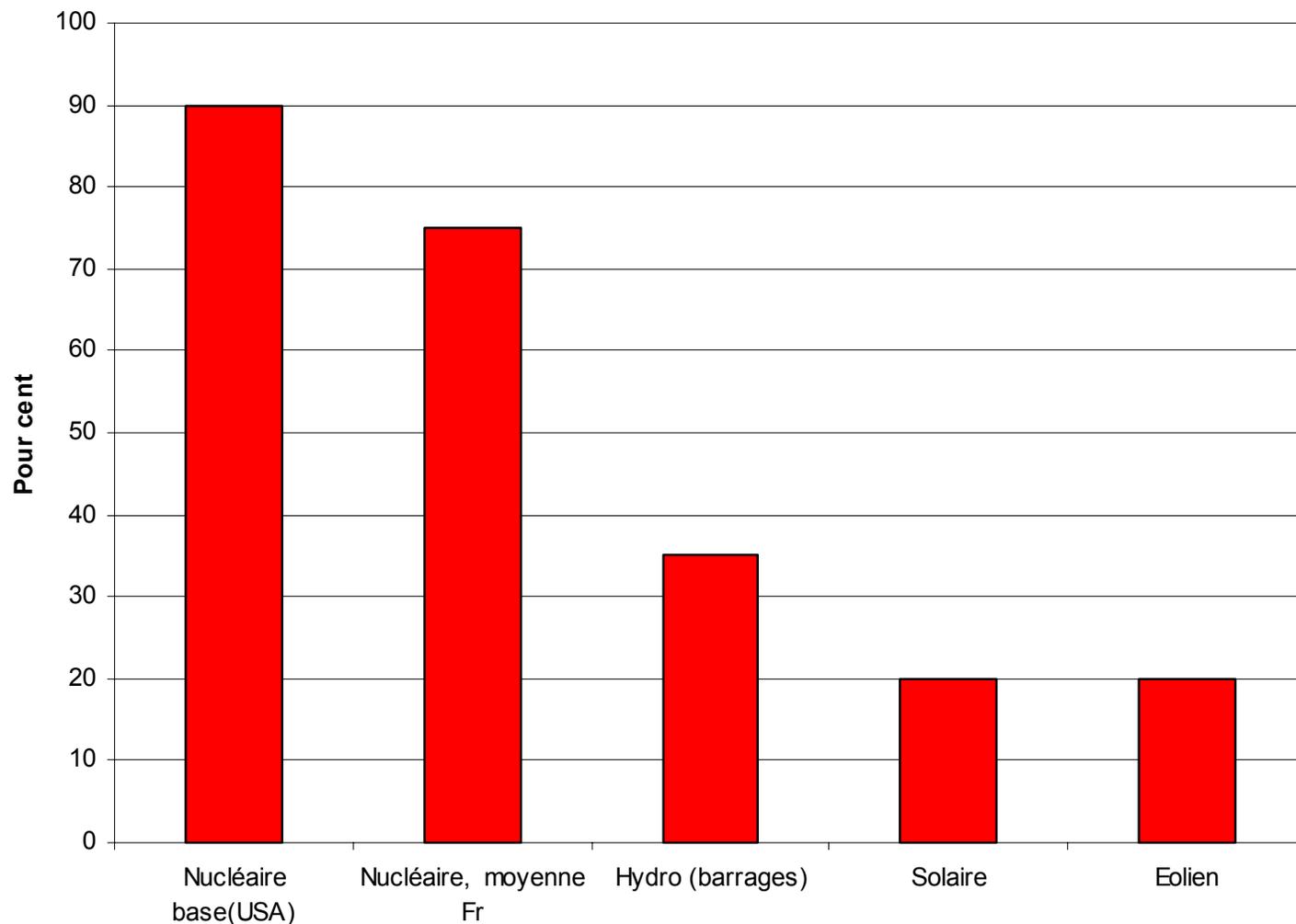


# Energies renouvelables

# Disponibilité de la ressource

Taux d'utilisation pour la production d'électricité



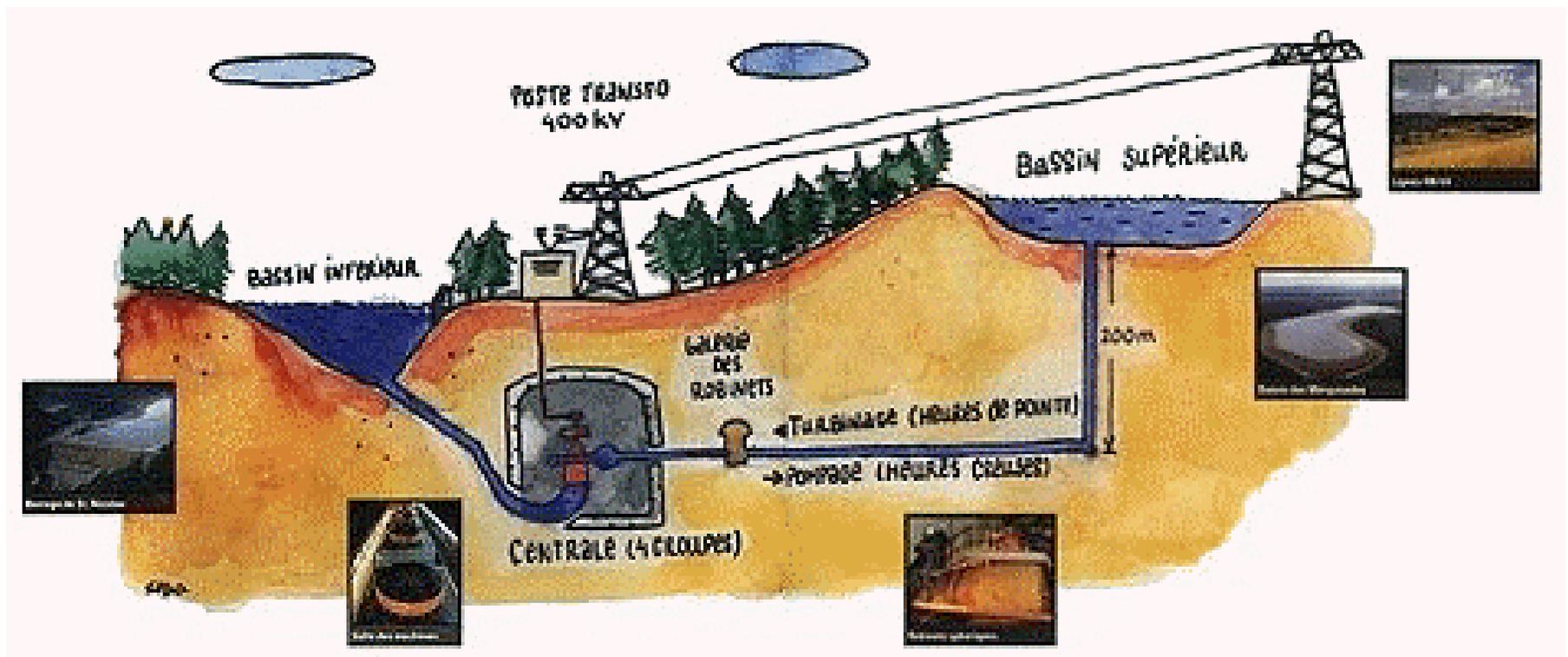


# Hydroélectricité

# Ressources

- Ressource mondiale: 12000 TWh
- Production hydro : 2000 TWh
- Production mondiale électrique: 14000 TWh
- Localisation:
  - Asie: 27%
  - Amérique du Sud: 24%
  - CEI: 24%
- Environnement
- Ruptures de barrage:
  - ex Morvi(1979) 30000 morts

# Step





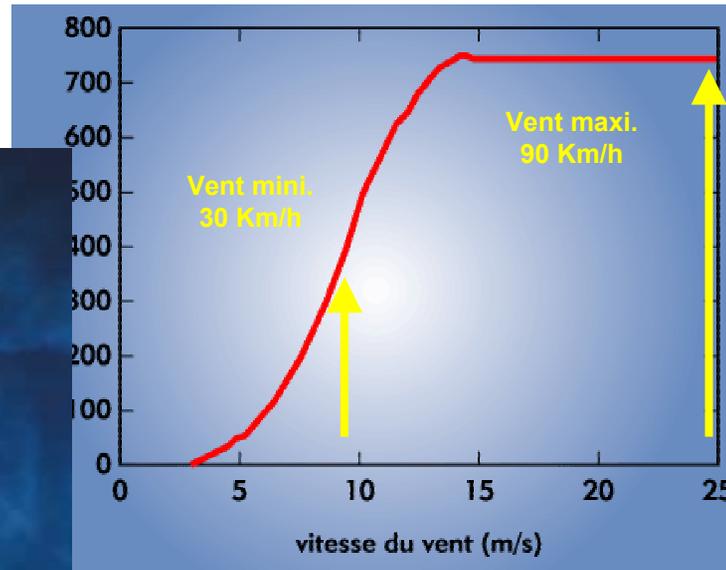
# EOLIEN

Une énergie aléatoire



**Des puissances installées faibles :**  
9600 MW dans le monde  
33% en Allemagne pour  
seulement 1% de l'électricité

2000



**Un marché mondial en forte augmentation  
qui sera tiré par l'offshore**

# Physique des éoliennes

# Loi de Betz

Puissance du vent (et des courants marins)

$$P = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad V_1 \rightarrow V_2$$

$$P_{disp} = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \rho S V_1^3 \left( 1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \left( 1 - \frac{V_2^2}{V_1^2} \right)$$

Puissance maximum récupérable (Betz)

$$P_{\max} = \frac{16}{27} P$$

$$P_{réel} = 0,25 \times \frac{16}{27} P$$

# Exemples

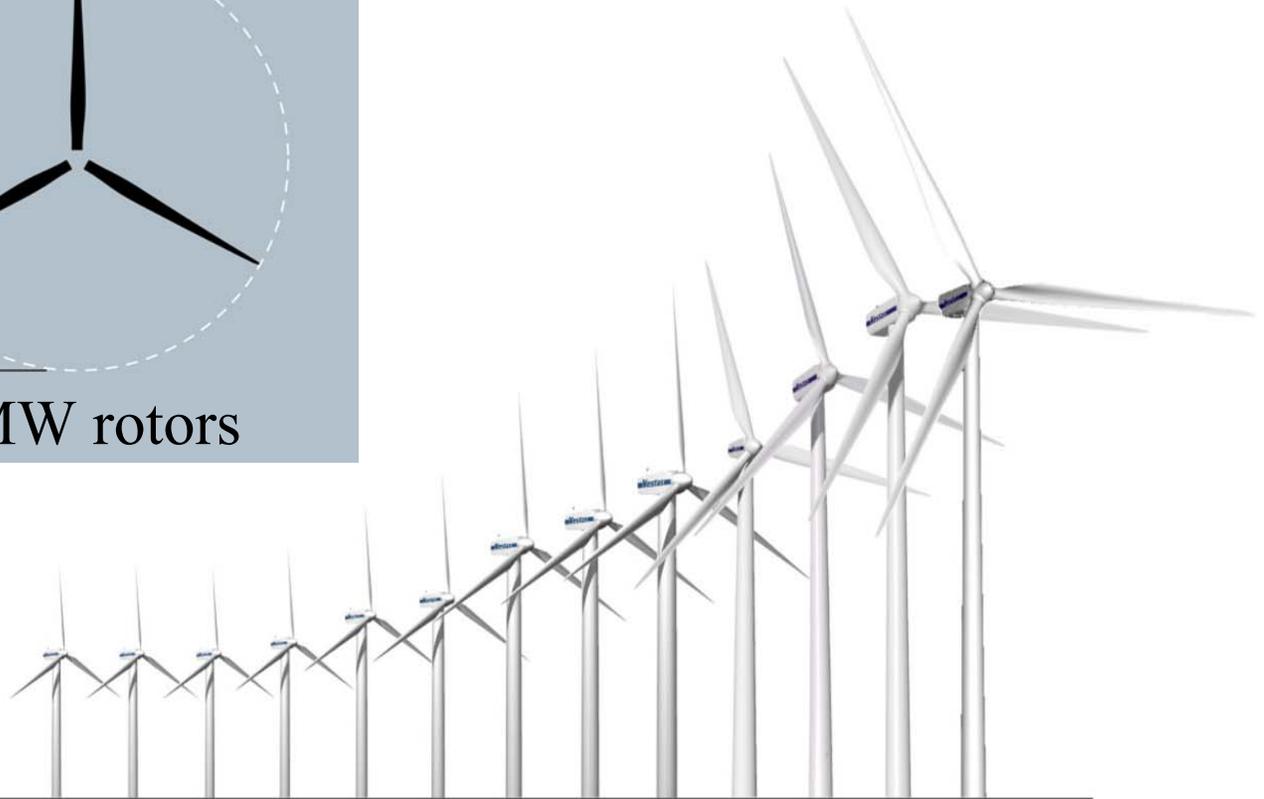
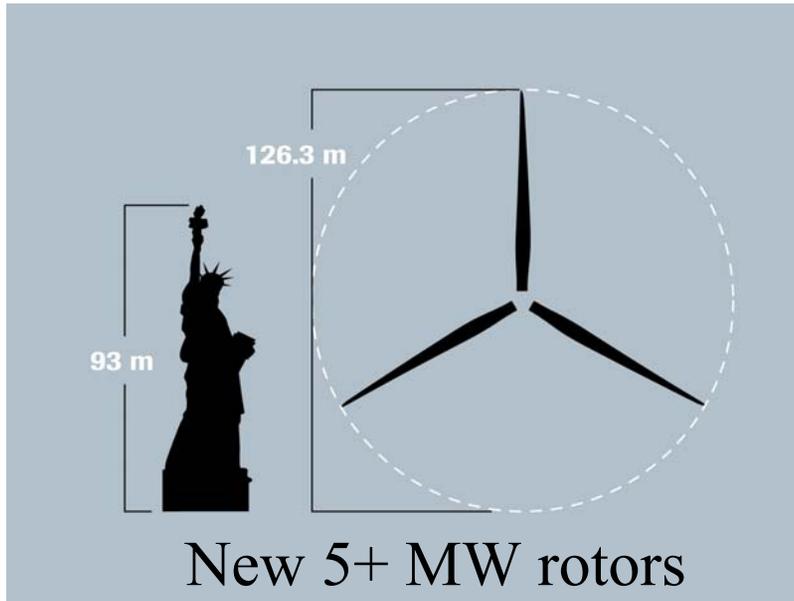
Eolienne  $V=55$  km/h  $R=50$ m  $P=2,3$  MW

Hydrolienne  $V=10$  km/h  $R=50$ m  $P=13$  MW

# Caractéristiques types

D	$\Omega$ t/s	$P_m$ kW
1	33,33	0,4
2	16,67	1,6
5	6,67	10,1
10	3,33	40,3
20	1,67	161,2
50	0,67	1007,2
100	0,33	4028,9

# L'avancée des éoliennes



Product/Rotor diameter (m)	V15	V17	V19	V20	V25	V27	V39	V44	V47	V52	V66	V80	V90
Year of installation	1981	1984	1986	1987	1988	1989	1991	1995	1997	2000	1999	2000	2002
Capacity (kW)	55	75	90	100	200	225	500	600	660	850	1750	2000	3000
MWh/year	217	265	301	346	481	647	1304	1581	1947	2530	4705	6768	9152

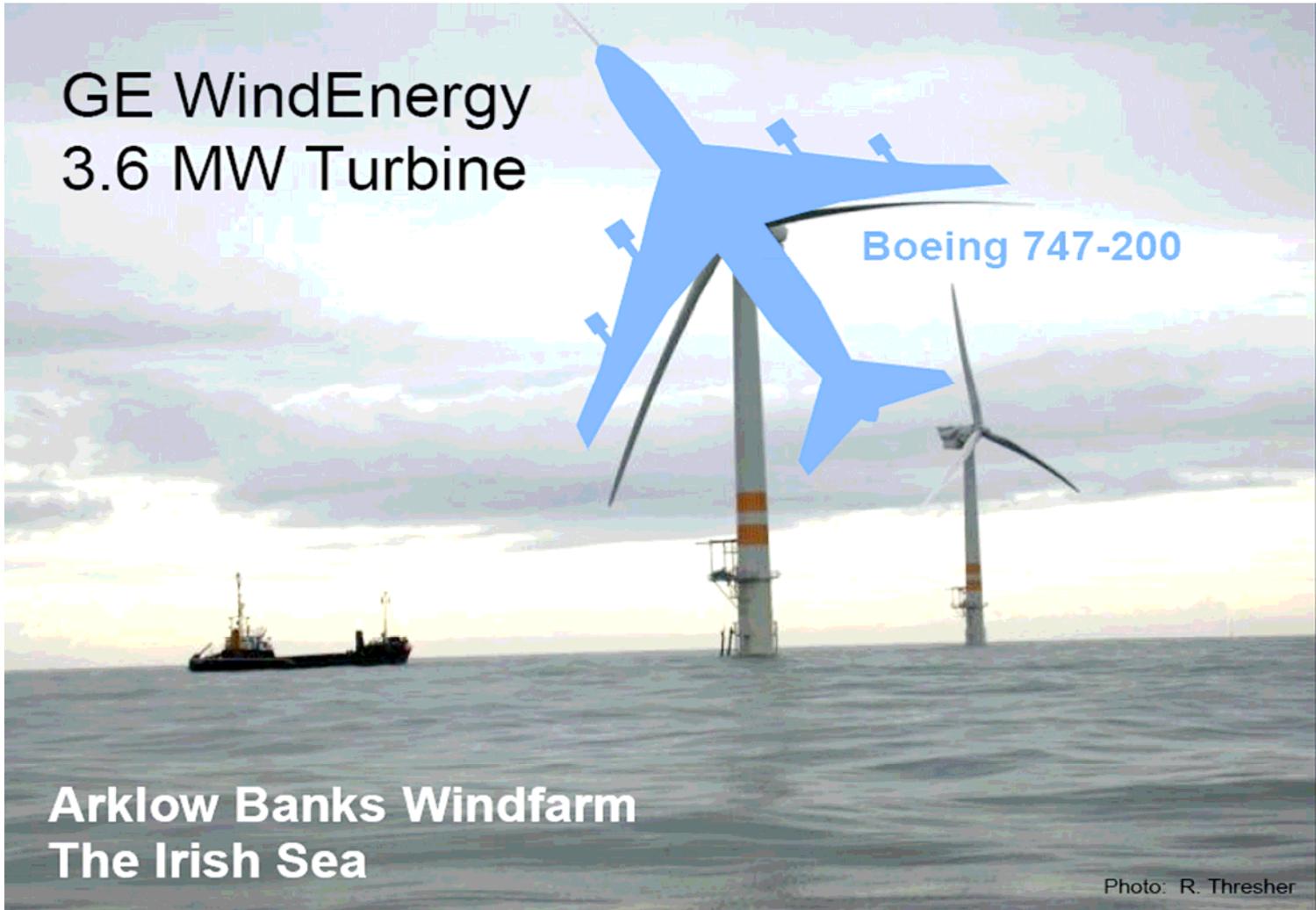
# Boeing

GE WindEnergy  
3.6 MW Turbine

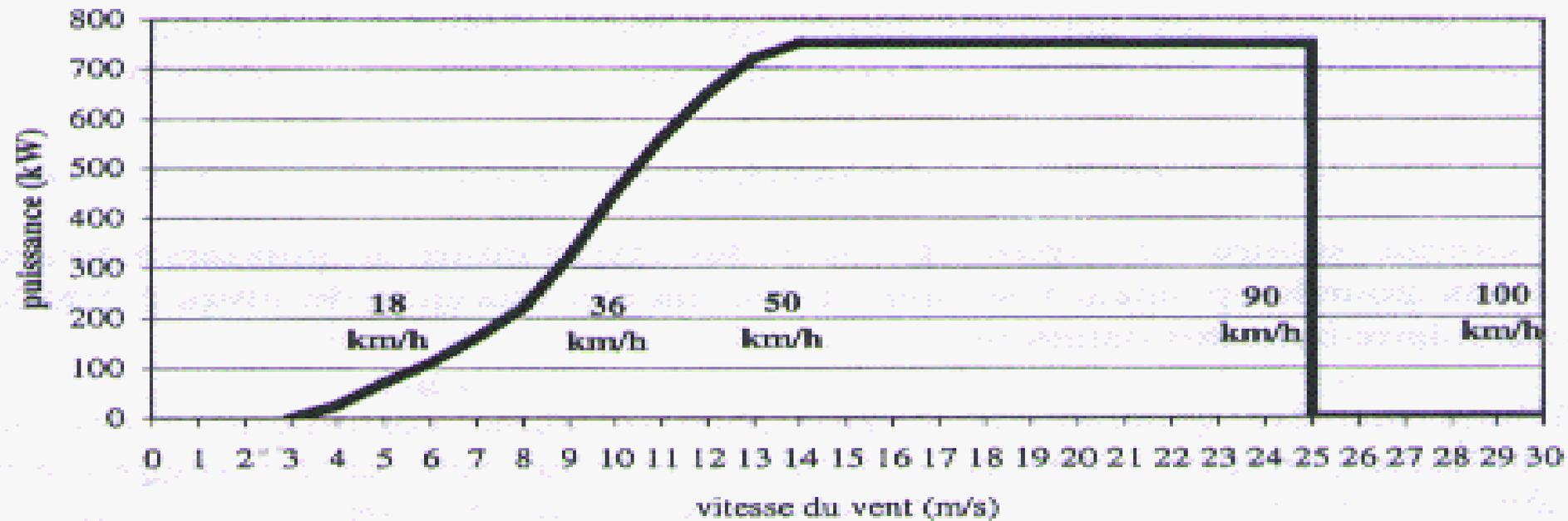
Boeing 747-200

Arklow Banks Windfarm  
The Irish Sea

Photo: R. Thresher



# Rendement



# Parcs éoliens

- Vitesse de sortie du vent sous le vent:  $V/3$
- Distance entre éolienne: environ 5 diamètres des pales
- Distance entre rangées: 3 à 9 D
- Exemple: Eoliennes de 1 MW espacées de 250 m, et en rangées espacées de 250 m soit 0,016 kW/m<sup>2</sup> (10 fois moins que PV)

# Ressource

kwh/m<sup>2</sup> de surface brassée.

Les meilleurs sites, en France :

5000 kwh/m<sup>2</sup>

Une éolienne de 1000 m<sup>2</sup>, :

Puissance : 1 Mw crête

Produit : 5 Gwh/an.

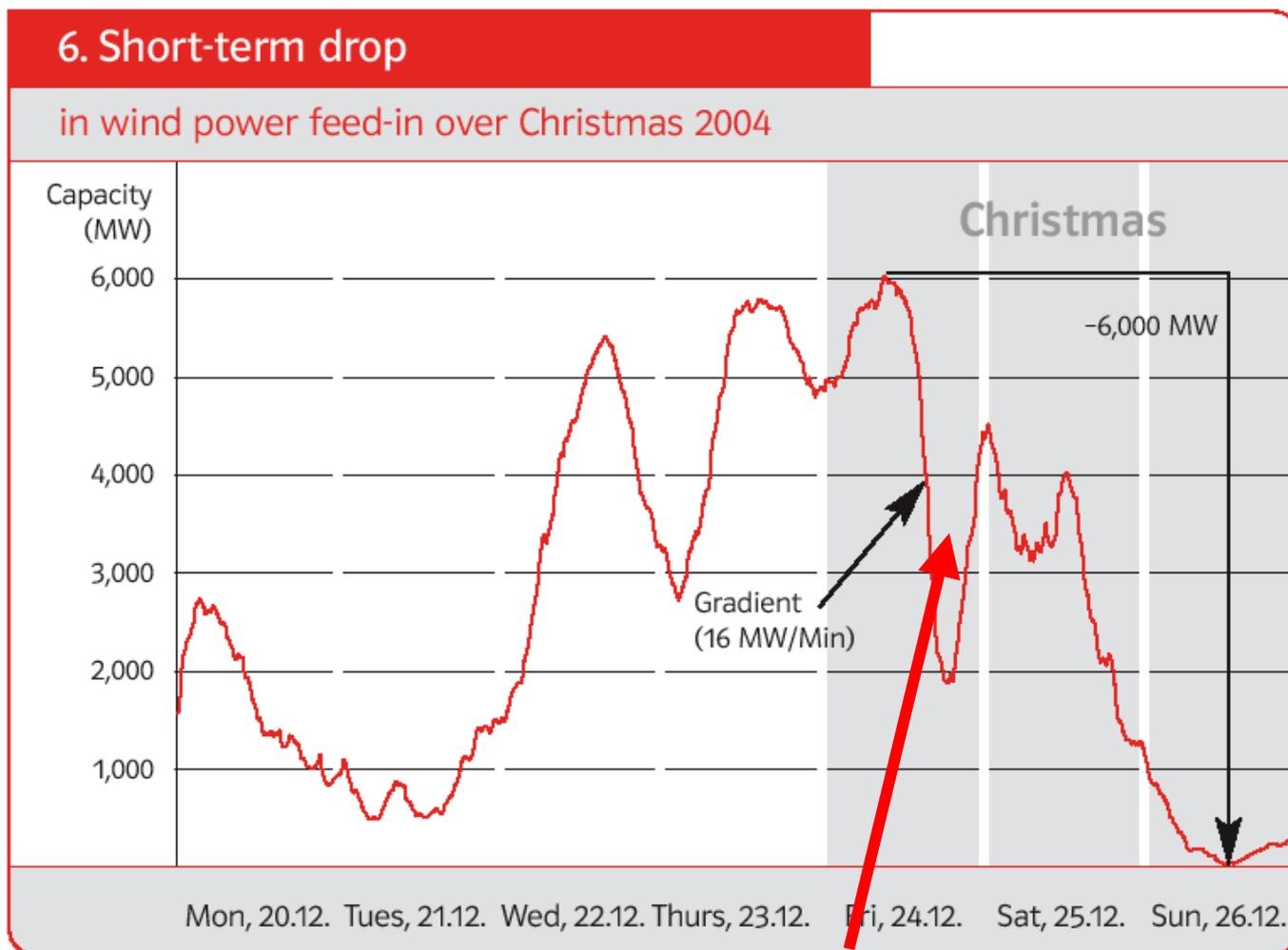
Empiètement au sol : 8 ha/MW,

Production de 60 kwh/m<sup>2</sup>/an.

Photovoltaïques : 300 kwh/m<sup>2</sup> /an.

- Potentiel de production France :
  - 66 TWh/an à terre
  - 97 TWh/an offshore peu profond
- 20 réacteurs nucléaires
  - 100000 éoliennes
  - 5000 kms de côtes
  - densité: 20 éoliennes par km
- Coûts si reliée au réseau:
  - 0,05 Euros/kwh sur un bon site (cf. 0,03)
- Energie intermittente

# Puissance éolienne délivrée: détail

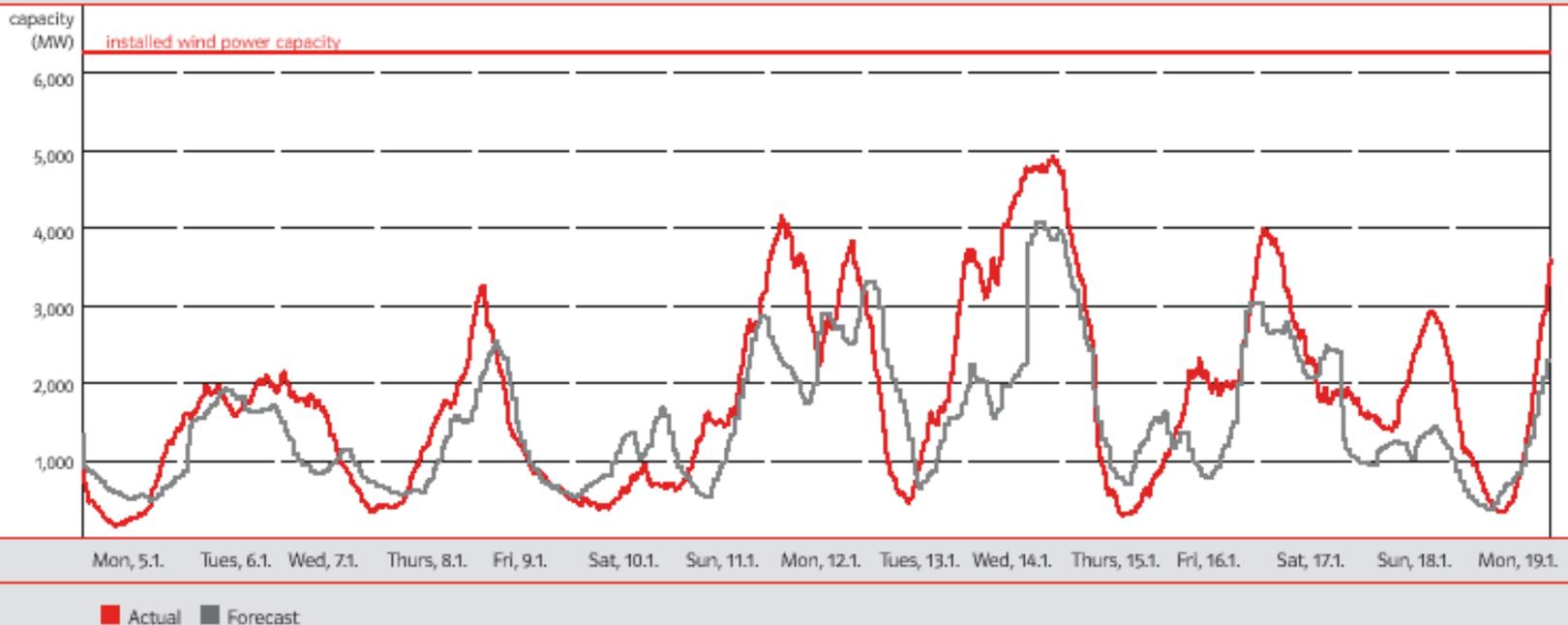


**Pente: 1000 MW/h**

# Fiabilité de prévision de la puissance éolienne

## 8. Limited accuracy of the weather forecast

limits the accuracy of the wind power forecast - example: E.ON control area, 5 to 19 January 2004



# Thermique évité

$$W_{eole} \frac{W_{thermique}}{W_{nucleaire} + W_{thermique} + W_{Hydro}}$$

$$0,1 W_{eole}$$

# Le cas Danois

- 2000 MW éolien = Puissance de 2 réacteurs 1GWe  
Mais 3,7 TWh = production de 0.5 réacteur
- 8% de l'électricité danoise
- 4% Biomasse
- Economies (Electricité deux fois plus chère)
- Co-génération
- Coût annuel du programme danois: 1,4 Geuros
- Consommation énergétique/tête :  
17% de moins que la France
- CO2/tête: 50% de plus que la France

# Le coût d'achat du MWh éolien en Allemagne

## 2005 EEG charge

2005 EEG wind power feed-in charge (Germany)	approx. € 2.7 bill.
- of which in the E.ON Netz control area	approx. € 1.2 bill.
Total EEG feed-in charge in Germany (all types of generation)	approx. € 4.4 bill.

Source: VDN forecast 10/2005

## Rénumération des fermes éoliennes:

-Allemagne: 2,7 milliards € pour 26.000 MWh soit 103 €/MWh

### Comparaison nucléaire France:

Base	→ 26
7000h	→ 32
5000h	→ 45
3000h	→ 68

# Eolien en France: un bon investissement? Pour qui?

- **Eoliennes terrestres:**

année 1 à 10 : 82 €/MWh

année 10 à 15 : 82 si moins de 2400 h/an

: 82 à 68 de 2400 à 2800 h/an

: 82 à 28 de 2800 à 3600 h/an

: 28 à plus de 3600 h/an

- **Outre-mer:** : 110 €/Mwh

- **Eoliennes marines:**

année 1 à 10 : 130 €/MWh

année 10 à 20 : 130 €/MWh si moins de 2800 h/an

: 130 à 90 de 2800 à 3200 h/an

: 130 à 30 de 3200 à 3900 h/an

: 30 au delà de 3600 h/an

**Crédit d'impôt sur l'investissement: 40%**

**Programme PPI: 22000 GWe en 2015**

# Coûts Bénéfices en France

- Limite puissance totale: 30% de la puissance réseau  
Soit 25 GWe
- Rendement maxi: 30%
- Energie Max délivrée: 10% soit 50 TWh (5 EPR)
- Thermique évité: 5Twh (soit 0.5 EPR)
- Coût 25 Geuros, soit entre 8 et 9 EPR
- Puissance thermique max appelée: 12 GWe=8 EPR

## Puissances installées

	Puissance (MW)	Energie (TWh)	Heures équivalentes pleine puissance
	(1999)		
Allemagne	4445	6,60	1480
Danemark	1742	3,35	1900
Espagne	1530	2,51	1640
Etats Unis	2492	4,41	1770

# Perspectives

- Danemark :
  - 17 % puissance électrique
  - 5 % énergie électrique
  - 2 % énergie totale
- France:
  - Eole 2005 ~ 1 TWh/an
  - objectif 2010 ~ 10 TWh/an
- Europe : potentiel 200 TWh/an (0,045 Gtep/an)
- Monde: potentiel ~0,5 Gtep/an

# L'éolien en France et en Europe

- Besoin d'une source de secours pendant les 2/3 du temps:
  - ❖ 1er Choix: hydro
  - ❖ 2ème choix: gaz
  - ❖ 3ème choix: nucléaire
- Difficultés de gestion du réseau
- Différence de situation entre différents pays
- Coût du programme français: 20 GEuros sur 20ans
- Coût du programme européen: 150 GEuros

# Hydroliennes

- Choix de sites à fort courants: ex.:La Hague
  - Courant de marée 15 km/h max.
  - $R=20\text{m}$
  - $P_{\text{max}}=6,5 \text{ MW}$
  - $P_{\text{moyen}}= 1,6 \text{ MW}$
- Potentiel français: 3 GW
- Gulf Stream: 8 km/h 100km\*20km
  - Projet 1500 MW 600 Meuros
  - Courant continu



# Biomasse

# Stock

1 800 Gigatonnes

Le flux de matière :

- 570 Gt/an (humide)
- 170 Gt/an (sec)
- 100 Gtep/an .

prélèvements humains:

alimentation : 2,1 Gtep

matériaux : 0,4 Gtep

énergie : 1,3 Gtep

*(1,1 Gtep dans les PVD sous forme de bois de feu).*

**total : 3,8 Gtep, 6 p. 100.**

# Scénario de la Conférence de Rio pour l'horizon 2050

- triplément des prélèvements pour la nourriture
- quadruplement de ceux pour les matériaux sur la même période,

Prélèvements de 11 Gtep,  
soit 18 p. 100 de la ressource annuelle disponible.

# Potentiel réaliste mobilisable

## Monde

2,23 Gtep dont 1,6 forestier (Monde)

Total possible (énergie): 3,53 Gtep

## Europe (15):

- Forestier: 63 Mtep
- Herbacé: 20 Mtep
- Plantes énergétiques: 52 Mtep

Production actuelle: 37 Mtep

Total: 172 Mtep (12% consommation)

# Rendements

rendement annuel : 2 t/ha à 20 t/ha,

Colza: 3t/ha    Blé: 9t/ha

3,6 à 7,2 tep/ha , 40 à 80 Mwh/ha.

rendement de la biomasse : 0.2 à 0.5%.

rendement électrique maximum : 0.2 %.

Une centrale produisant 7 Twh/an : 2500 km<sup>2</sup>.

Surface emblavée en France :

45000 km<sup>2</sup>= 20 centrales

# Bio-carburants

- Bio-gaz: 0,05 E/kWh sur place, bois gratuit
- Bio-carburants: 0,5E/litre
  - Rendements énergétiques:
    - Bio-éthanol: 1,2 à 1,5
    - Ester de Colza: 2
- Programme OPECST:
  - 40000 km<sup>2</sup>=10 Mtep
  - Mais rejets GES? (prairies, engrais....)

# LA BIOMASSE

## Inventaire du potentiel national

- Selon :
- \* (1) X. DEGLISE, J. LEDE, *Entropie* n° 94 (1980)
  - \* (2) R. DUMON
  - \* (3) *Débat énergie et environnement SOUVIRON* (1994)
  - \* (4) *Rapport CEE* (octobre 1998)
  - \* (5) *Biomasse Normandie* (1994), d'après ministère de l'agriculture, ADEME, AFOCE.

	Mm <sup>3</sup>	Mtonnes
♦ <b>PLAQUETTES FORESTIERES</b>		
-Rémanents (2)	4	
-Eclaircies de plantation (2)	2	
-Taillis (potentiel 50 Mm <sup>3</sup> ) (1)	10	
	<hr/> 16	8
♦ <b>DECHETS DE 1ère et 2ème TRANSFORMATION (1)</b>		
-Ecorces, délignures, sciures	Non utilisés	7
-Copeaux, chutes, rebus	Mal utilisés	5
	<hr/> 12	6
♦ <b>DECHETS INDUSTRIELS BANALS (3)</b>		
-40 Mt dont 25% disponibles (bois en fin de cycle)		10
♦ <b>DECHETS MENAGERS (3)</b>		
-20 Mt dont 60% disponibles		12
♦ <b>RESIDUS AGRICOLES (2). (4)</b>		
-Paille et tiges de céréales, maïs et oléagineux		
-Taille, noyaux, coquilles, ...	43 Mt dont utilisables	19
♦ <b>CULTURES ENERGETIQUES (2). (4)</b>		
-Taillis à courte révolution (peupliers, eucalyptus, saules)		
-Plantes herbacées (canne de Provence, céréales)		<hr/> 36
		<hr/> 91

✚ Soit équivalent à 40 Mtep en énergie primaire  
ou 20 Mtep en énergie finale



## Besoins en eau de la biomasse\*

Il faut 10 000 m<sup>3</sup> d'eau pour produire 1 tep (céréales, oléagineux, betteraves)

En doublant le sur-pompage actuel (160 milliards m<sup>3</sup>) on ne produirait que *18 Mtep* !

**L'eau est le facteur le plus limitatif pour les biocarburants !**

La dépense en énergie pour le pompage (hauteur supposée de 10 m) est de **0,12 tep** par tep produit ; à cela, il faut ajouter les autres consommations d'énergie (engins, transport, transformation...)



Solaire

- Puissance du rayonnement solaire perpendiculaire aux rayons :  
1 kW/ m<sup>2</sup>.
- Utilisable (Var) :  
1800 kwh/m<sup>2</sup>/an
- rendement photovoltaïque de 15% :  
270 kwh/m<sup>2</sup>
- Chauffage solaire:  
500 Kwh/m<sup>2</sup>

# Centrale

Une centrale :

7 Twh/an (4 Gwc) 26 km<sup>2</sup>

Coût élémentaire :

3Euros/wc (550 Euros/m<sup>2</sup>).

Coût de la centrale :

15 GEuros.

Energie intermittente

# Maison individuelle (hors subventions)

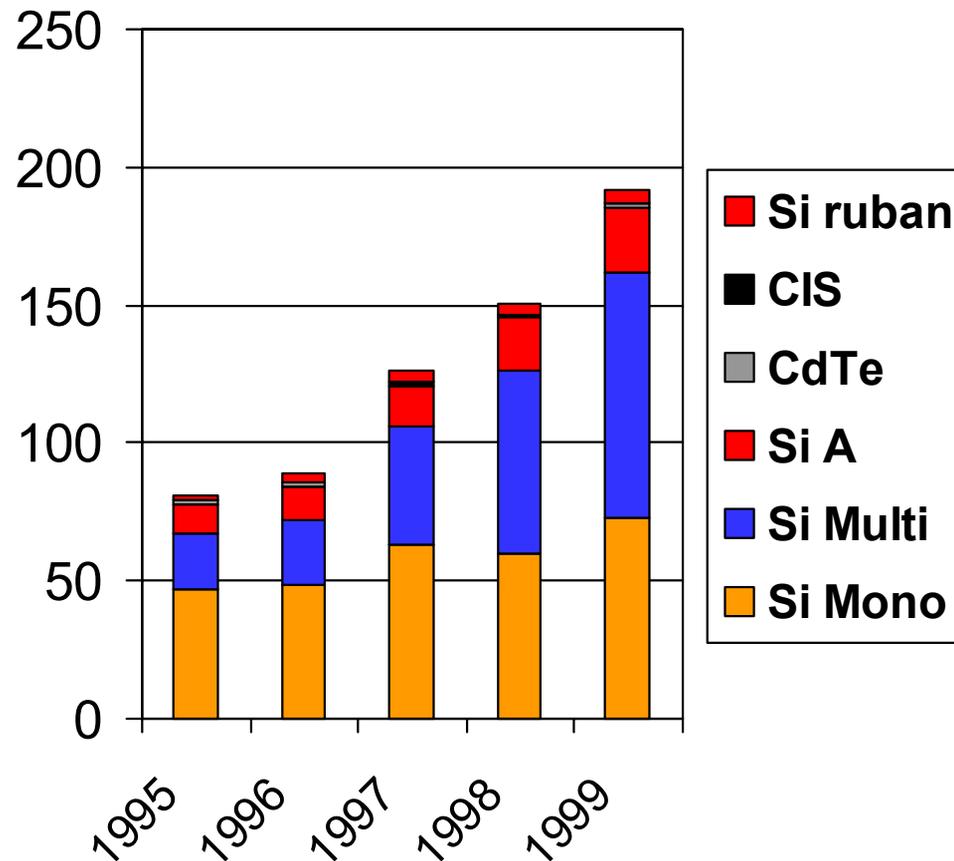
- 10000 kWh
- 40 m<sup>2</sup> de capteur
- Prix des capteurs: 25000 Euros
- Structure
- Intérêts
- **Energie intermittente**
- 0,3 Euro/kWh (sans stockage) (cf:0,06-0,1)
- 1,5 Euro/kWh (avec stockage)

# Données de base

- Une cellule délivre un courant continu (0,8V-1 Wc) proportionnel à l'éclairement reçu
- Un assemblage « série / parallèle » donne les courants et tensions souhaités : typique 12V-50Wc
- Un module photovoltaïque (typique 0,4 m<sup>2</sup>) délivre :
  - environ 40W en plein soleil (rendement 10%)
  - entre 120 et 180 Wh par jour, ou 50 kWh par an
- Un module coûte (en quantité) : 150 Euro soit 3 Euro/Wc
- Stockage associé : 50 à 150Ah, soit 5 à 15 jours

# Les technologies actuelles du solaire photovoltaïque

- Le silicium cristallin : domine, à + de 80%
- Le multicristallin : croît plus vite que le monocristallin
- Le silicium amorphe : 40% servent à calculatrices, etc..
- Le CdTe et le CIS ont encore une part limitée



# Les verrous technologiques de l'électricité solaire photovoltaïque

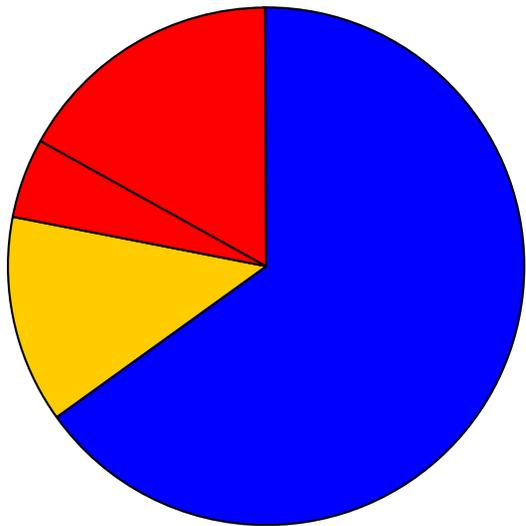
1. Coût et fiabilité du stockage
2. Coût modules photovoltaïques
  - silicium cristallin: ressource en Si électronique
  - couches minces : choix d'une filière
  - matériaux organiques : balbutiant
3. L'utilisation : R&D absente
4. L'intégration au bâti

# Facteurs Technico- économiques

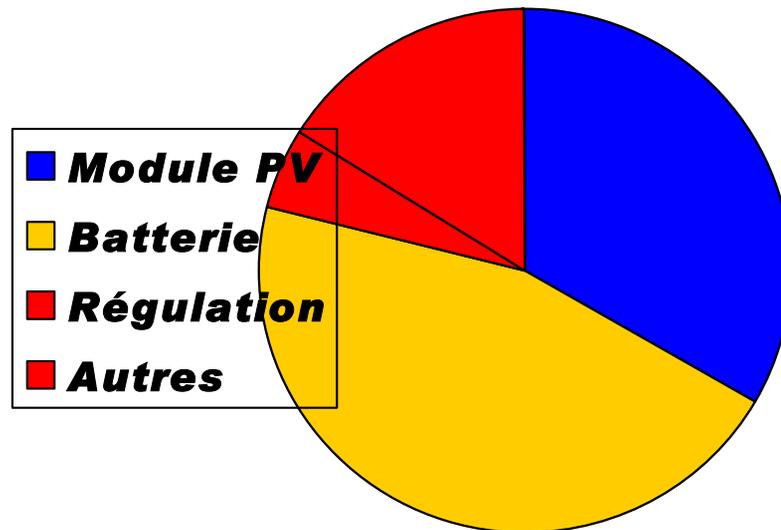
	Raccordé	Autonome
Eléments prix du kWh	Prix module Durée de vie Taux argent Substitution	Idem + Stockage
Substitution Taux :	Toît, façade 10 à 100%	Service, Réseau >100%
Prix mini kWh Problème n°1	0,3 Euros Module Intégration	1,5 Euros Stockage $\rho$ utilisation

# LES COÛTS DES SYSTEMES AUTONOMES

Répartition de l'investissement initial



Répartition des coûts sur le cycle de vie



Les modules représentent :

2/3 de l'investissement initial,  
1/3 des coûts complets

# **Les applications de l'électricité solaire photovoltaïque**

- **En sites isolés**
  - Les applications professionnelles (balises, télécommunications, mobilier urbain)
  - L'électrification rurale, dans les pays industrialisés (les écarts) et dans les pays en développement
- **En couplage sur un réseau électrique**
  - Les systèmes individuels : 1 à 10 kW
  - Les centrales de puissance : 100 kW à 10 MW (long terme)

# Le marché des applications en sites isolés

- Les applications professionnelles
- L'électrification rurale décentralisée :  
2,5 milliards d'habitants sont sans électricité

*Programmes :*

- Solar Initiative (Banque Mondiale) : 1 million d'installations en cours. 400 millions à réaliser à 220 € : 90 G€
- CEE : « Power for the World »  
10 W/personne, 10 GW, 7 €/W, 75 G€

Le coût du PV pour l'utilisateur est équivalent à celui aujourd'hui des piles chimiques, batteries, kérosène pour lampe pour un service bien meilleur.

# **Exemples de programmes de raccordement réseau :**

- **Réalisations effectuées :**
  - **Allemagne : 2 500 toits en 1999 - 15 000 en 2000**
  - **Japon, Suisse et Hollande : quelques milliers par pays**
  - **France : 130 à fin 1999**
- **Programmes en cours ou prévus :**
  - **Japon : 70 000 toits ( 12 000/an)**
  - **Allemagne : 100 000 toits, lancé début 1999**
  - **Hollande, Espagne et Italie : 10 000 toits**
  - **Objectif CEE et USA : 500 000 toits**

# Futur du raccordé au réseau

- Obligation toit coté sud en photovoltaïque?
- 50 m<sup>2</sup> à surcoût 600F/m<sup>2</sup> (1500 F aujourd'hui) = 30 000 F
- Réduction d'impôt diminuant le montant
- Production : 6 000 kWh/an = consommation hors chauffage
- Stockage intersaisonnier par grande hydro?

# **Futur du photovoltaïque autonome**

- Petite ou grande part des nouveaux marchés des Pays en Développement :
- Multiplication des applications dans la vie courante : matériels portables, réseau domestique de sécurité, électroniques variées...
- Multiplication des intégrations (plastique, tissus, etc...)

# Conclusion : Points clés du photovoltaïque

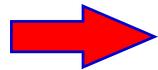
- Imbattable en terrain vierge pour  $< 2$  kW
- Imbattable pour usagers  $< 10$  kWh/mois
- Sans concurrence pour 1/3 de l'humanité
- Cher, mais sans inconvénients ni limites
- Croissance rapide (30%/an) mais artificielle.
- Handicap : stockage

⇒ Sur réseau : sera un jour le toit standard ?

⇒ En PED : sera l'énergie standard ?

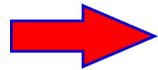
# 52-05 **Le solaire thermique**

## ***Le marché de la chaleur est important***



### **Exploitation passive : architecture**

(10% d'économie pour l'Europe en 1990)



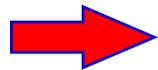
### **Capteurs solaires**

(eau chaude sanitaire, planchers chauffants)

Environ 4 à 5 m<sup>2</sup> de capteurs pour produire l'eau chaude sanitaire d'une famille de 4 personnes

### **Centrales solaires**

On concentre l'énergie du soleil. On atteint des températures dépassant 1000°C



354 MW installés en Californie

En France il a eu Themis à Font Romeu (2,5 MW)

Rendement 10-15%, 9 à 15 c€ le kWh

# Solaire thermodynamique

- Nécessité de la présence de soleil
  - (chaleur diffuse inexploitable)
- Nécessité de suivre le soleil
- Transformation de la chaleur en électricité
- Encombrement au sol:
  - miroirs+structures+espaces inter-miroirs
  - 70 (France) à 110 kWh/m<sup>2</sup> au sol soit environ 5%
  - Deux fois moins que le PV

# Systemes paraboliques

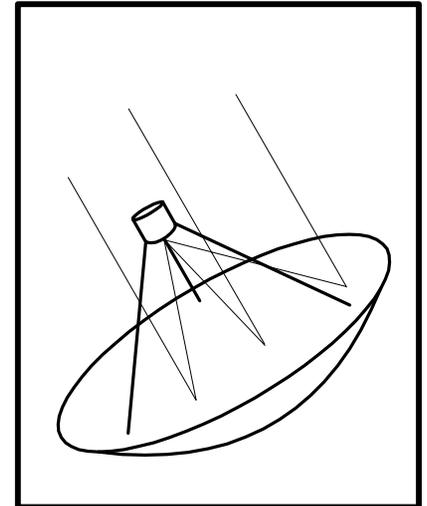
Paraboles

Petits systemes

Moteurs Stirling

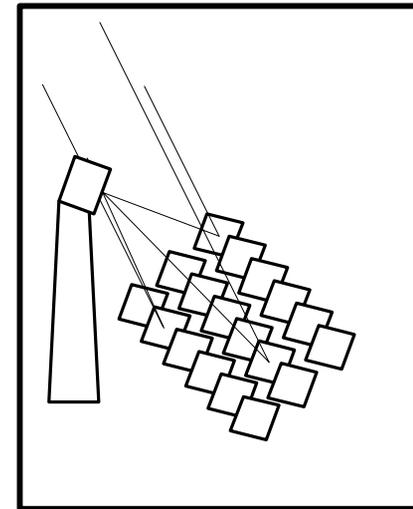
Pas de stockage

En developpement



# Centrales à tour

- Grandes installations
- Fluide de refroidissement  
Sodium, Sels fondus, Air, vapeur
- Rendement des miroirs: 20%
- Stockage de chaleur possible
- Suivi du soleil
- Rendement thermodynamique: 40%



# Capteurs cylindriques

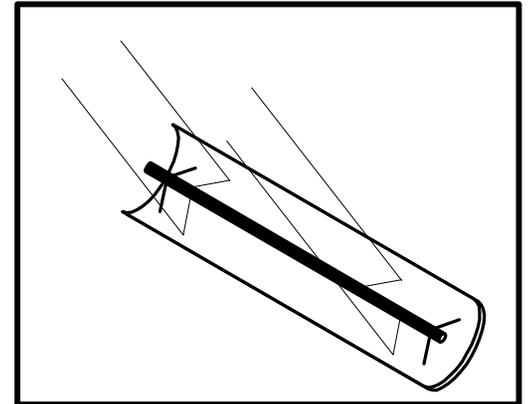
Orientation est-ouest

Mouvements lents et simples

Rendements des miroirs: 8-12%

Caloporteurs organiques

Rendement thermodynamique: 37%



# Coûts

- Luz (Californie) 350 MW
- Vente obligatoire à 0,20 Euros/kWh
- Non rentable

# Les tours solaires

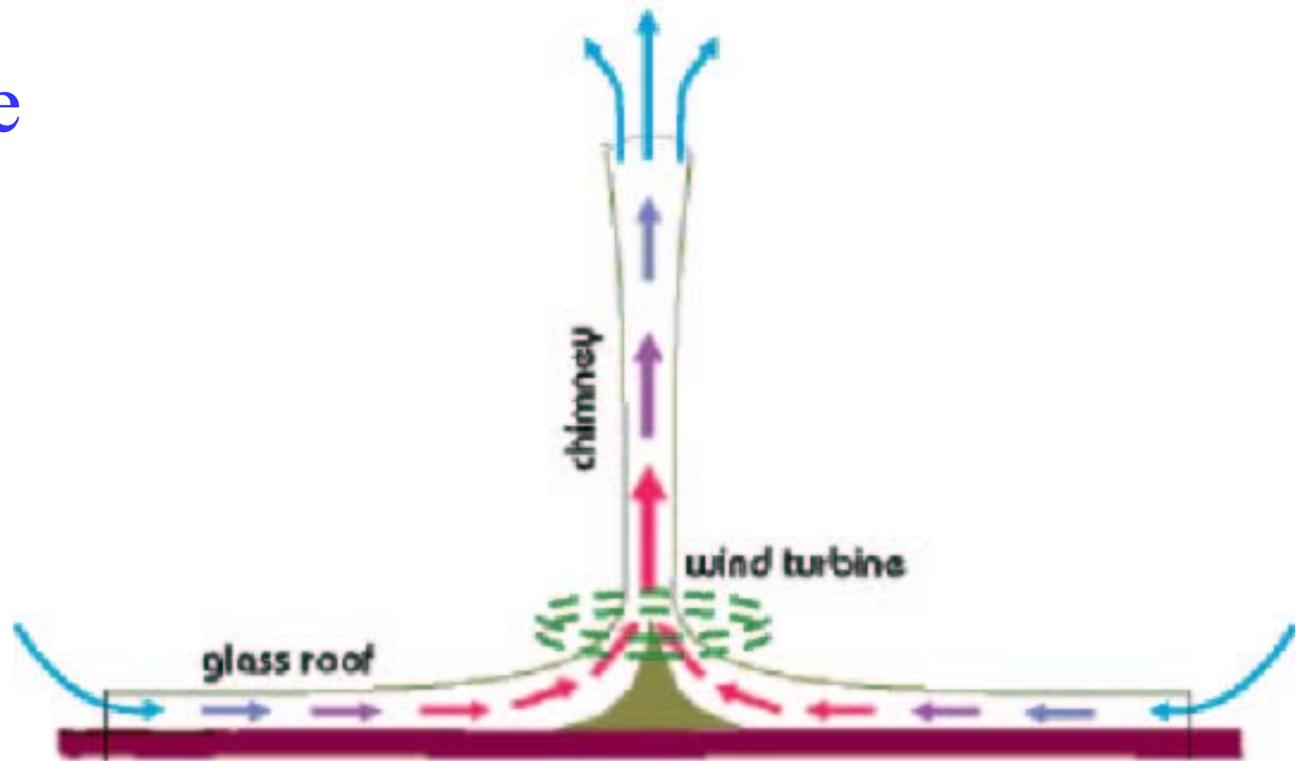
# La tour cheminée

$H=1\text{ km}$

$D=100\text{ m}$

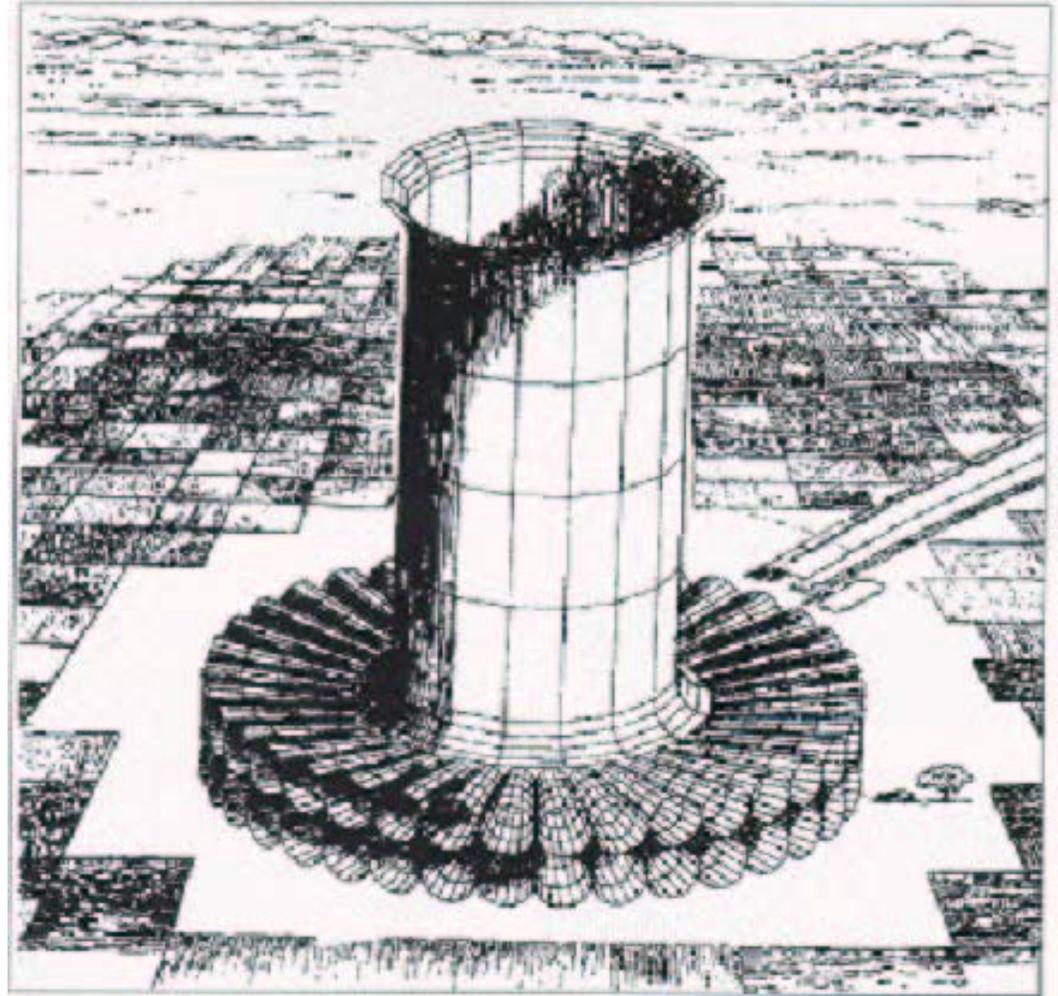
$S=10\text{ km}^2$

$W=100\text{ MWe}$



# SNAP (SNeh Aeroelectric Power

SNeh= Buisson Ardent



H=1200m

D=400m

P(net)=400 Mwe

« Surface au sol »=1,8 km<sup>2</sup> (d=750m)



# Géothermie

# La ressource

- Gradient de température moyen:  $3\text{d}^\circ/100\text{m}$
- Points chauds(zones volcaniques, panaches)
  - Pouvant atteindre 10 et même  $100\text{d}^\circ/100\text{m}$
- Flux moyen d'énergie géothermique:  $0,05\text{W}/\text{m}^2$
- Durée de vie des sites: quelques dizaines d'années

# Les types de gisements

- Basse enthalpie: 80 d° à 2500m.
  - Chauffage
  - Nombreux sites possibles
- Haute enthalpie: 300d° à 1000m.
  - Electricité
  - Sites rares (Islande, Lardarello, Bouillante))
    - Points chauds: Soultz la Forêt

# Techniques

- Production de vapeur sèche (Lardarello)
- Eau Chaude (vaporisation partielle)
- Roches chaudes sèches
- Nécessité de fissurer la roche
  - Envoi d'eau ou de vapeur sous pression
  - Cycle fermé avec échangeur
  - Soultz la Forêt: 3500m., 200 d°C, 50MWth, 10MWe

# Production (2002)

	Amérique du Nord	Amérique du Sud	Asie	Europe
Production TWh	21,1	1	12,5	5



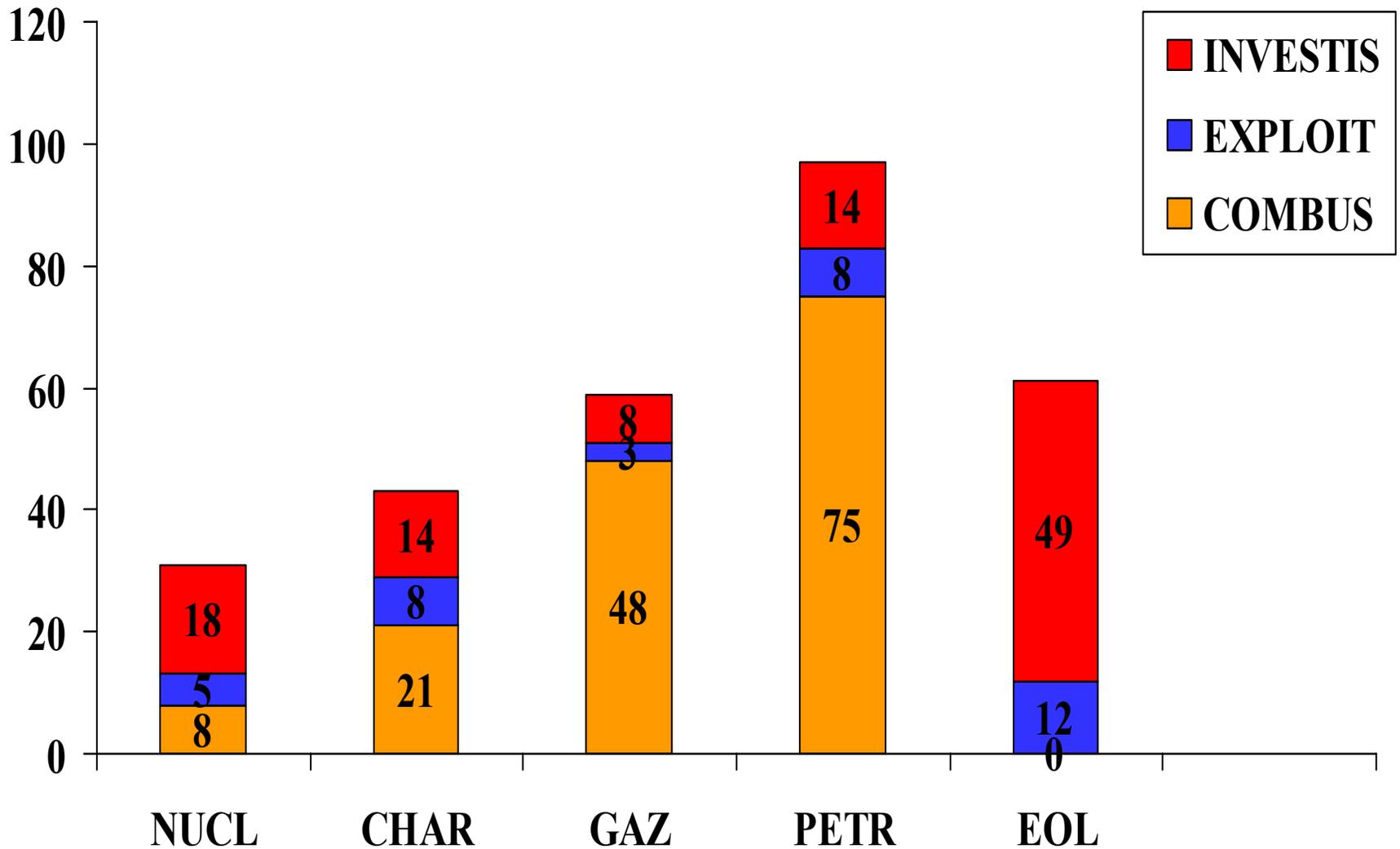
# Coûts

# Investissements

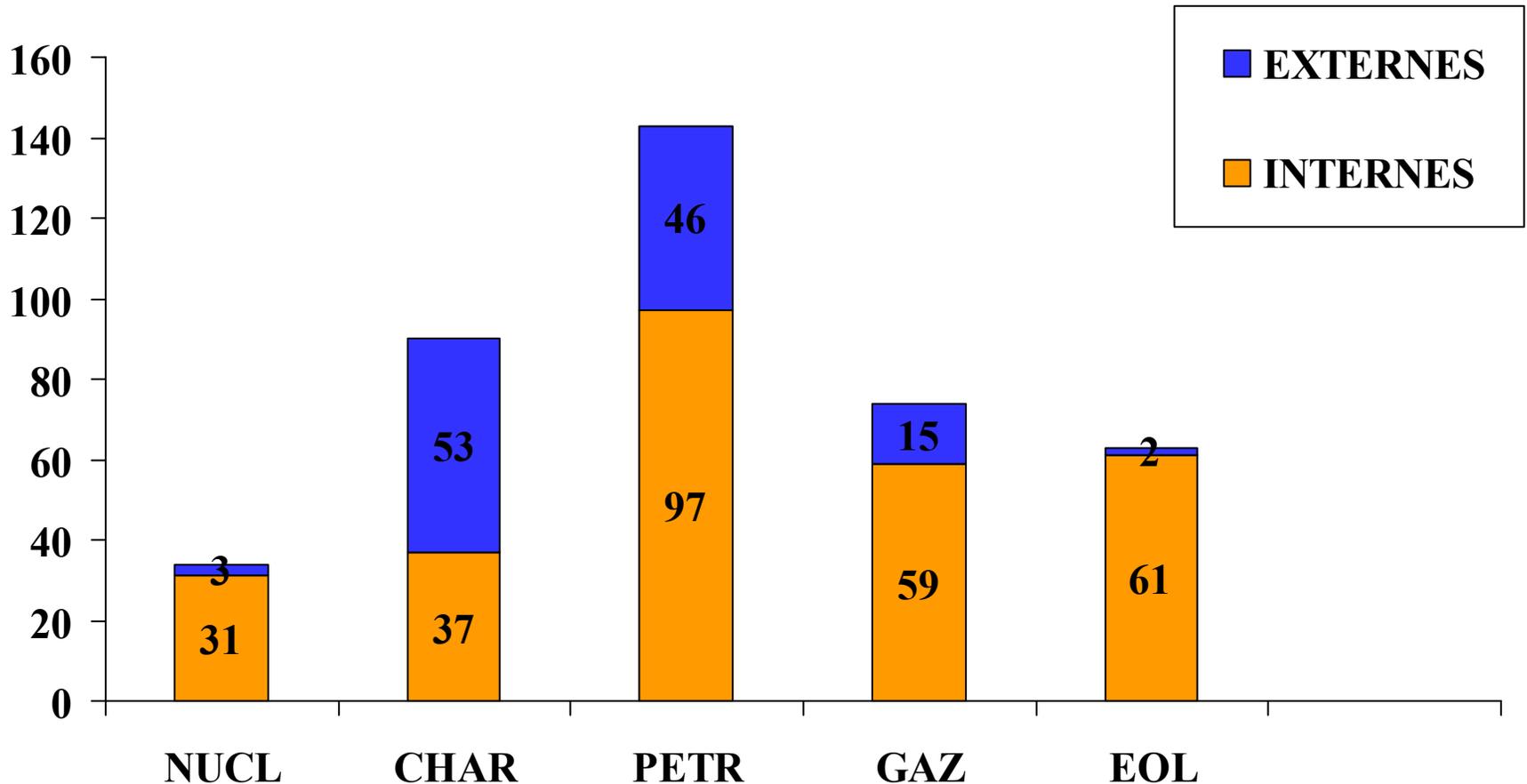
Production de 7 Twh/an (un réacteur de 1 Gwe

- Gaz= 0,5 GEuros
- Nucléaire= 1,5 GEuros
- Eolien= 3,8 GEuros
- Solaire= 15 GEuros

# Coûts totaux internes



# Coûts totaux (externes+internes)







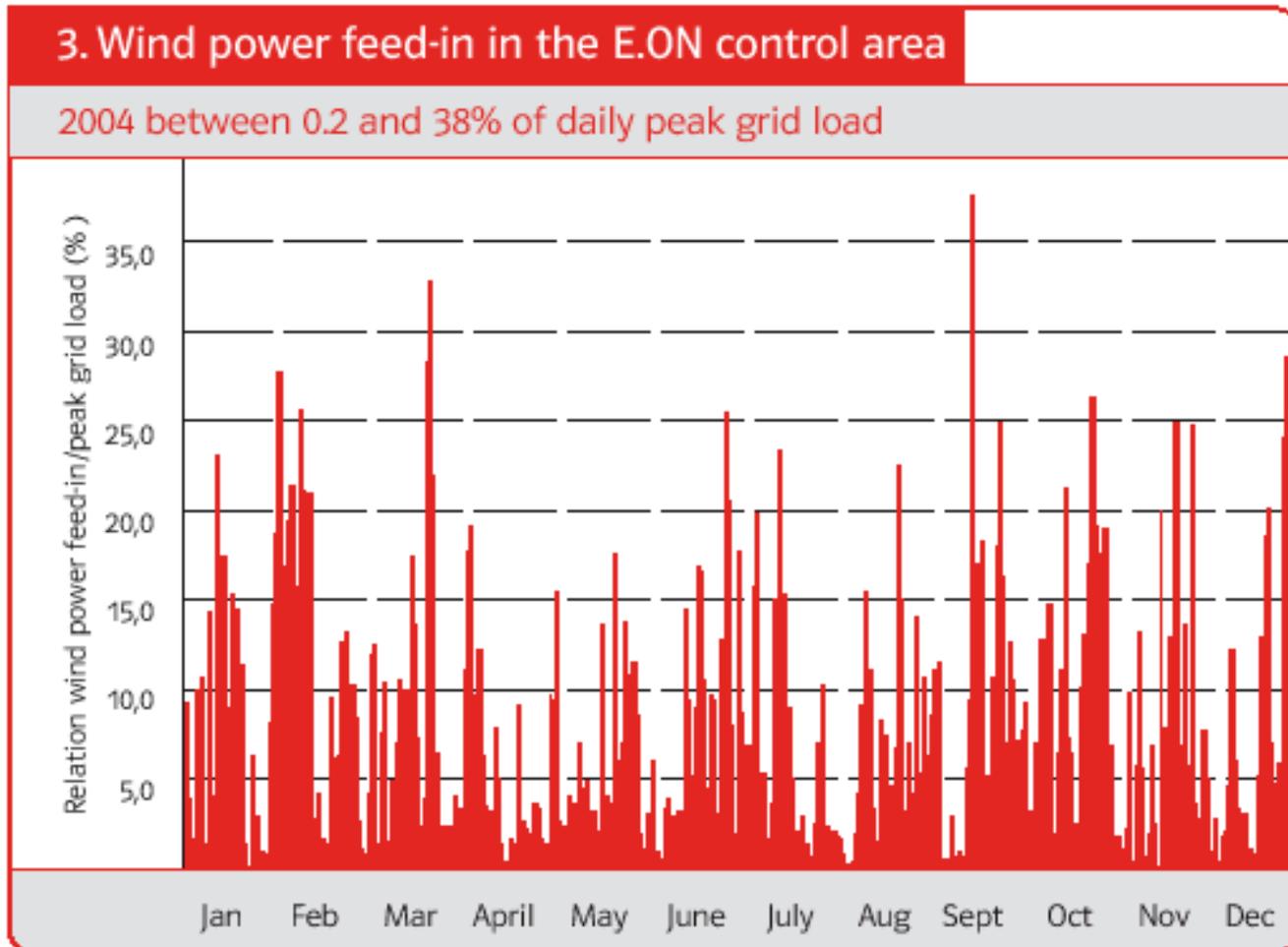
# Autres ER

- Energie des marées
- Energie des vagues





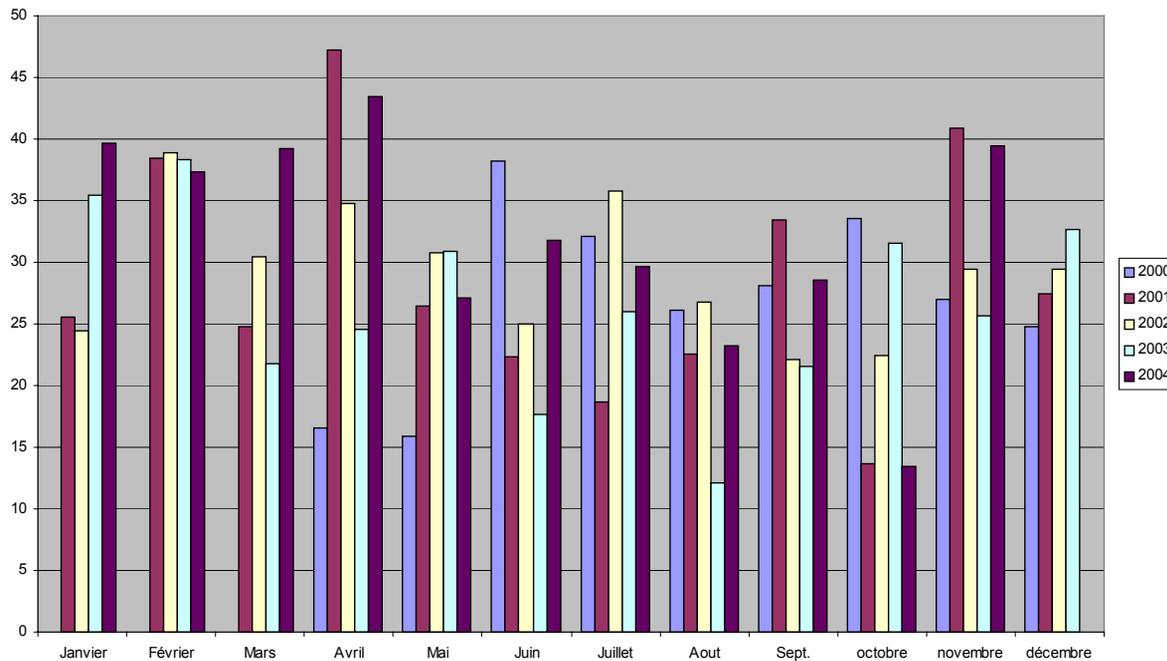
# Puissance éolienne E-ON sur un an (max théorique: 7.558 MW)



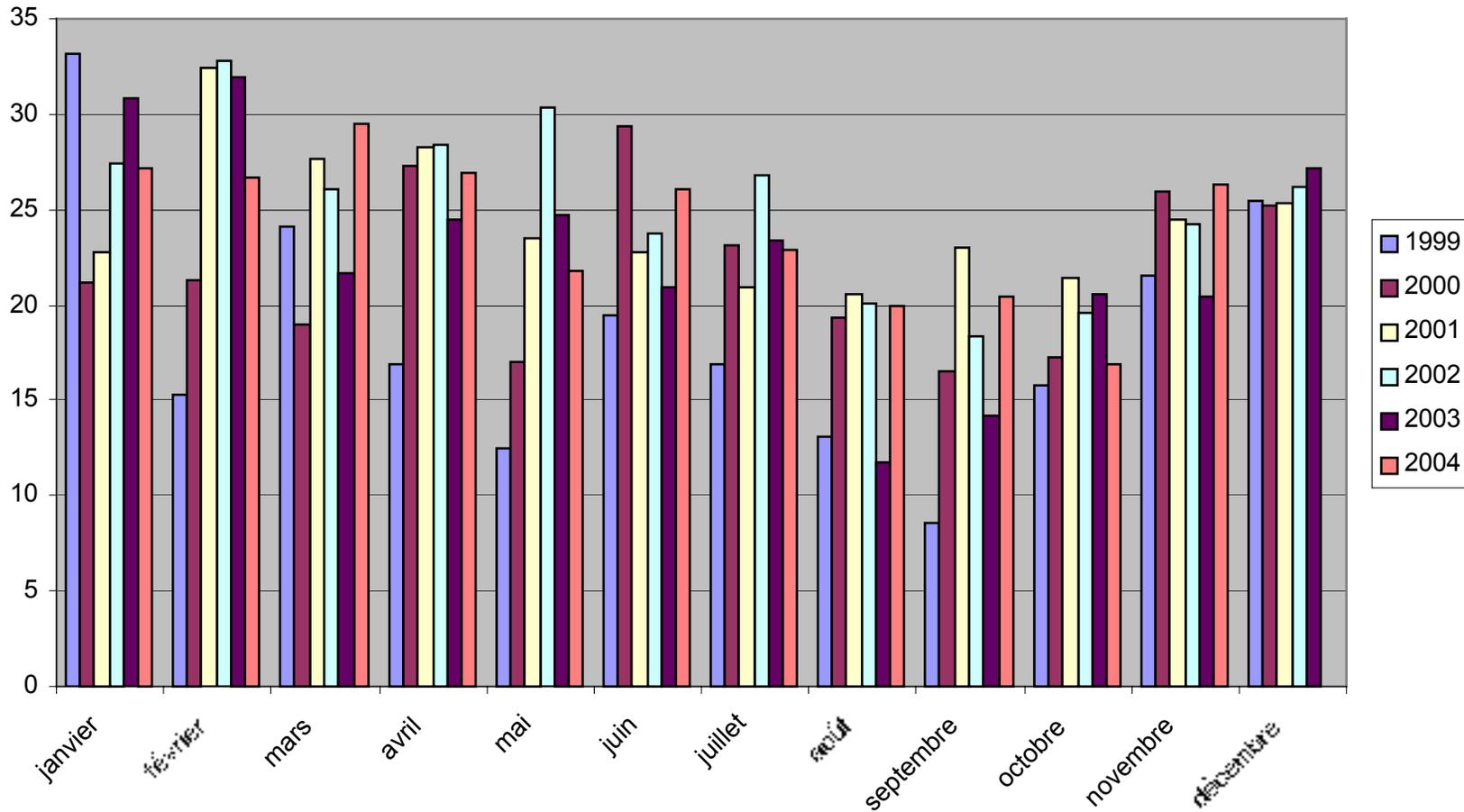
**Puissance installée: 33.200MW dont éolien 7.558 MW (23%)**

**Production: 271.300 MWh dont éolien 11.300 MWh (4,16%)**

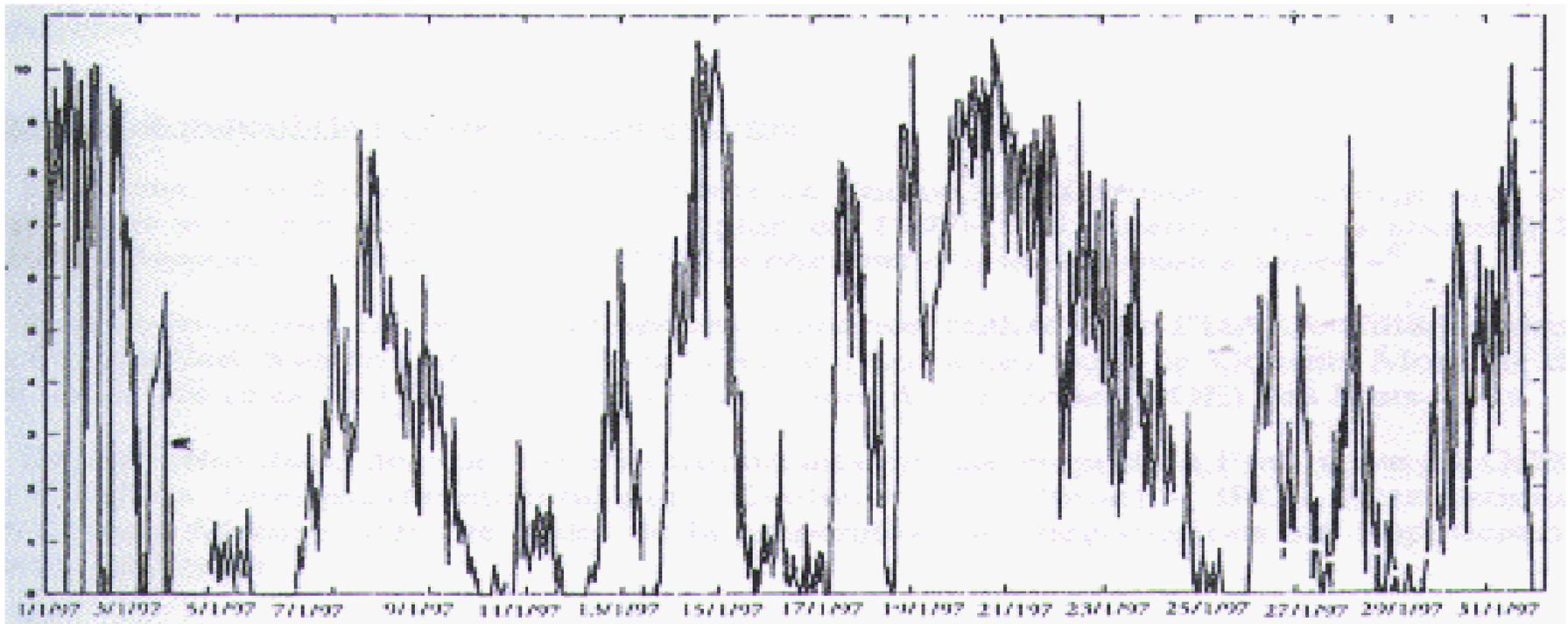
# Rendement en Languedoc



# Rendement mensuel des éoliennes



# Variation des vitesses du vent pendant le mois Janvier 1997



# Variations journalières Allemagne

Estimations relevées le 24/10/2001

Estimation de la puissance éolienne :

10h – 4,4 GW

13h – 5,5 GW

14h – 4,2 GW

15h – 5 GW

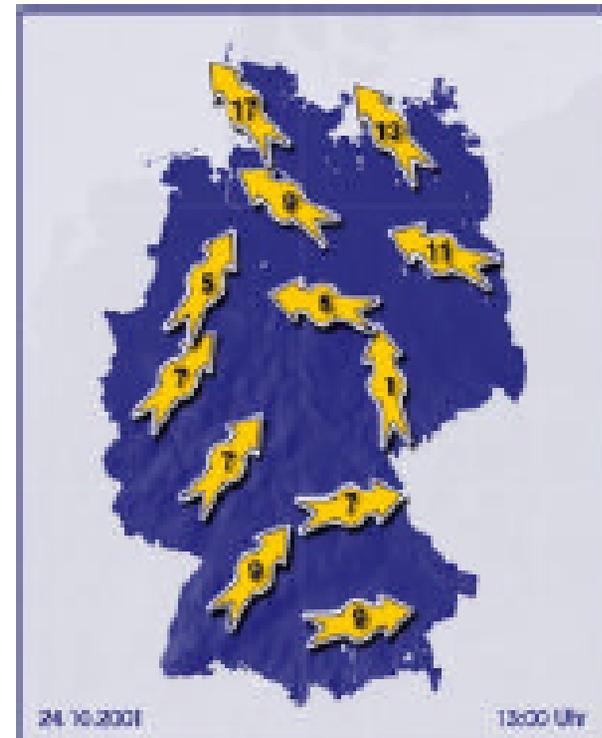
16h – 5,4 GW

17h – 3,8 GW

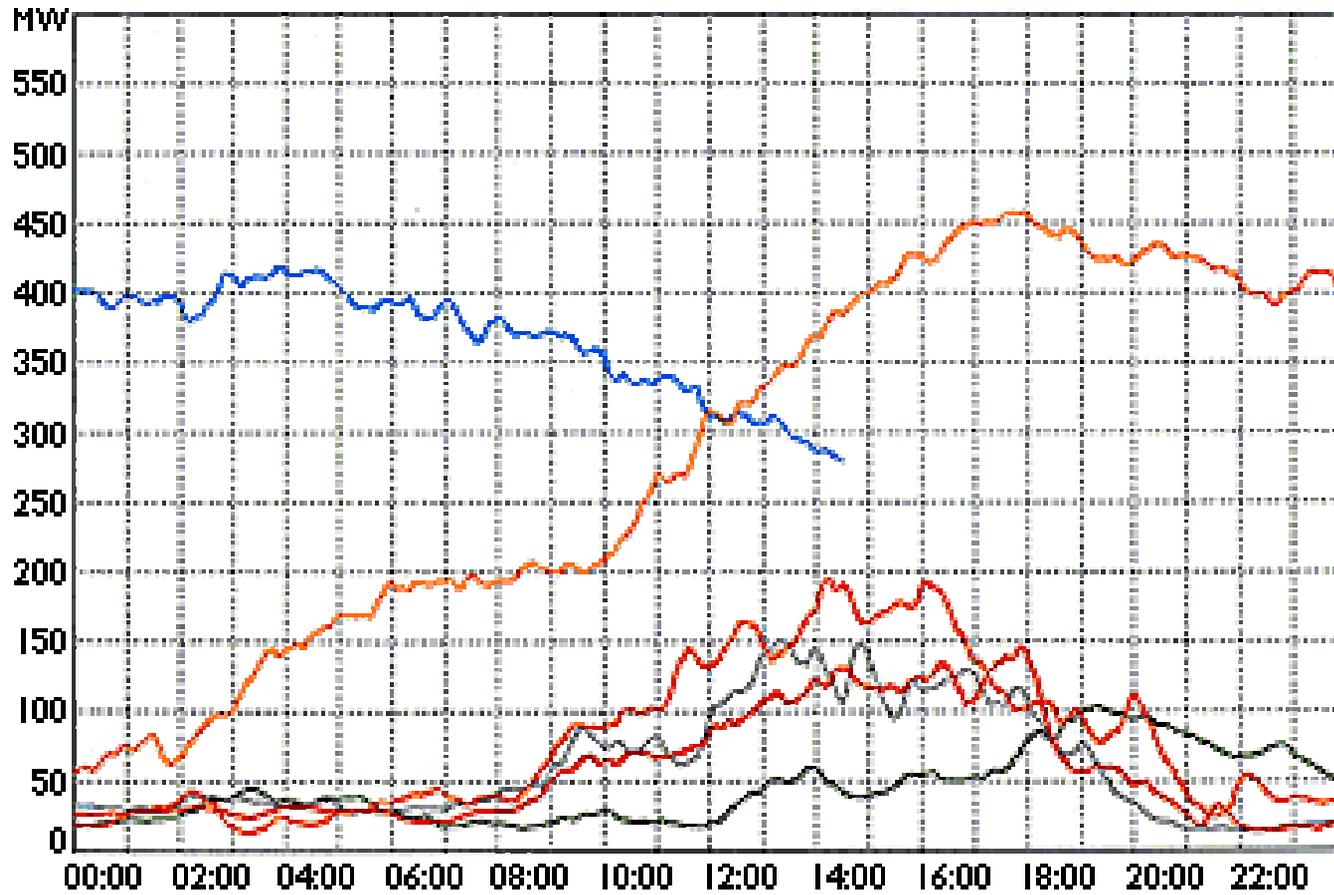
18h – 4,4 GW

*Source données météo :*

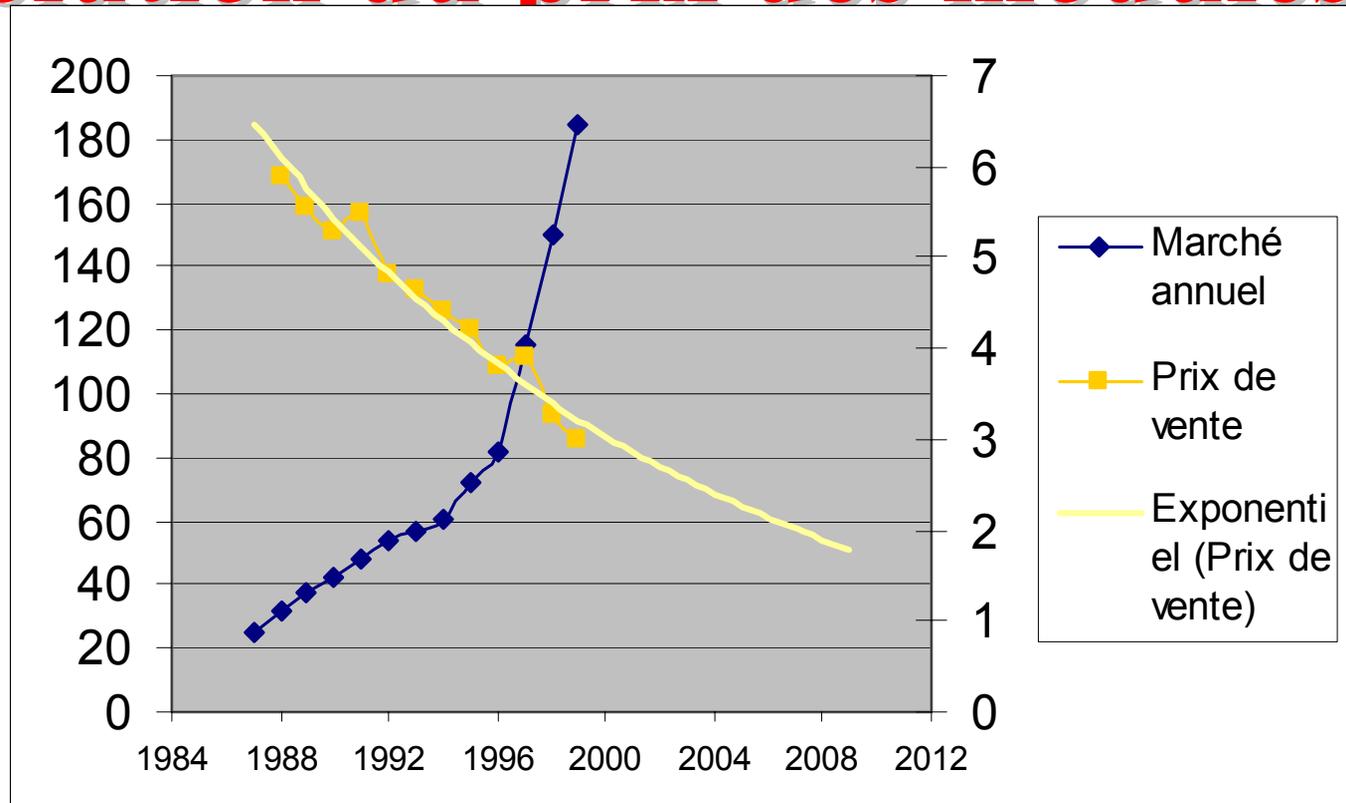
*[www.meteo-graphics.de](http://www.meteo-graphics.de)*



# 6 jours au DK



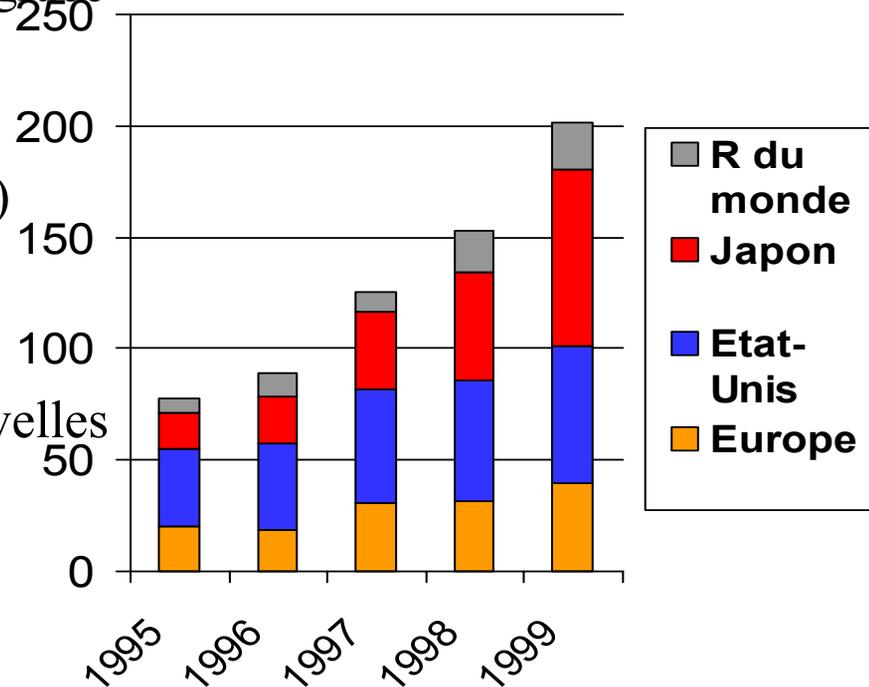
# Evolution du prix des modules



- Prix de vente actuel : 3\$/Wc
- Objectif : division par 2 sous 10 ans, et 4 avec break technologique sous 25 ans

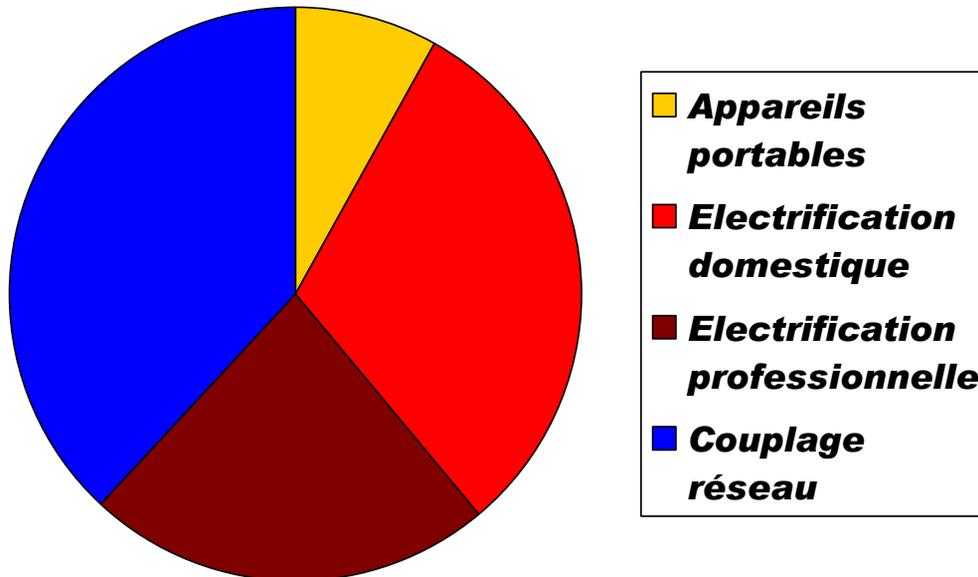
# Répartition géographique de la production (en 1999)

- Le Japon :
  - 40 % du marché mondial, grâce au programme 70000 toits.
- Les Etats-Unis :
  - 30 % (objectif 2020 : 38%)
- L'Europe :
  - 20 % du marché mondial
  - Progression en 2000 : nouvelles capacités de production, et influence du programme allemand
- Le reste du monde : 10%



# Le marché mondial :

- **Croissance  $\geq 25$  % par an,**
- **Environ 120 MW en 1997, 200 MW en 1999, 270 MW en 2000**
- **Répartition en 4 segments (données 1999) :**



# Futur très lointain

- Centrales géantes dans les déserts
- 5% des déserts suffisant pour alimenter la planète entière
- Stockage H<sub>2</sub> ou transport longue distance
- Encore plus futuriste : centrales spatiales avec transport par micro-ondes.

=> *Point à retenir : le photovoltaïque à la capacité d'alimenter la planète entière*