et une bonne durée de vie (plus de 35 ans) ;
- les **modules solaires amorphes** auront certainement un bon avenir car ils peuvent être souples et ont une meilleure production par faible lumière. Cependant, le silicium amorphe possède un rendement divisé par deux par rapport à celui du cristallin, cette solution nécessite donc une plus

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

grande surface pour la même puissance installée. Toutefois, le prix au m<sup>2</sup> installé est plus faible que pour des panneaux solaires composés de cellules cristallines.

### Diapo 17

#### Cellule en silicium amorphe :

le silicium dans sa transformation produit un gaz projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. Ce sont les cellules des calculatrices et des montres dites « solaires ».

#### Avantages :

- fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert, y compris sous éclairage artificiel de 20 à 3000 lux),
- un peu moins chère que les autres techniques,
- intégration sur supports souples ou rigides.

#### Inconvénients :

- rendement faible en plein soleil, de 5% à 7%,
- nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m<sup>2</sup> plus faible, environ 60 Wc/m<sup>2</sup>),
- performances qui diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois), pour se stabiliser ensuite (-10 à 20% selon la structure de la jonction).

#### Cellule en silicium monocristallin

lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal. On découpe ensuite le cristal en tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont d'un bleu uniforme.

#### Avantages :

- bon rendement, de 14% à 16%,
- bon ratio Wc/m<sup>2</sup> (~150 Wc/m<sup>2</sup>) ce qui permet un gain de place si nécessaire,
- nombre de fabricants élevé.

#### Inconvénients :

-coût élevé.

#### Cellule en silicium multicristallin

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.

#### Avantages :

- cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module,
- bon rendement de conversion, environ 100 Wc/m<sup>2</sup> (voire plus), mais cependant un peu moins bon que pour le monocristallin,
- lingot moins cher à produire que le monocristallin.

#### Inconvénient :

-rendement faible sous un faible éclairage ou soleil diffus

### Diapo 18

#### Cellule photovoltaïque tandem:

Empilement monolithique de deux cellules simples. En combinant deux cellules (couche mince de silicium amorphe sur silicium cristallin par exemple) absorbant dans des domaines spectraux se chevauchant, on améliore le rendement théorique par rapport à des cellules simples distinctes, qu'elles soient amorphes, cristallines ou microcristallines.

#### Avantage :

**Association Initiatives Dionysiennes** <http://aid97400.lautre.net>

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

-sensibilité élevée sur une large plage de longueur d'onde. Excellent rendement.

### Inconvénient :

-coût élevé dû à la superposition de deux cellules.

### **Cellule photovoltaïque organique:**

Elles constituent une tentative de réduction du coût de l'électricité photovoltaïque, sans contester la principale barrière de cette technologie, mais on espère aussi qu'elles seront plus fines, flexibles, faciles et moins chères à produire, tout en étant résistantes. Les cellules photovoltaïques organiques bénéficient en effet du faible coût des semi-conducteurs organiques ainsi que de nombreuses simplifications potentielles dans le processus de fabrication.

### **Cellule photovoltaïque multi-jonction:**

Des cellules ayant une grande efficacité ont été développées pour des applications spatiales. Les cellules multi-jonctions sont constituées de plusieurs couches minces par jet moléculaire.

Une cellule triple jonction, par exemple, est constituée des semi-conducteurs GaAs, Ge et GaInP<sub>2</sub>. Chaque type de semi-conducteur est caractérisé par une longueur d'onde maximale au-delà de laquelle il est incapable de convertir le photon en énergie électrique. Le coût de ces cellules est de l'ordre de USD 40 \$/cm<sup>2</sup>.

### **Cellule photovoltaïque CIGS:**

La technique consiste à déposer un matériau semi-conducteur à base de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium sur un support.

Une inquiétude cependant : les ressources en matières premières. Ces nouvelles techniques utilisent des métaux rares comme l'indium dont la production mondiale est de 25 tonnes par an et le prix d'avril 2007 de 1 000 dollars le kg ; le tellure dont la production mondiale est de 250 tonnes par an (utilisé dans les sels de tellure de sélénium) ; le gallium d'une production de 55 tonnes par an ; le germanium d'une production de 90 tonnes l'an. Bien que les quantités de ces matières premières nécessaires à la fabrication des cellules solaires soient infinitésimales, un développement massif mondial des panneaux solaires photovoltaïques en couches minces sans silicium ne manquerait pas de se heurter à cette disponibilité physique limitée.

### **Diapo 19**

Les couleurs de la carte indiquent le rayonnement solaire, en moyenne, des années 1991 à 1993 (24 heures/jour), en considérant les données des nuages des satellites météorologiques. La somme des rayonnements dans les régions sous les points fonceés peut fournir toute la puissance électrique, thermique, carburant, etc. pour le monde entier si ces régions étaient entièrement couvertes de panneaux solaires d'une efficacité de 8% (ce qui est faible). Les régions: désert du Nevada (Vallée de la Mort), désert d'Atacama au Chili, Sahara sud-algérien, sud-est de la péninsule arabique, ouest de la Chine, Nord-Ouest de l'Australie. Et comme ces points sont sous des longitudes différentes, ils seraient opérationnels 24h/24.

Coefficients de performance :

Sud de l'Allemagne : ~0,9

Espagne : ~1,4

Îles Canaries : ~2,0

Île d'Hawaii : ~2,1

Déserts (Sahara, Moyen-Orient, Australie, etc.) : ~2,3

Maximum pratique terrestre : ~2,4 (Désert d'Atacama, le plus proche de l'équateur et particulièrement sec).

### **Diapo 20**

La constante solaire  $F = 1360.8 \pm 0.5 \text{ W/m}^2$ . Le rayonnement solaire est maximal dans le sud-est bien sûr, et dans certaines zones d'altitude (du côté de Font-Romeu, ou de Briançon). La Corse est naturellement bien pourvue, mais aussi tous les confetti ex-coloniaux tropicaux, dont La Réunion.

### **Diapo 21**

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

Le plus grand bateau solaire (180 places) d'Europe en 2007, construit pour l'ONG Natuur monumenten, pour le centre d'interprétation de la nature de Dordrecht qui accueille 150 000 visiteurs par an. Il sert à visiter les zones humides du Parc national de Biesbosch (9000 ha) aux Pays bas. Coût : environ 1 million d'euros (un moteur diesel sert de ressource complémentaire). Le centre dispose de 2 autres bateaux solaires, plus petits. Lieu : biesboschcentrum de [Dordrecht](#) ; Centre d'interprétation de la nature, parc national du [Biesbosch](#) (Pays-Bas)

### Diapo 22

Modules solaires équipant les toits du hameau de Grand Bassin.

### Diapo 23

En 2006, les nouvelles installations solaires photovoltaïques ont représenté, dans le monde, une puissance de 1 500 MW, portant la totalité des installations mondiales à 6 700 MW. Le Japon, l'Allemagne et les États-Unis représentent ensemble 81 % du marché mondial.

Les installations connectées aux réseaux (sans stockage de l'électricité) représentent la majorité des nouvelles installations.

Les cinq plus grandes firmes fabriquant des cellules photovoltaïques se partagent 60 % du marché mondial. Il s'agit des sociétés japonaises Sharp et Kyocera, des entreprises américaines BP Solar et Astropower, et de l'allemande RWE Schott Solar.

Le Japon produit près de la moitié des cellules photovoltaïques du monde, mais c'est en Chine que la grande majorité des panneaux sont assemblés.

Le Japon est lui-même un des plus grands consommateurs de panneaux solaires, mais largement dépassé par l'Allemagne

### Diapo 24

Voici quelques entreprise productrices de cellules PV

### Diapo 25

Et quelques producteurs de panneaux PV

### Diapo 26

Le prix du kWh produit par une installation solaire photovoltaïque dépend des coûts fixes liés à l'investissement initial (achat du matériel et travaux), de la quantité de l'énergie solaire reçue par l'installation, du rendement de l'installation et surtout de la durée considérée pour l'amortissement de l'investissement (dans les exemples : dix ans).

Ainsi, pour une installation domestique :

Production = 3000 kWh,

Ayant coûté 6 €/W

Le kWh coûte 58 cents,

descend à 40 cents si on obtient 4 500 kWh/an (zone bien ensoleillée),

monte à 72 cents si on obtient 2 500 kWh/an (zone moins ensoleillée) ;

Le regroupement permet de réduire les coûts, comme les centrales:

d'Amareleia au Portugal, Coût = 261 millions d'€, Énergie moyenne attendue = 93 GWh/an, Prix de revient du kWh estimé à 28 centimes ;

ou de Mildura en Australie, Puissance de 154 MWe, Énergie moyenne attendue = 270 GWh/an,, Investissement de 420 millions de dollars australiens = 230 millions d'€, Prix de revient du kWh estimé à moins de 9 centimes.

### Diapo 27

Ensemble des éléments techniques, financiers et fiscaux à prendre en compte dans les calculs de rentabilité d'une installation produisant de l'énergie à partir du photovoltaïque :

**flux liés à l'investissement** : ce sont le matériel (modules, onduleurs...), le transport et le stockage, l'ingénierie et les éventuelles options (télésurveillance) en année 0. À partir de ce chiffrage de l'investissement pour une puissance donnée, il est possible de calculer l'énergie annuelle qui sera produite, en fonction du taux d'ensoleillement de la région. Cette énergie annuelle est revendue à EDF

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

(Agence d'Obligation d'Achats) au tarif indexé en vigueur pendant 20 ans en France et cela donne le chiffre d'affaires annuel généré par la centrale solaire photovoltaïque.

**flux liés à l'installation** : ils reprennent le chiffre d'affaires dès la première année, lorsque la centrale est raccordée au réseau, auquel il faut déduire les différents flux et charges tels l'exploitation et la maintenance, la location de la toiture si applicable, la prime d'assurance, les frais généraux, la taxe professionnelle, les dotations aux amortissements et aux provisions, la variation du BFR et l'impôt sur les sociétés qui s'applique sur le résultat net, car une société ad hoc est souvent constituée par projet photovoltaïque. Ces flux sont aisés à estimer pendant les 20 ans de l'obligation d'achat, mais des hypothèses de valeur résiduelle de l'équipement après 20 ans sont à faire.

**flux liés aux financements** : ils prennent en compte le montage financier, la dette qui peut représenter 80 % de l'investissement initial, son remboursement et les intérêts.

Diapo 28

Modules polycristallins (fabrication) : ~ 1,2 €/Wc

Modules polycristallins (grossiste -> détaillant) : ~ 2 €/Wc (140 Wc/m<sup>2</sup>)

Système d'intégration (du grossiste au détaillant) : ~ 0,55 €/Wc

Onduleur pour injection réseau (car le courant produit est continu) : ~ 0,5 €/Wc

Coffrets électriques CC et CA : ~ 0,12 €/Wc

Câbles électriques : ~ 0,075 €/Wc

Main d'œuvre (pose des modules + onduleurs + coffrets) : ~ 0,55 €/Wc

**Installation photovoltaïque clé en main : de 4 €/Wc à 6 €/Wc, en baisse constante (cible à 1 €/Wc compétitive avec les ressources fossiles).**

Diapo 29

Calculer le prix d'une énergie nécessite de faire des hypothèses sur les taux d'intérêt, les frais de maintenance (dont ceux du personnel, donc des gains de pouvoir d'achat et de productivité), de combustible (ce qui signifie qu'on fait une hypothèse sur son prix dans plusieurs années), les durées d'utilisation de l'équipement (amortissement), etc.

Chaque étude peut faire ses propres hypothèses et les résultats peuvent varier.

La comparaison peut en outre tenir compte du fait que la production photovoltaïque peut se faire directement au niveau du consommateur, ce qui permet de s'affranchir des frais et pertes de distribution ou de commercialisation. Ces frais sont importants, puisqu'ils expliquent la différence entre le prix du kWh à la production (3 à 4 centimes pour les moins chers : centrale nucléaire, turbine à gaz à cycle combiné, centrale à charbon à lit fluidisé, et les prix au niveau du consommateur (10 à 15 centimes, voire plus, selon les pays).

De toutes les énergies renouvelables, le kWh photovoltaïque est de loin le plus cher (20 à 25 centimes pour une centrale et environ 40 centimes pour une bonne installation individuelle en France, contre 7 à 8 pour l'éolien par exemple). Selon un rapport de l'Inspection générale des finances (IGF) d'août 2010, «l'écart entre le tarif d'achat (entre 414 et 580 euros par mégawatt.heure) et le prix du marché (56 euros par MW.heure) est financé par les consommateurs d'électricité via la contribution au service public de l'électricité (CSPE)». Cela donne un tarif d'achat de 7,4 à 10,4 fois supérieurs pour le photovoltaïque en comparaison des prix du marché actuels. Les auteurs de ce même rapport ont chiffré les charges supplémentaires pour les ménages occasionnées par l'achat de la production photovoltaïque à la hauteur de 60 euros par an pour un ménage se chauffant à l'électricité.

Si on cherche à se projeter dans l'avenir, on s'attend à une hausse du prix de l'électricité fossile et nucléaire (hausse du prix du combustible à cause du dépassement du pic de production, taxe carbone, nouvelles exigences de sûreté et retraitement nucléaire...) et une baisse du prix de l'énergie photovoltaïque (progrès technique, économies d'échelle suite à la hausse des volumes).

Une étude de juillet 2010 réalisée pour l'association américaine NC WARN, qui promeut les énergies renouvelables et combat le nucléaire, par deux universitaires de l'Université Duke en Caroline du Nord, avance que le solaire est dorénavant moins cher que le nucléaire. Ces deux chercheurs se basent sur un

**Association Initiatives Dionysiennes** <http://aid97400.lautre.net>

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

prix du kWh photovoltaïque de 14 cents \$ (10,2 centimes) et sur un coût d'installation de 8 \$/W (5,83 €/W). Ces chiffres sont à rapprocher des prix réels du kWh actuels (entre 40 et 72 centimes pour la France selon l'ensoleillement).

Les autres énergies renouvelables et notamment le solaire thermodynamique (centrale solaire thermodynamique) restent actuellement moins chères. Selon un rapport de l'IGF (septembre 2010) le photovoltaïque est « la plus coûteuse des sources d'électricité renouvelables », étant 3,3 fois plus chère que l'hydroélectricité, et 2,85 fois plus chère que l'éolien terrestre. La seule énergie plus chère que celle du photovoltaïque est actuellement celle des piles électriques, d'autant qu'il est très facile d'implanter un petit capteur photoélectrique sur les petits appareils qui utilisent cette source : c'est la raison pour laquelle les modules sont si répandus dans les calculettes, montres, gadgets, balances, télécommandes, etc.

Heureusement, la technique photovoltaïque présente des possibilités de réduction de coûts beaucoup plus grandes que toutes les autres. De plus, il faut tenir compte des économies si elle remplit une seconde fonction (toiture, brise soleil...), et des économies sur le réseau électrique qui pourraient être permises par une installation décentralisée. Ces facteurs donnent une chance à cette technique et expliquent qu'elle bénéficie d'incitations gouvernementales.

### Diapo 30

En France, le parc photovoltaïque s'est étoffé avec plus de 120 000 centrales représentant 614 MW raccordés au réseau au 31 septembre 2010 et 89 MW raccordé dans les DOM TOM au 31 juin 2010, soit une progression de + 47 % de la fin mars 2010 à la fin juin 2010. Pour éviter ce qu'il considère comme un emballement du secteur avec plus de 3375 MW de demandes de raccordement au 30 juin 2010, le gouvernement a publié 13 décrets et lois en 2010, visant notamment à baisser les tarifs de rachat.

Le 2 décembre 2010, le gouvernement a annoncé un moratoire de 4 mois sur les installations photovoltaïque de plus de 3 KW. Par ailleurs, pour améliorer la sécurité électrique des installations (37 % des installations étant non conformes en 2009, 72 % pour risque d'électrocution et 28 % pour risque d'incendie), le [Ministère de l'Écologie, du Développement durable, des Transports et du Logement](#) a modifié le décret du 14 décembre 1972 afin d'étendre l'attestation de conformité aux centrales photovoltaïques. Le gouvernement a décidé de diminuer de 20 % le prix de rachat de l'électricité photovoltaïque en mars 2011. Il a décidé de plafonner à 500 MW les projets de production annuelle d'électricité photovoltaïque.

En juillet 2010, le gouvernement français a présenté un plan pour atteindre 23% d'énergie d'origine renouvelable. Celui-ci prévoit 5400 MW d'énergie photovoltaïque en ligne en 2020. Cela correspond-il au scénario Négawatt?

### Diapo 32

Certains, comme **JMT**, sont réservés devant ces parcs au sol, même si on pourrait imaginer des serres dessous.

Si l'on taxait les parkings avec panneaux PV, il faudrait faire de même sur ces parcs fonciers.

### Diapo 33

Je donne la parole, pour cette slide, à Morad Zitouni, de Réunion Conseil PV.

### Diapo 34

On n'oublie pas le côté social de la chose:

- D'abord donner du travail à la filière à La Réunion
- Ensuite équiper préférentiellement les familles les moins aisées, pour qu'elles puissent profiter de ces économies d'usage. Je ne suis pas sûr que ce soient les familles les moins aisées qui profitent de cette offre régionale.

### Diapo 35

Passons à tout autre chose, l'énergie fournie par l'air.

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

### Diapo 36

L'éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis électrique: ce sont des aérogénérateurs.

Les champs ou parcs éoliens les plus nombreux sont en Chine, Allemagne, Espagne, Etats-Unis, Danemark.

### Diapo 37

Ici le parc éolien de Calenzana en haute Corse.

Le choix du site dépend:

- Du vent, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent : un site avec des vents moyens de 30 km/h fournira huit fois plus d'énergie qu'un site avec des vents moyens de 15 km/h.
- De la turbulence du vent, i.e. sa constance dans sa vitesse et sa direction. Au-dessus de 90 km/h il faut mettre les pales en drapeau sous peine de destruction. Les alizés font un excellent exemple de vents stables pour un rendement optimal. Même avec un système d'orientation performant de la nacelle. Et encore : les "éoliennes couchables" en cas de cyclone sont une fumisterie (dixit **JMT**)! on sait les dimensionner pour des vents de 350km/h s'il le faut. D'ailleurs les éoliennes réunionnaises vont être redimensionnées.
- Proscrire les grands obstacles : arbres, bâtiments, escarpements...
- Un projet est rentable à partir d'une constance autour de 21-25 km/h
- Autres critères : nature du sol, accessibilité du site, connexion au réseau électrique.
- Pollution environnementale : oiseaux , chauve-souris. Eviter par conséquent les couloirs migratoires.
- Pollution sonore : à implanter à au moins 300 m de la plus proche habitation. Inaudibles à 500 m.
- Dans les zones cycloniques : éoliennes haubanées
- Off-shore : coût d'installation plus élevé, rendement meilleur (éoliennes de 6MW contre 3 MW de maximum sur terre).
- En ville : petits équipements pour faire tourner des systèmes de basse tension.

### Diapo 38

Voyez par exemple cette éolienne citadine de San Sebastian , de Puissance 1,75 kW à 14 m/s, mât à 5 m de hauteur.

Autres solutions:

- Altitude, avec ballons à hélium, ou en grande altitude pour profiter du jet stream, mais autorisations de l'aviation civile et militaire requises
- Éoliennes hélicoïdales à axe vertical, à effet Venturi
- Sur le toit des tours comme à Shanghai

### Diapo 39

L'équipement mondial se résume ainsi. La France est 5 fois moins dotée que l'Espagne, à surface foncière presque équivalente.

### Diapo 40

La croissance des installations est exponentielle dans le monde.

### Diapo 41

Le Danemark est le leader mondial par tête de pipe, laissant l'Espagne à la traîne.

### Diapo 42

Betz a montré que la limite du rendement est de 16/27, soit près de 60%. Je vous fais grâce de sa démonstration.

La puissance électrique nominale de 2 MW, soit 2 millions de watts, est donnée à 15 m/s, ce qui signifie qu'en-deçà, elle produit moins. Et au-delà de 25 à 35 m/s, elle est bridée voire mise à l'arrêt. Le facteur de charge a en pratique varié en Europe entre 2003 et 2008 entre 18 et 21%, 22% en France en 2009 et 2010. Le facteur de charge pour une centrale nucléaire se situe autour de 70%.

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

**JMT** : Ces limitations devront évoluer : on pourrait facilement pousser la limite à 28 m/s, soit 100 km/h, quand on sait que les éoliennes sont construites pour résister à des vents de tempête! Tout cela pour dire la sous-utilisation de cette forme d'énergie...

### Diapo 43

En raison de l'intermittence du vent et de l'insuffisance des capacités de stockage (barrages hydroélectriques), la production électrique par l'éolien ne peut représenter économiquement et écologiquement qu'une faible partie de l'électricité totale produite.

Ainsi, au Danemark, avec un parc de 3 482 MW en 2009 et une production de 6,721 TWh, la production éolienne représente 18,5% de la production d'électricité (soit 2,99% de la consommation totale d'énergie), soit aussi 1930 heures de fonctionnement annuel (gros doigt : chaque éolienne fonctionne en moyenne 6 h/j).

### Diapo 44

Les principaux fabricants d'éoliennes construisent des machines d'une puissance d'environ 1 MW à 6 MW. Les principaux fabricants d'éoliennes étaient d'abord surtout originaires du Danemark et d'Allemagne, pays qui ont investi très tôt dans ce secteur. En 2010, certains pays augmentent leurs investissements pour combler leur retard, comme les États-Unis avec GE Wind qui a presque doublé ses parts de marché en 5 ans, ou la France avec Areva, qui détenait jusqu'en 2007, 70 % du capital de REPower. Le marché est marqué actuellement par l'émergence des acteurs asiatiques comme Suzlon ou Shenyang Power, qui parviennent à gagner des marchés en Occident.

Au 1/10/10, la production électrique totale installée en France, soit +4% par rapport à 2009, est de 400 TWh. La croissance de la production électrique éolienne est de 38,4% dans le même intervalle. Fin septembre 2010, pour 5300 MW installés, la production d'électricité éolienne est de 6,5 TWh soit 1,8% de la consommation française totale.

### Diapo 45

**JMT** : Sur la troisième affirmation, elle est partiellement fautive : l'extraction des matériaux, transport, montage, construction du socle, font qu'une éolienne consomme de l'énergie fossile, en tous cas dans sa fabrication, et possiblement un peu dans sa maintenance. Mais globalement, nous l'avons vu dans le diaporama sur Négawatt, les émissions de CO2 sont très faibles.

### Diapo 46

**Santé** : En 2006, l'Académie nationale de médecine recommande de « suspendre la construction des éoliennes d'une puissance supérieure à 2,5 MW à moins de 1500 mètres des habitations » en attendant les résultats d'une étude épidémiologique.

**Émissions de CO2** : Pour maintenir la production d'électricité lorsque l'énergie éolienne fait défaut, il est nécessaire que le réseau électrique auquel un parc éolien est intégré soit composé également de centrales électriques dites « secondaires », c'est-à-dire à démarrage rapide (par exemple, centrales hydroélectriques ou thermiques). Les centrales nucléaires ont un démarrage trop lent.

Une des solutions les plus efficaces pour stocker le trop-plein d'énergie est l'utilisation « à rebours » des centrales hydro-électriques : celles-ci sont équipées pour pouvoir remonter l'eau d'un bassin de rétention situé au pied du barrage jusqu'au bassin supérieur.

Le stockage sous forme d'hydrogène ou dans des batteries se heurte à la fois à des problèmes de coût et de rendement.

Dans le cas de la France, avec sa forte implantation de centrales nucléaires n'émettant pas de CO2, l'installation d'un trop grand nombre d'éoliennes signifierait émettre encore plus de gaz à effet de serre.

Néanmoins dans l'état actuel du parc, l'éolien représente une économie conséquente sur les émissions de gaz à effet de serre et son potentiel dans ce domaine reste encore en partie inexploité.

**Climat** : pour les très grands parcs, réchauffement sur terre et refroidissement en mer de 0,15°C. Effet local, mais bien moindre que les autres formes de production d'énergie.

**Appoint** : Danemark, seulement 20% de son électricité par l'éolien.

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

**Visuel** : affaire de goût. Flashes toutes les 5 s au sommet pour l'aviation.

**Immobilier** : dépréciation aux USA, appréciation au UK et au Canada.

**Bruit** : 55 dBA au pied (voiture roulant à 60 km/h à 130 m). Dépend de la topographie, de la météo. Les infra-sons : du fantasme!

**Animaux** : chauve souris, risque de barotraumatisme.

**Télévision** : sur les antennes-rateaux, moins sur la TNT, perturbations doppler des radars météo.

**Subventions** : 80 milliards, pour au max 5% de la conso, et +20% de la facture... Est-ce bien raisonnable?

### Diapo 47

En-dehors de la condensation de la vapeur d'eau ou de la méthanation telle qu'on l'a vue dans le diaporama sur Négawatt, le stockage peut se faire par des fermes hydro-éoliennes. Le principe est le suivant : Une ferme éolienne génère de l'électricité grâce à des aérogénérateurs. Cette électricité est utilisée à 70% pour pomper de l'eau vers une retenue d'altitude. Lors des périodes de moindre vent, l'eau de la retenue est turbinée dans une unité hydroélectrique et stockée dans une retenue basse. L'électricité obtenue est envoyée sur le réseau.

**JMT** : De plus, le pompage turbinage peut être couplé à un champ éolien terrestre par exemple en réutilisant une ancienne mine (les puits du nord de la France descendent souvent à 500 voire 1000 m et ont un gabarit qui permet d'y descendre des groupes turbine-pompe/alternateur-moteur de quelques MW et des galeries pour y stocker de l'eau (mais il faudra les rendre étanches!) . Pour un champ de 100 MWe installé qui tourne 2000 h par an soit 200 GWh, il faut réguler sa production sur 6000 h environ, donc tabler sur 25% livrés en direct sur 2000 h (25 MWe donnant 50 GWh) et 70% stockés en remontant de l'eau de la mine (consommation 150 GWh, production possible de 70% = 105 GWh assurant 4200 h supplémentaires à 25 MWe).

### Diapo 48

Voici l'île d'El Hierro.

Un projet sera opérationnel dans cette île. El Hierro sera la première île tropicale totalement autonome en production électrique.

### Diapo 51

En 2008, le parc solaire thermique réunionnais permet d'économiser 142,3 GWh (12,2 ktep), soit 5,3 % de la production électrique totale de l'île et 1,35% de l'énergie finale consommée. Le solaire thermique permet également de réduire la consommation de butane (baisse de 17% ⇔ -5 ktep en 5 années).

Les chauffe-eau solaires installés augmentent de 13,3% de 2007 à 2008.

Pour développer les systèmes réduisant les besoins énergétiques actuels: le « Négawatt ». On pourrait arriver à 2624 kWh/an par foyer (- 25%) à La Réunion.

Jouer sur:

- 27% sur le gros électroménager (+++, économie possible de 306 kWh/an) : installation de « coupe-veille », classe A, A+, ou A++
- 22% pour les appareils à cuisson
- 19% pour l'eau chaude (+++, économie possible de 461 kWh/an) : en remplaçant les chauffe-eau électriques par des chauffe-eau solaires
- 17% pour la hifi vidéo
- 6% pour l'éclairage (lampes incandescentes, LED ou basse consommation)
- 6% pour le confort
- 3% divers.

### Diapo 52

Déclinons donc les possibilités du solaire thermique.

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

**Thémis**, dans les Pyrénées-Orientales, est un centre de recherche & développement consacré à l'énergie solaire ainsi qu'une centrale solaire active produisant de l'électricité pour le réseau EDF. Une centrale solaire thermodynamique concentre les rayons du soleil pour chauffer un fluide caloporteur et produire de l'électricité. Nous allons y revenir.

### Diapo 53

**Centrale à Tour** : constituée d'un champ de capteurs spéciaux appelés héliostats qui concentrent les rayons du soleil. Les miroirs sont concentrés sur des tubes où un liquide caloporteur est porté à haute température et envoyé dans une chaudière qui transforme de l'eau en vapeur, laquelle fait tourner des turbines qui entraînent des alternateurs produisant de l'électricité.

**Centrale Fresnel** : repose sur l'utilisation de miroirs plans qui pivotent autour d'un axe horizontal de façon à suivre la course du soleil et ainsi concentrer les rayons solaires vers un tube absorbeur.

### Diapo 54

Dans une région comme le Nevada, la pointe de demande d'électricité due aux climatisations se produit l'après-midi en été. Dans ces conditions, l'utilisation du solaire thermique apparaît comme logique car la production dépend de l'ensoleillement et de la température au sol.

Achevée et relié au réseau en avril 2007, Nevada Solar One est alors la plus grande centrale solaire de ce type au monde. Occupant une superficie de 130 ha, elle compte au total 76 km de cylindres réflecteurs soit au total 219000 miroirs.

Andasol, dans le désert de Tabernas à Alméria, développe selon cette technique une puissance de 50 MW, et de production attendue de 180 GWh/an, de quoi alimenter 45 000 foyers espagnols.

### Diapo 56

Les miroirs suivent la course du soleil.

### Diapo 60

Le projet australien peut paraître incroyable mais ses concepteurs le disent réaliste. Les études de faisabilité par le bureau d'ingénieurs allemand SBP, basée à Stuttgart, arrivent à leur terme. Cette tour solaire serait donc construite par l'entreprise EnviroMission dans le désert de Nouvelle-Galles du Sud, dans le comté de Wentworth. Si le financement a été trouvé, sa construction devait commencer en 2010.

Aux dernières nouvelles, EnviroMission se lance dans le développement d'une première version plus petite et moins coûteuse (50 MW) avec une cheminée en béton précontraint haute résistance. On s'inquiète tout de même de la lenteur du projet au vu des sommes mises en jeu et des investissements déjà réunis.

Le projet espagnol est également ruineux. D'autres études ont été réalisées en France, en Savoie.

**JMT** : Pour la "tour solaire" elle pourrait aussi être réalisée près d'une paroi montagneuse subverticale (genre Cervin!) : on aurait certes que  $\frac{1}{2}$  cercle pour les serres (où on peut mettre des tomates mais aussi une ville en montagne par exemple) mais la tour pourrait alors être forée comme un puits. Accessoirement on aurait ainsi tout ce qu'il faut pour le stockage hydraulique pour les heures de soleil faible ou de nuit, et le passage d'un ascenseur vers le sommet. (on propose un truc au Piton des Neiges au dessus de Cilaos? avec 1500 m de puits?)

Il existe aussi des "tours solaires à vortex" où la tour "matérielle" ne fait qu'une faible hauteur avec les turbines à sa base et le reste est constitué d'un tourbillon stable montant à plusieurs milliers de mètres d'altitude. Mais quid si la trombe "s'échappe"? Un projet est prévu pour la Réunion depuis longtemps... De plus les rendements seraient moindres que prévus.

### Diapo 61

Surface au pied = 46000 m<sup>2</sup>

### Diapo 62

La tour solaire à effet de cheminée est l'un des projets les plus ambitieux de la planète pour la production d'énergie alternative. C'est une usine d'énergie renouvelable qui pourrait fournir une puissance électrique importante (200 MW) tout en étant sûre et propre.

## CAFECO 170 : Les énergies renouvelables V5 par Bruno Bourgeon

Son principal avantage est qu'elle peut fonctionner sans intermittence en utilisant le rayonnement du soleil le jour et la chaleur de la croûte terrestre la nuit.

L'inconvénient est son prix : 5x+ que l'électricité produite par une centrale thermique, mais tout de même trois fois moins que le PV!

### Diapo 63

Ici une installation expérimentale en Savoie d'une petite tour à vortex.

La puissance électrique d'une tour à vortex de 300 m de hauteur ne serait que de 180 à 310 MW, ce qui est finalement d'un coût-efficacité faible par rapport à une centrale à charbon.

### Diapo 65

Voici un tableau résumant une étude belge sur les économies potentielles qu'un chauffage solaire thermique peut engendrer. On notera que le rendement est deux fois meilleur à Aix en Provence qu'à Bruxelles, et que les panneaux plans sont plus efficaces que les tubes.

### Diapo 66

Le couple parabole/moteur Stirling produit de l'électricité par un générateur.

Des capteurs semi-paraboliques de Fresnel chauffent un fluide à haute température, il sert ensuite à produire de la vapeur qui actionne un turbo-générateur.

Des capteurs thermiques associés à des thermocouples produiraient également de l'électricité mais le rendement serait très faible et dépendant d'une source froide.

**JMT** : La production de froid peut se faire par adsorption (comme le font les réfrigérateurs et congélateurs à pétrole ou à gaz qu'on trouve en Afrique). Mais on peut aussi faire de la climatisation, et si on constitue un stock thermique tampon, l'installation continue à fournir froid et chaleur même quand il n'y a pas de soleil, à puissance réduite mais d'un autre côté pas de soleil = moins de chaleur = moins de besoin de rafraîchir, donc solution élégante pour les zones trop loin des SWAC.

L'idéal serait la trigénération: électricité thermique/chaleur domestique/froid domestique avec les panneaux solaires et le stockage thermique.

Le fin du fin serait d'accoler des cellules PV sur un panneau thermique qui fourniraient prioritairement l'électricité relayée par le générateur thermique pour les pointes de puissance ou les pertes de luminosité, avec stockage thermique, production de chaleur et de froid (et éventuel complément de froid par pompe à chaleur à moteur électrique) permettant ainsi d'accéder à une vraie autonomie énergétique individuelle.

### Diapo 68

Et vous m'en excuserez...That's all Folks!Thanks for your attention!

## Les devises Shadoks

JE DIS DES CHOSES  
TELLEMENT  
INTELLIGENTES  
QUE LE PLUS  
SOUVENT, JE  
COMPRENDS PAS  
CE QUE  
JE DIS.

