

Les énergies décarbonées

Hervé Nifenecker

SLC, GASN(ARCEA)

Energies sans rejets de CO2

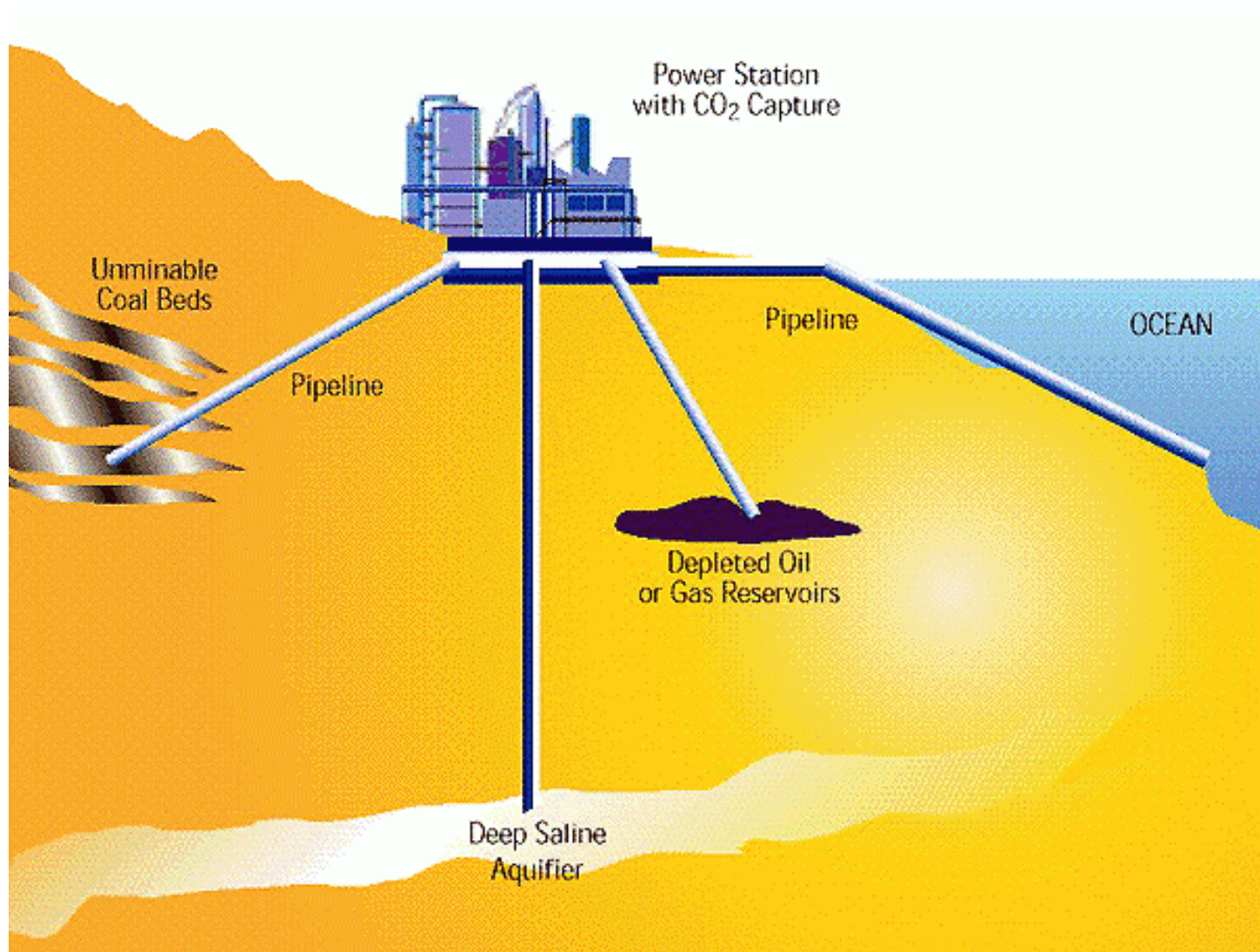
-Renouvelables

- Hydro-électricité
- Eolien
- Solaire PV et thermodynamique
- Biomasse
- Solaire Thermique
- Géothermie
- Energies « marines »

Energies sans rejets de CO2

- Fossiles avec Capture et Séquestration du CO2
- Nucléaire
 - Fission « classique »
 - Surgénérateurs
 - Fusion

I. Capture et stockage du CO₂



Fossiles sans CO₂

- Capture du CO₂
 - Post-combustion $C+O_2 \rightarrow \underline{\underline{CO_2}} + \text{Energie}$
 - Pré-combustion $C+H_2O \rightarrow H_2+CO$
 - $H_2+1/2O_2 \rightarrow H_2O + \text{Energie}$
 - $CO+1/2O_2 \rightarrow \underline{\underline{CO_2}} + \text{Energie}$
 - Elimination du N₂ avant (oxy-combustion)
- Séquestration
 - Anciens gisements pétroliers et gaziers (250 Gt?)
 - Anciennes mines de charbon (5 GtC)
 - Nappes salines aquifères (250 GtC?)

Fossiles sans CO2

- Deux expériences: **Sleipner, Weyburn**
- Surconsommation énergétique: **8 à 15%** (MEDD)
- Surcoût kWh: **50 à 100%** (Charbon pulvérisé), **35 à 50%**(gaz)
- Surcoût investissement: **80 %** (Charbon pulvérisé), **100%**(gaz)

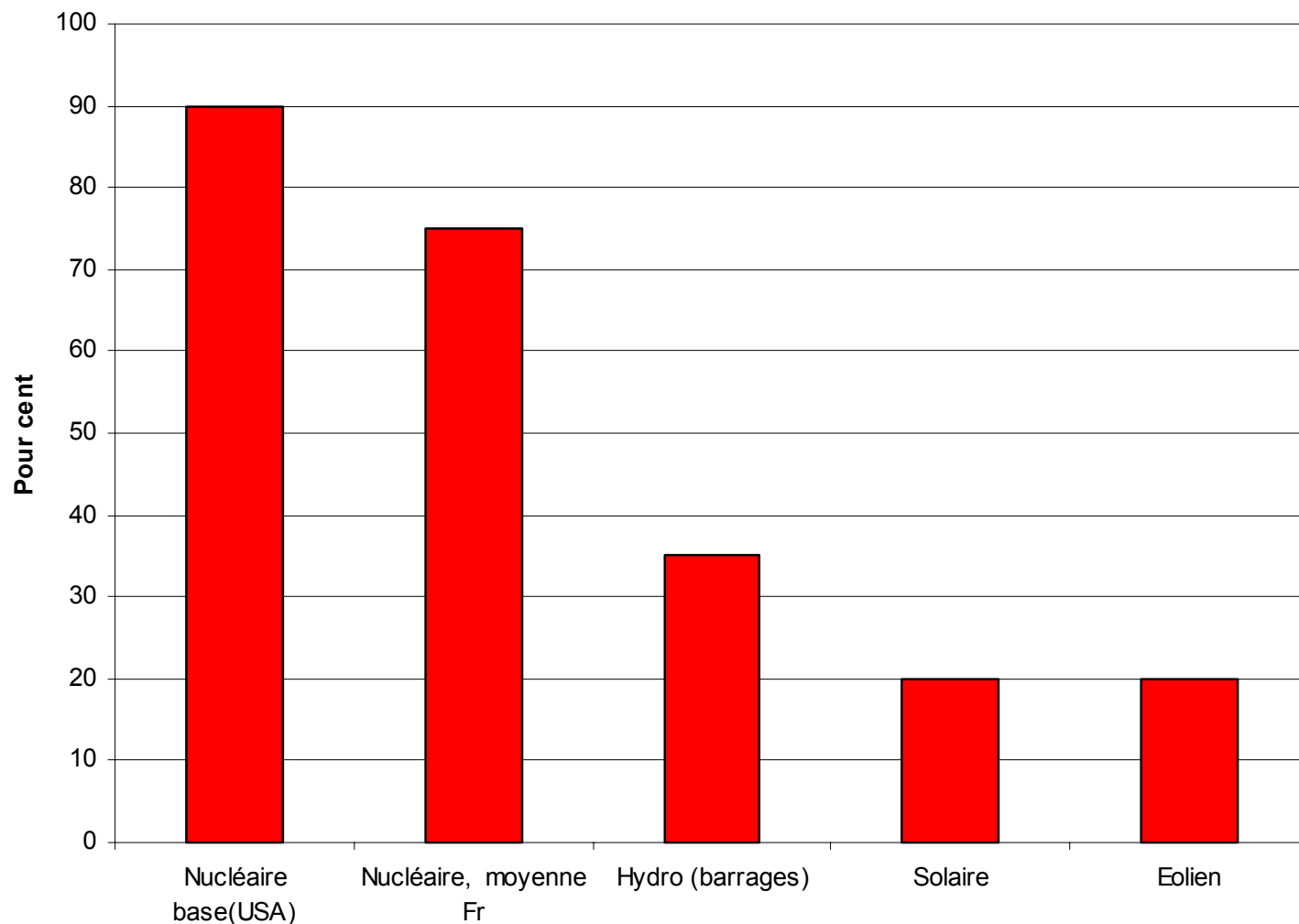
Energies renouvelables

Le potentiel annuel mondial des énergies
renouvelables raisonnablement mobilisable
actuellement (en MTEP)

POTENTIEL ANNUEL	HYDRO	SOLAIRE	EOLIEN	BIOMASSE	TOTAL
PAYS DU NORD	555	38	42	740	1375
PAYS DU SUD	320	162	18	1490	1990
TOTAL	875	200	60	2230	3365

Disponibilité de la ressource

Taux d'utilisation pour la production d'électricité



Hydroélectricité



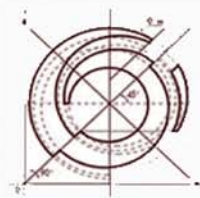
L'hydraulique: principale energie renouvelable

Les avantages et les inconvenients

Les avantages

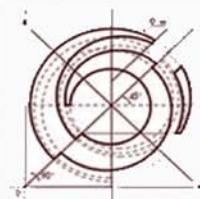
- **Energie renouvelable:**
 - Pas de cout de “combustible”
 - Pas de limitation dans le temps
 - Faible cout de maintenance et d'exploitation
 - Pas/ Peu d'emission de CO2
- **Capacité de stokage de l'energie**
- **Grande flexibilité de regulation des reseaux:**
 - Mise en route en quelque secondes
- **Complement à d'autres energies : nucléaire, eolien**
 - Turbine Pompe
- **L'eau peut etre utilisé pour d'autres besoins:**
 - Irrigation, stokage
 - Tourisme

- “Fuel is free”-



Les difficultés

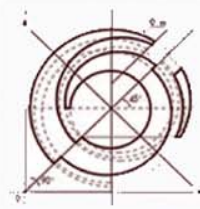
- **Implantations des barrages:**
 - Modification locale (changement, migration des poissons...)
 - Déplacement de population
- **Financements:**
 - Le cout initial est important
 - Temps d'implatation très long
- **Pas de standard implantation totalement dependante du site et de l'hydrologie**



Puissance installée

	Puissance installée MW	% d'énergie hydraulique	Capacité en construction MW	Capacité prévu MW
France	25 475	12%	0	5
Europe	170 000		2 717	12 500
Turquie	12 618	25%	3 219	20 423
Brésil	69 087	78%	9 750	34 200
US	78 200	7%		
Canada	69 500	59%	1 500	8 000
Inde	30 135	13%	9 222	52 000
Chine	92 000	15%	50 000	80 000
Monde	741 121		118 803	400 000

Source Hydropower & Dams World Atlas 2005



Hydraulique : principale énergie renouvelable

Le potentiel

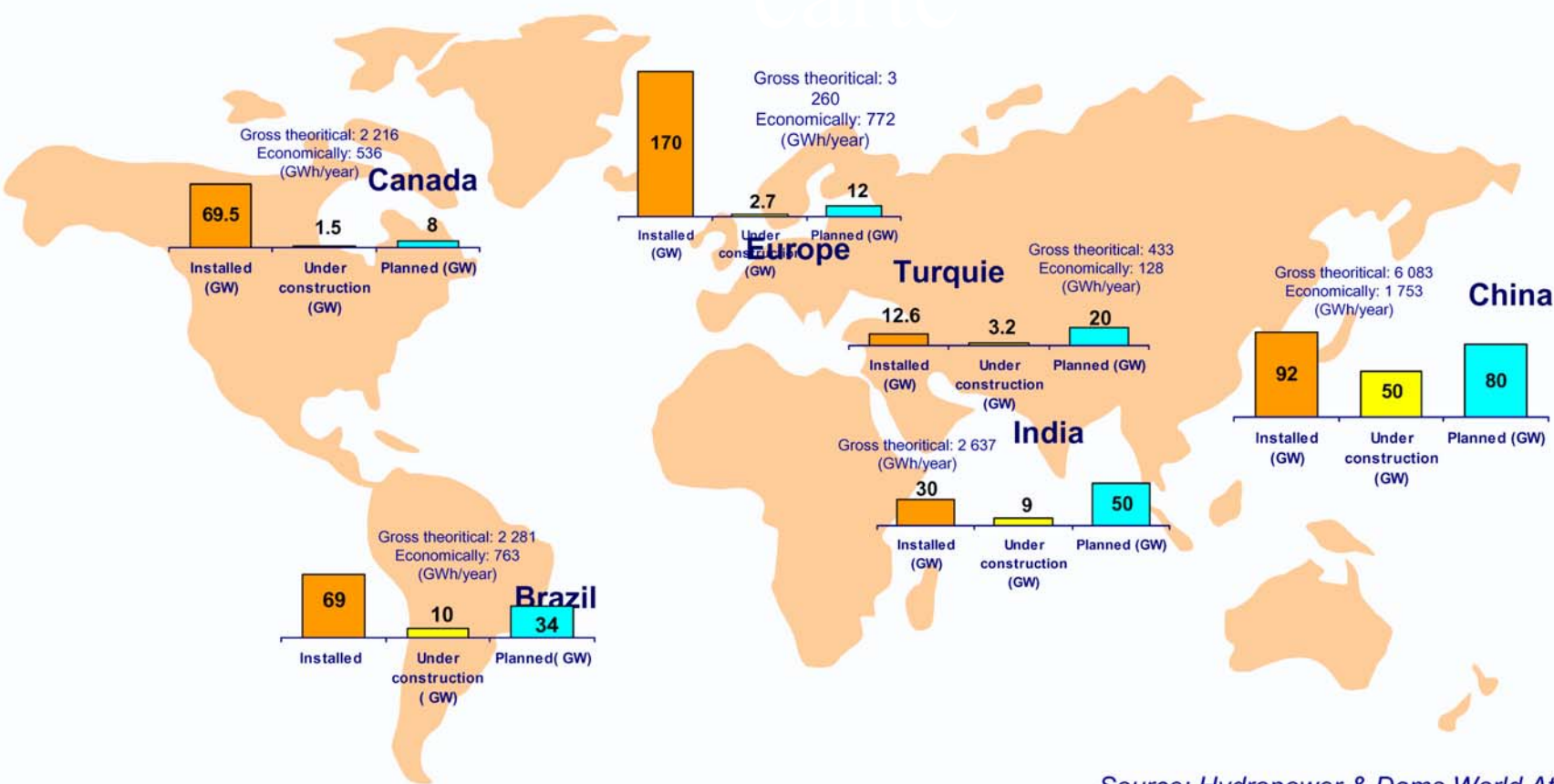
	Potentiel Theorique Millions GWh/an	Potentiel faisable Millions GWh/an	Potentiel économiquement faisable Millions GWh/an	Production 2003/2004 Millions GWh/an
France	0.200	0.072	0.072	0.070
Europe	3.260	1.140	0.772	0.507
Turquie	0.433	0.216	0.128	0.044
Brésil	2.281	1.300	0.763	0.336
US	4.485	0.528	0.376	0.300
Canada	2.216	0.981	0.536	0.353
Inde	2.637	0.660	0.148	0.074
Chine	6.083	2.474	1.753	0.310
Monde	40.000	14.368	8.562	2.793

Source Hydropower & Dams World Atlas 2005



Hydraulique : principale énergie renouvelable

Le potentiel



Source: Hydropower & Dams World Atlas 2005

- Le potentiel existe -



- Quelques exemples : sous 100 metres : 1 m³/s genère 1 MW

Project	Unit				Power station	
	Location	Head (m)	Discharge (m ³ /sec)	Output(MW)	Record	Output (MW)
Rock Island	USA	15	400	56	On river	448
Cleuson-Dixence	Switzerland	1874	25	423	Head	1269
3 Gorges	China	80	975	710	Discharge	25350
Itaipu	Brazil	126	645	740	Output	14800

Exemples



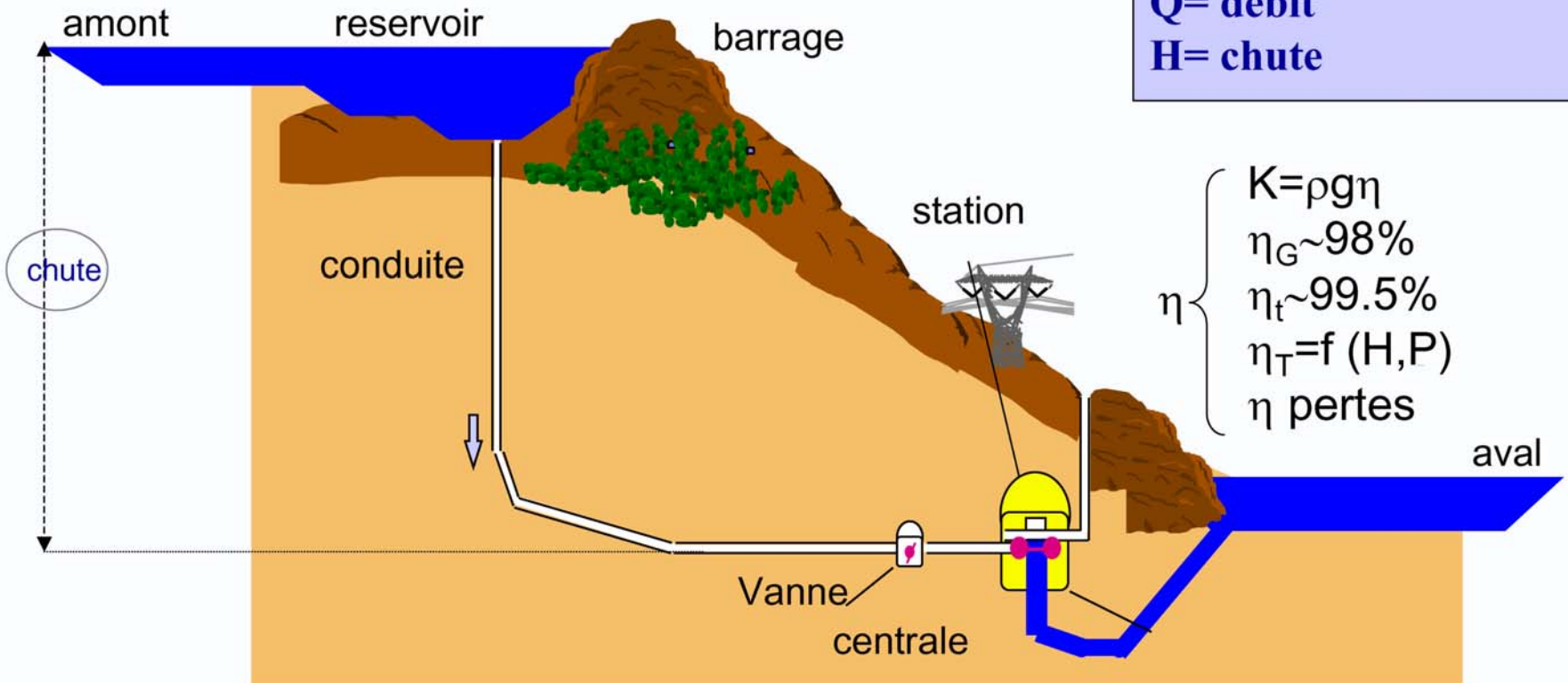
L'hydraulique: principale energie renouvelable

Le principe

$$MW = k Q.H$$

Q= débit

H= chute



$$K = \rho g \eta$$
$$\eta_G \sim 98\%$$
$$\eta_t \sim 99.5\%$$
$$\eta_T = f(H, P)$$
$$\eta \text{ pertes}$$

L'hydraulique: principale energie renouvelable

Le principe

10 to 25 m

Low speed



BULB

20 to 60 m

Low speed



KAPLAN

50 to 500 m

Medium speed



FRANCIS

Motor/Generator



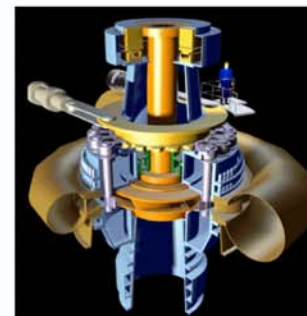
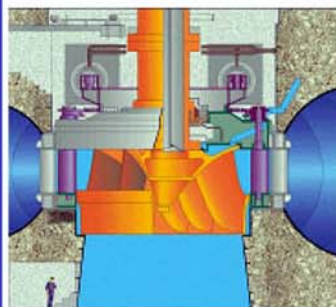
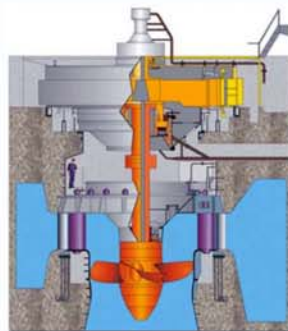
PUMP-TURBINE

Up to 1800 m

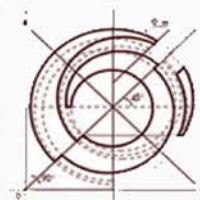
High speed



PELTON



- Des machines de types très différents -



Hydraulique : principale énergie renouvelable

Quelques exemples : Trois Gorges

ALSTOM

Une nouvelle offre
pour 6 groupes
complémentaires
va sortir en
decembre

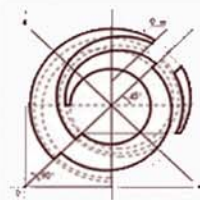


- Huge characteristics:
- Max head : 113 m
- Max power : 852 MW
- Max discharge : 1 065 m³/s
- velocity : 75 tr/min
- max efficiency : 96.2 %

- Huge Dimension :
- Runner diameter : 10,6 m
- Runner weight : 450 T

First runner already in operation
End : 2009

8 machines (turbines et alternateurs) sur 14 ont été attribué à Alstom pour la première phase ainsi que le control commande et les 14 regulateurs, Pour la deuxième phase Alstom a été retenu pour 4 groupes sur 12

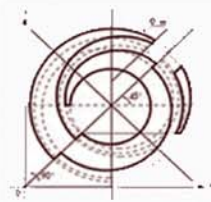


LA grande hydraulique en Chine

Le barrage en chiffres

- Plus haut qu'un immeuble de 70 étages (175 m)
- Plus long que les Champs Elysées (2 309 m)
- Un lac artificiel de 600 Km de long (Paris - Grenoble)
- 40 milliards de m³ d'eau emmagasinés dans le réservoir sur une surface de 1 084 km²
- Production de 85 milliards de kWh (= production hydraulique Française)
- 1 250 000 chinois doivent être relogés
- Puissance 18 500 MW
- 27 m³ de béton





La Grande Hydraulique Quelques Exemples

ALSTOM

Photo



EOLIEN

Eolien/fossiles: contribution 2005 à la production d'électricité et évolution 2005/2004

	TWh	% production	% Evol. 2005/2004	% fossiles	% HEPP
Allemagne	26,5	4,3	4	61,5	17,90%
Espagne	20,7	7	30	62,4	24,50%
Danemark	6,6	18	0,4	73,3	24%
UK	2,9	0,7	50	74,8	26%
Italie	2,34	0,8	27	77,2	
Pays bas	2,1	2,1	10,7	87	28%
Grèce	1,34	2,2	19	88,4	
France	1	0,2	57	10,4	
Suède	0,9	0,5	2,2	2,7	
Europe ouest	69,1	2,2	17	49,8	21,1

69,1 TWh pour 37413 MW installés → 1850 h équivalent pleine puissance

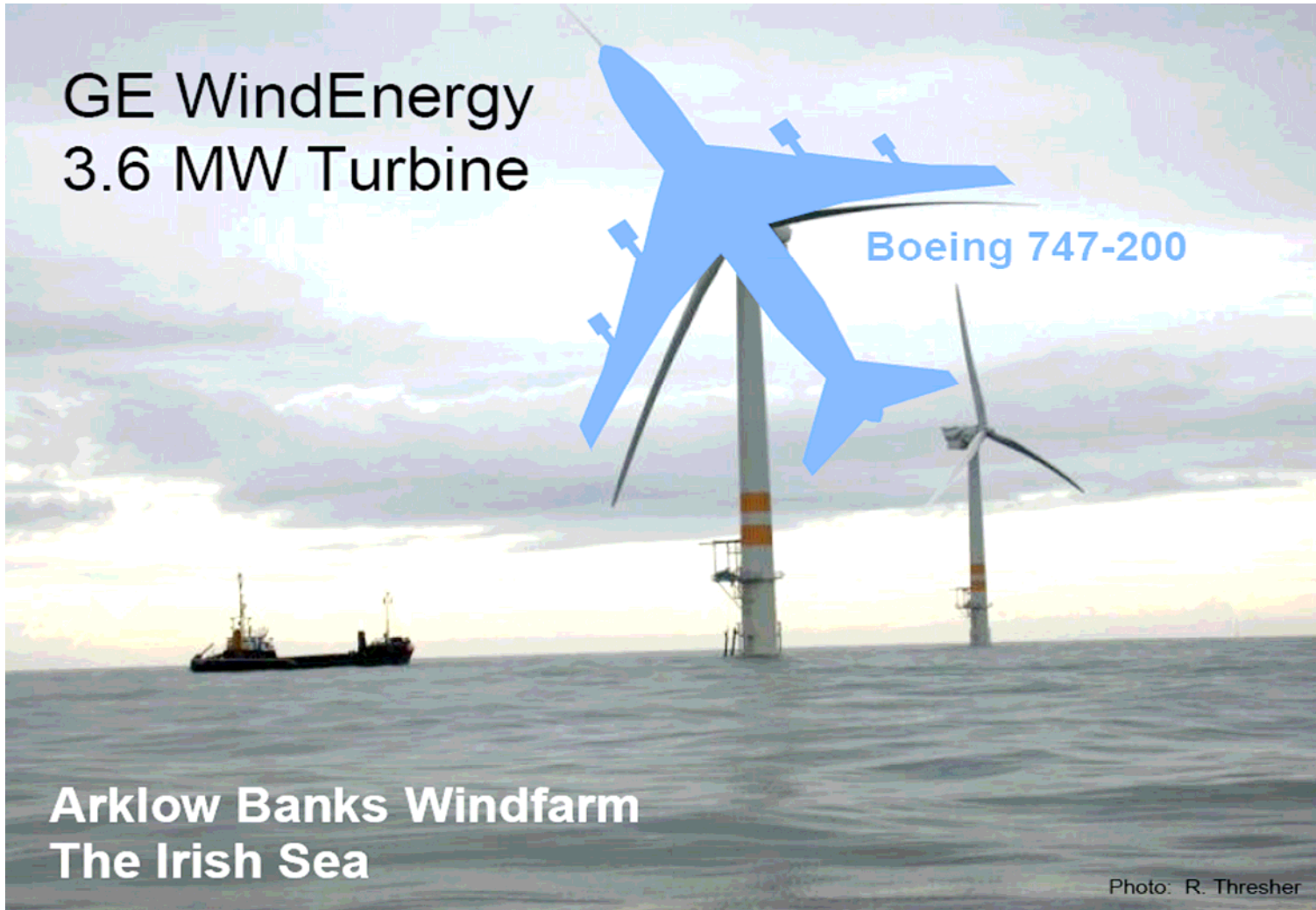
Les éoliennes off shore modernes

GE WindEnergy
3.6 MW Turbine

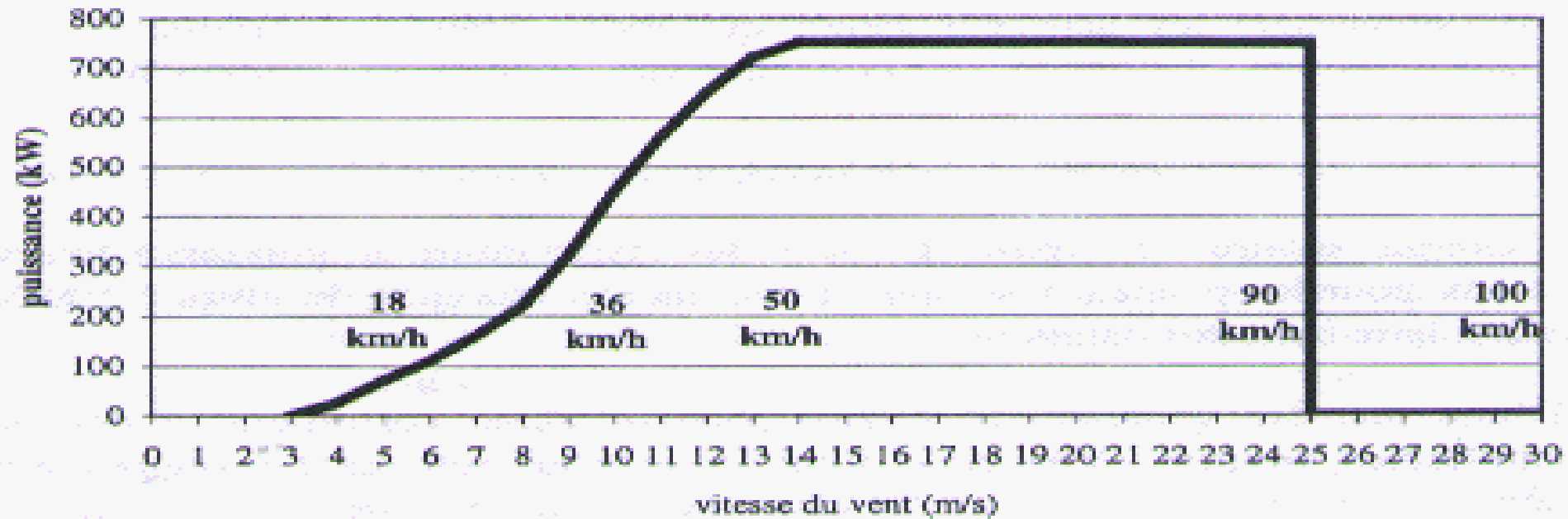
Boeing 747-200

Arklow Banks Windfarm
The Irish Sea

Photo: R. Thresher



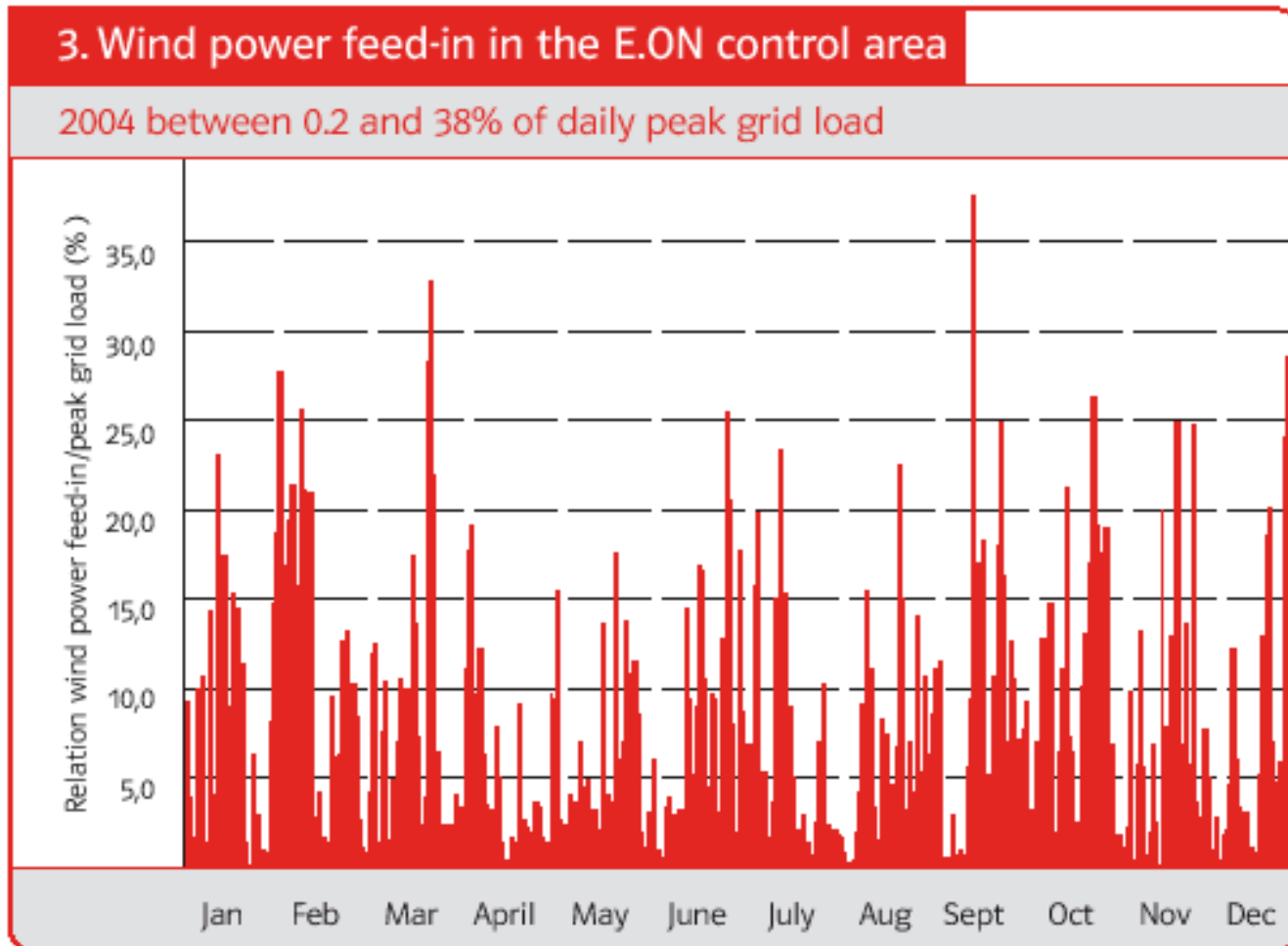
Rendement



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/m² (10 fois moins que PV)

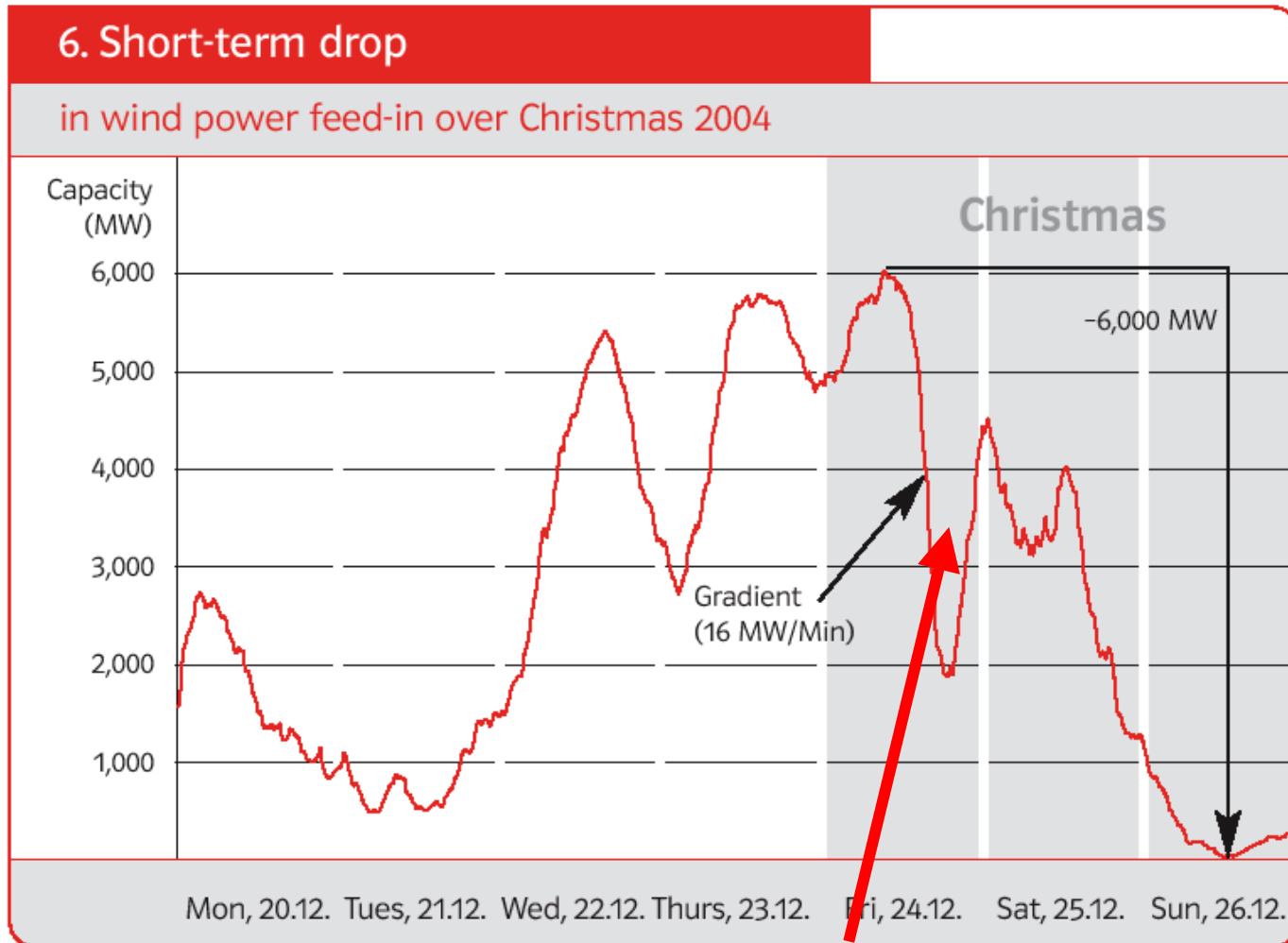
Puissance éolienne E-ON sur un an (max théorique: 7.558 MW)



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

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

Puissance éolienne délivrée: détail

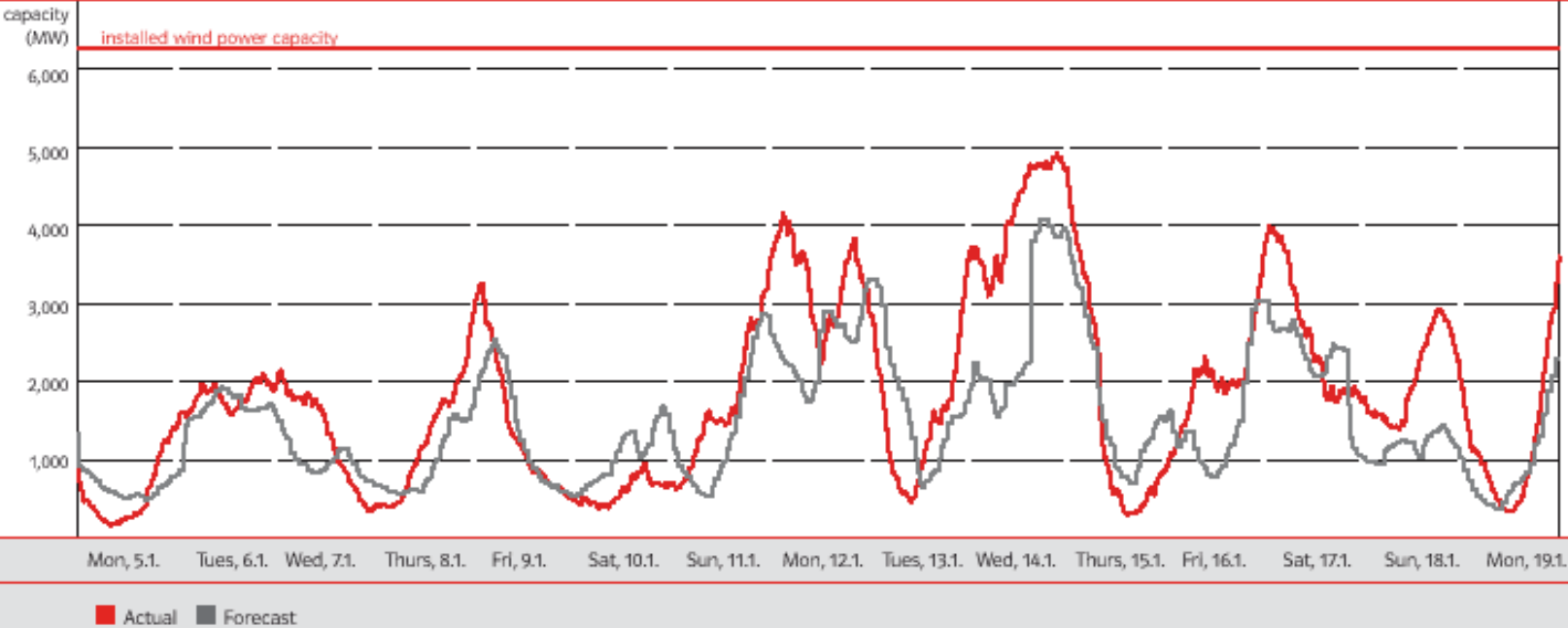


Pente: 1000 MW/h

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



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%

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
- Surcoût de l'électricité produite: 3 G€/an
- Production nucléaire: 13 G€/an

Biomasse

Production mondiale

♦ PRODUCTION ANNUELLE :

↳ 172 milliards de tonnes sèches
Soit 15 fois l'énergie fossile consommée

	68%	Forêts
2/3	16%	Savanes prairies
	8%	Cultures
1/3	90%	Algues microscopiques (phytoplancton) Manque substrat solide et sels minéraux
	10%	Macrophytes

♦ QUANTITÉ STOCKÉE :

↳ 1800 milliards de tonnes sèches
Soit énergie équivalente à réserve fossile connue

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.

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 km².

Surface emblavée en France :

45000 km²= 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 km²=10 Mtep
 - Mais rejets GES? (prairies, engrais....)

LA BIOMASSE

Inventaire du potentiel national

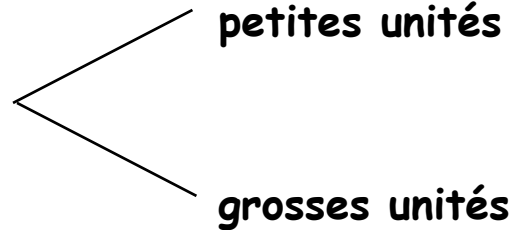
- Selon :
- * (1) X. DEGLISE, J. LEDE, *Entropie* n° 94 (1980)
 - * (2) R. DUMON
 - * (3) *Débat énergie et environnement SOUVIRON* (1994)
 - * (4) *Rapport CEE* (octobre 1998)
 - * (5) *Biomasse Normandie* (1994), d'après ministère de l'agriculture, ADEME, AFOCE.

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

Filières de transformation énergétique de la biomasse

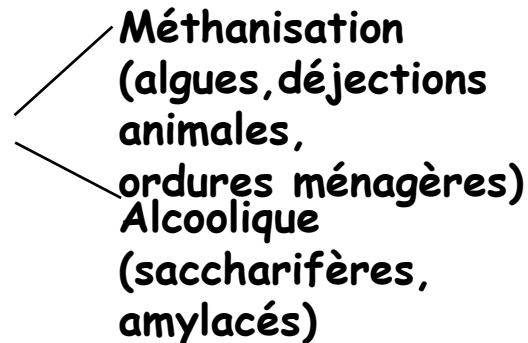
• COMBUSTION



Investissement élevé
rejets mal contrôlés

Présence d'azote +
acides et goudrons ⇒
température $\leq 650^{\circ}\text{C}$
d'où cogénération
limitée à
30% élec/70% chaleur

• FERMENTATIONS



50 à 60% CH₄
30 à 40% CO₂

Plante utilisée à 50%
Distillation
consomme énergie
⇒ Indice 1,2 à 1,4

• GAZEÏFICATION



Tous végétaux à 100%
Indice 2,8 à 3

Besoins en eau de la biomasse*

Il faut 10 000 m³ d'eau pour produire 1 tep (céréales, oléagineux, betteraves)

En doublant le sur-pompage actuel (160 milliards m³) on ne produirait que *18 Mtep* !

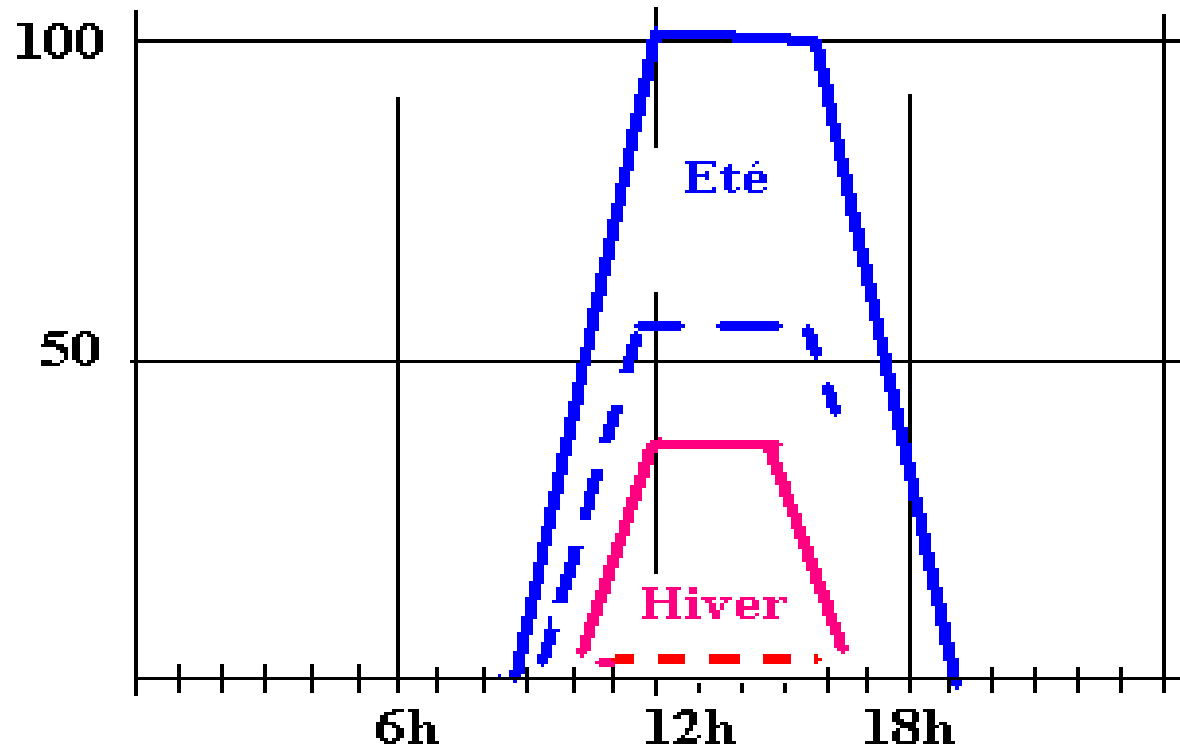
L'eau est le facteur le plus limitatif pour les biocarburants !

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/ m².
- Utilisable (Var) :
1800 kwh/m²/an
- rendement photovoltaïque de 15% :
270 kwh/m²
- Chauffage solaire:
500 Kwh/m²

Effets jour-nuit, été-hiver, nuages

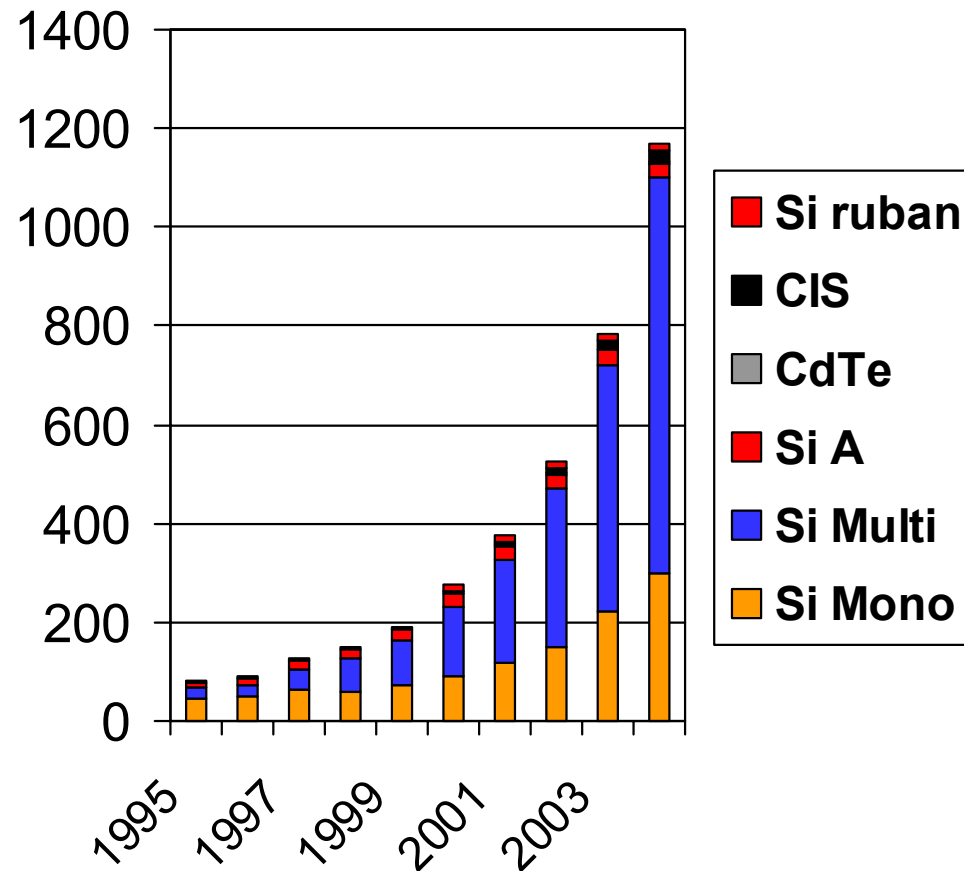


Données de base

- 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 m²) 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

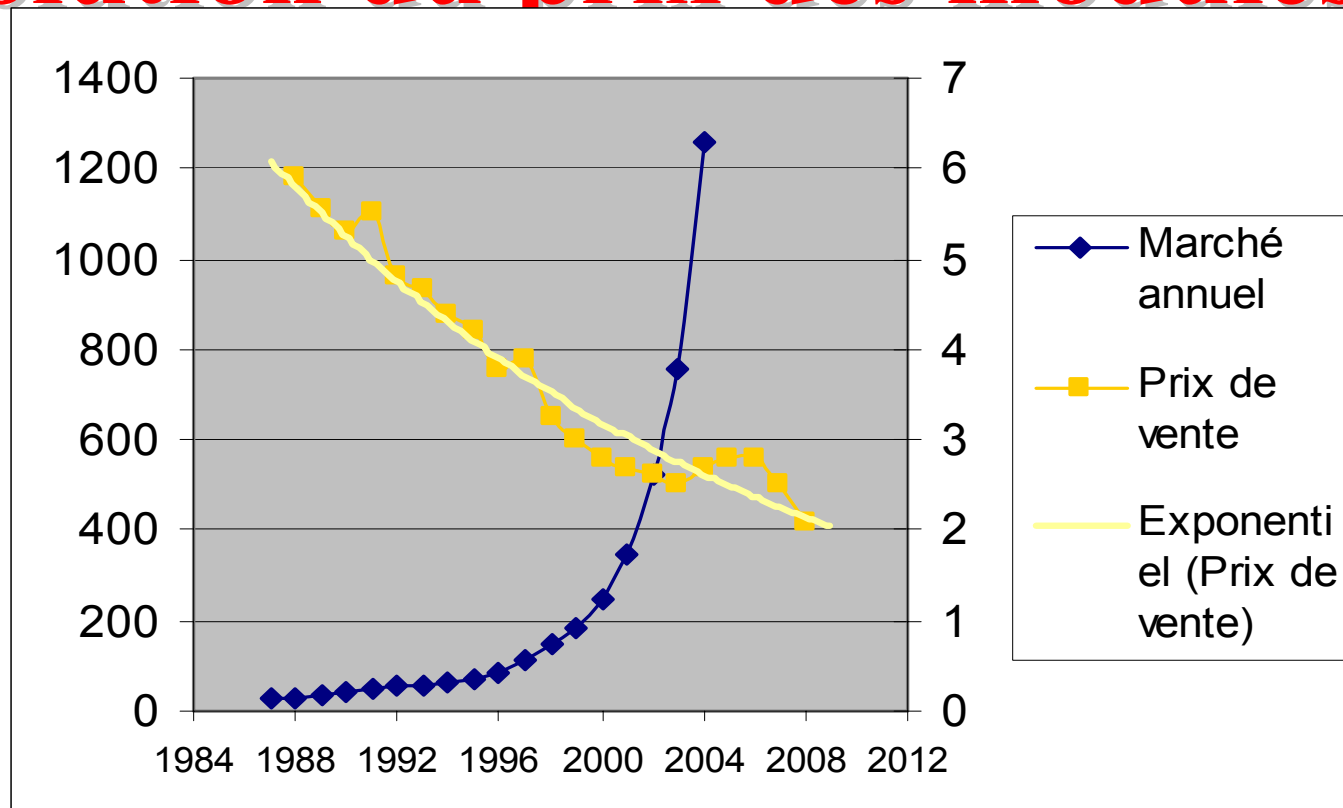
- Le silicium cristallin : domine, avec 83% du marché
- Le multicristallin : croît plus vite que le monocristallin
- Le silicium amorphe : 40% sert aux calculatrices, etc..
- Le CdTe et le CIS ont encore une part limitée
- Le AsGa est utilisé en spatial



Les principaux producteurs (production 2004 : 1260 MWc)

Sociétés	Pays	Tech	Prod.(croissance/03)
Sharp	Japon	xSi	324 MW (64%)
Kyocera	Japon	XSi	107 MW (46%)
BP solar	G.B.	XSi,Si	85 MW (22%)
Mitsubishi	Japon	Si	75 MW (79%)
Qcells	Allem.	Si	74 MW (166%)
Shell solar	USA-NL	xSi	72 MW (16%)
Sanyo	France	xSi	65 MW (86%)
RWE	USA/DE	xSi	63 MW (43%)
Isophoton	Esp.	xSi	53 MW (51%)
..n°12 Photowatt	France	xSi	28 MW (68%)

Evolution du prix des modules



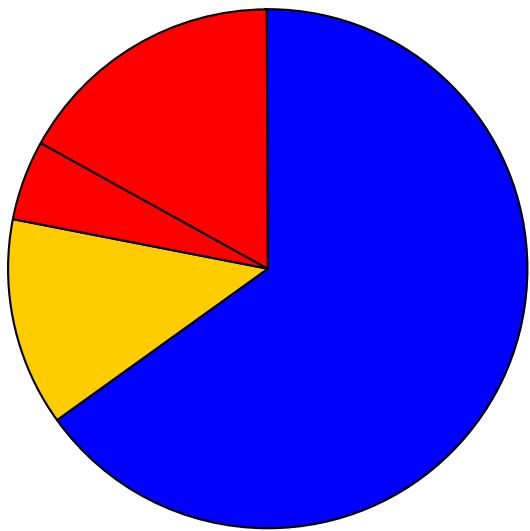
- Prix de vente actuel : 2,75 à 3€ /Wc
- Objectif : division par 2 sous 10 ans, et 4 avec break technologique sous 25 ans

Facteurs Technico- économiques

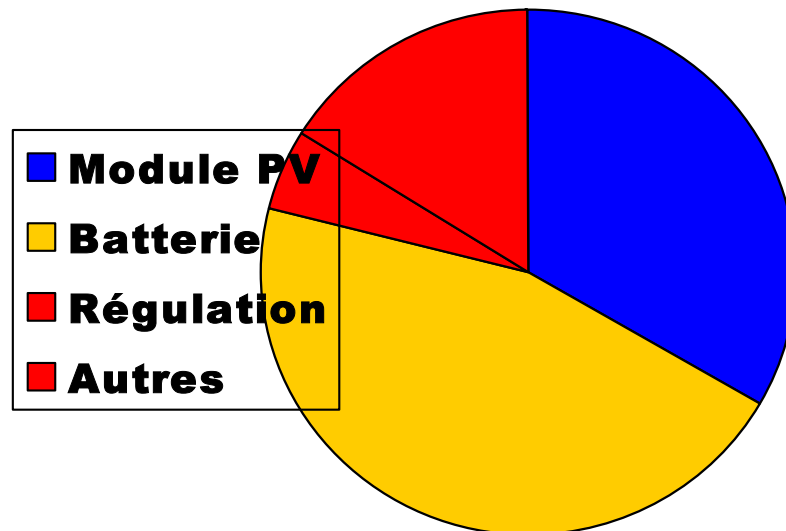
	Raccordé	Autonome
Eléments prix du kWh	Prix module Durée de vie Taux argent Substitution	Idem + Stockage
Substitution Taux :	Toît, façade 10 à 100%	Service, Réseau >100%
Prix mini kWh Problème n°1	0,3 Euros Module Intégration	1,5 Euros Stockage ρ utilisation

LES COÛTS DES SYSTEMES AUTONOMES

Répartition de l'investissement initial



Répartition des coûts sur le cycle de vie



Les modules représentent :

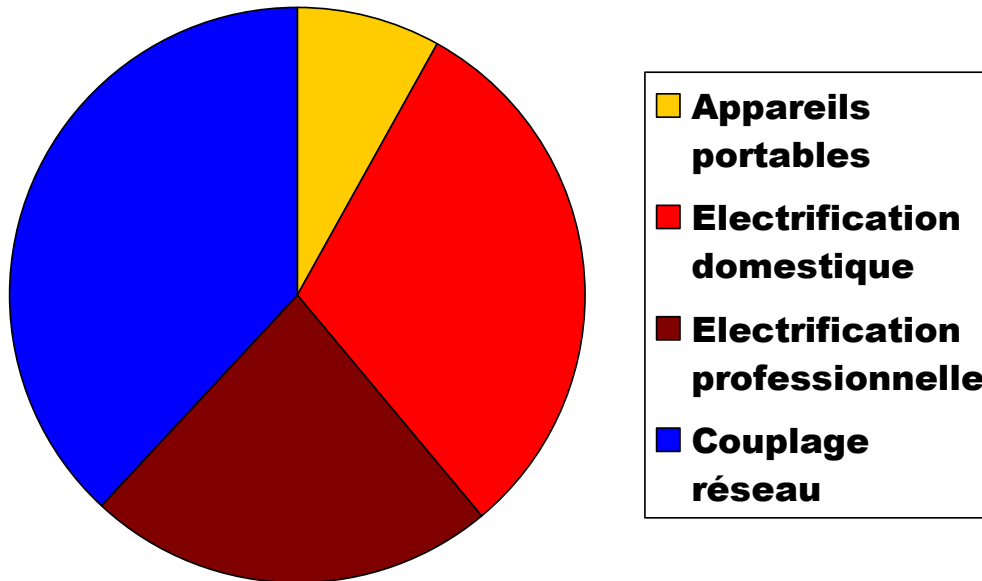
2/3 de l'investissement initial,
1/3 des coûts complets

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 mondial :

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



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.

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

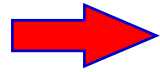
- Imbattable en terrain vierge pour < 2 kW
- Imbattable pour usagers < 10 kWh/mois
- Sans concurrence pour 1/3 de l'humanité
- Cher, mais sans inconvénients ni limites
- Croissance rapide (30%/an) mais artificielle.
- Handicap : stockage

⇒ Sur réseau : sera un jour le toit standard ?

⇒ En PED : sera l'énergie standard ?

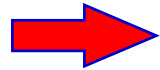
Le solaire thermique

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 m² de capteurs pour produire l'eau chaude sanitaire d'une famille de 4 personnes

Cas pratique: PV

- PV 15m², 2 kWc, 2000 kWh
- Prix total : 19000 €
- Prix cellules: 6000 €
- Crédit d'impôt: 8000 €
- Subventions(?): 5000 €
- Coût net: 6000 €
- Revenu: 2000kWh*0,55€=1100 €/an
- **Retour: 5,5 ans**
- **CO₂ évité <88,2 kg/an >-113 kG/an**

Cas pratique: solaire thermique

- Maison 120 m² sur 2 étages
- Besoin total ECS+chauffage=25500 kWh
- Capteur: 12 m²
- Prix: 1150 €/m² Total: 13800 €
- Crédit d'impôt: 6000 €
- Subventions: 800 €
- Coût net: 7000 €
- Production capteurs: 6800 kWh/an
- Economie: gaz: 238 € fioul: 340 €
- **Retour: gaz: 29 ans fioul: 21 ans**
- CO₂ évite: gaz 1,4 tonnes fioul: 2,1 tonnes

Cas pratique: isolation

- Pose de doubles fenêtres: 8185 €
- Crédit d'impôt: 2159 €
- Coût: 6026
- Economies de gaz (10000 kWh): 350€/an
- Retour: 17 ans**
- CO2 évité:**
 - Fioul: 5 tonnes**
 - Gaz: 3,5 tonnes**
 - Electricité: 0,53 tonnes**

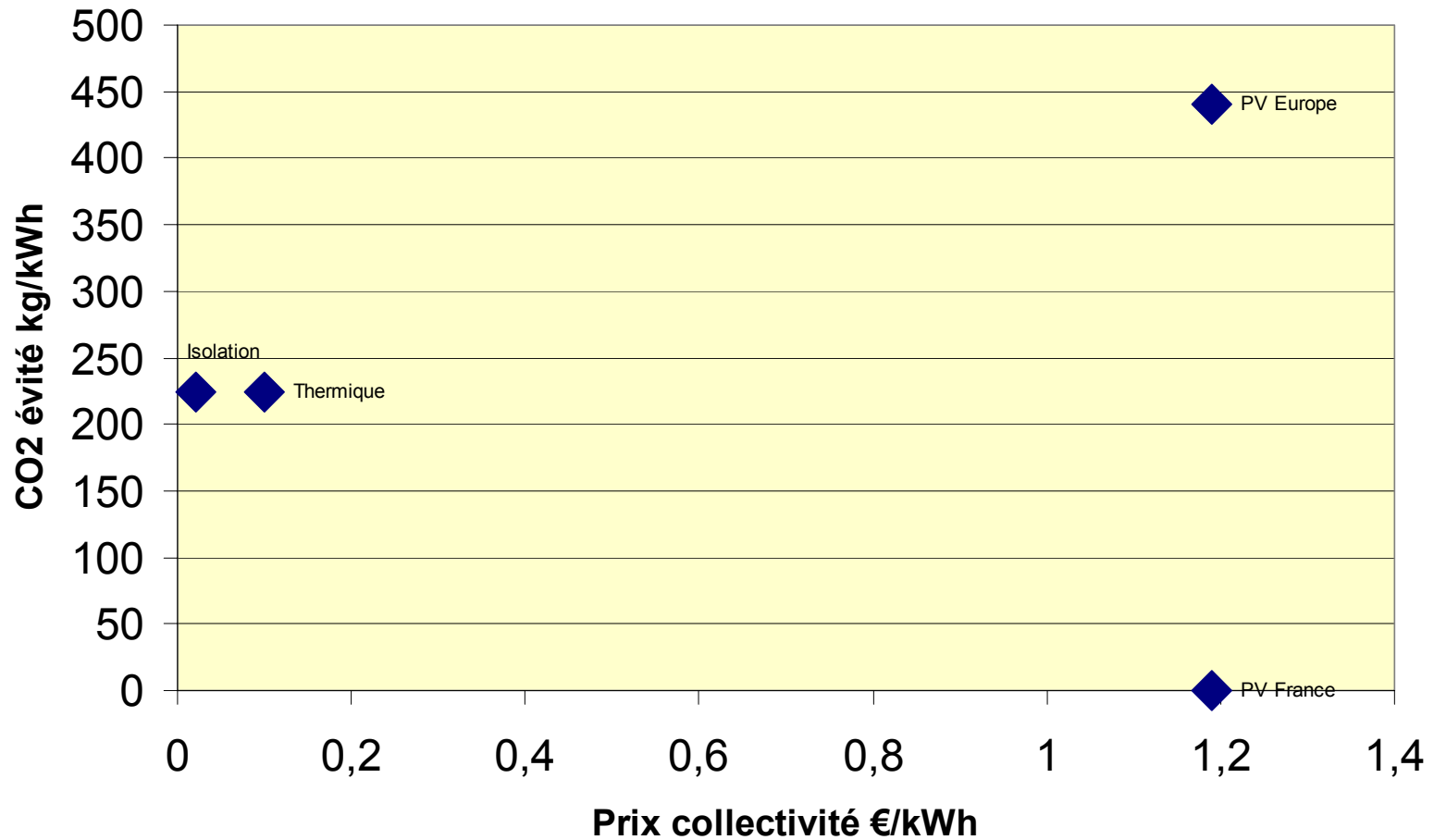
Electricité effaçable

- Consommation gaz: 20000 kWh
- Coût: 556 €/an
- Remplacement par électricité effaçable
- Gaz restant: 2000 kWh=56 €/an
- Electricité(gain d'efficacité)=13000 kWh
- Coût électricité: $13000 * 0,06 = 780$ €/an
- Surcoût annuel: 280 €
- Gain CO2: 7 tonnes
- Prix CO2 évité: 0,04 €/kg

Récapitulation Tableau

	Prix du kWh	CO2 évité/kWh
	Collectivité	g/kWh
PV France	1,19	0,00
Thermique	0,10	224,00
Isolation	0,02	224,00
PV Europe	1,19	440,00

Récapitulation Graph



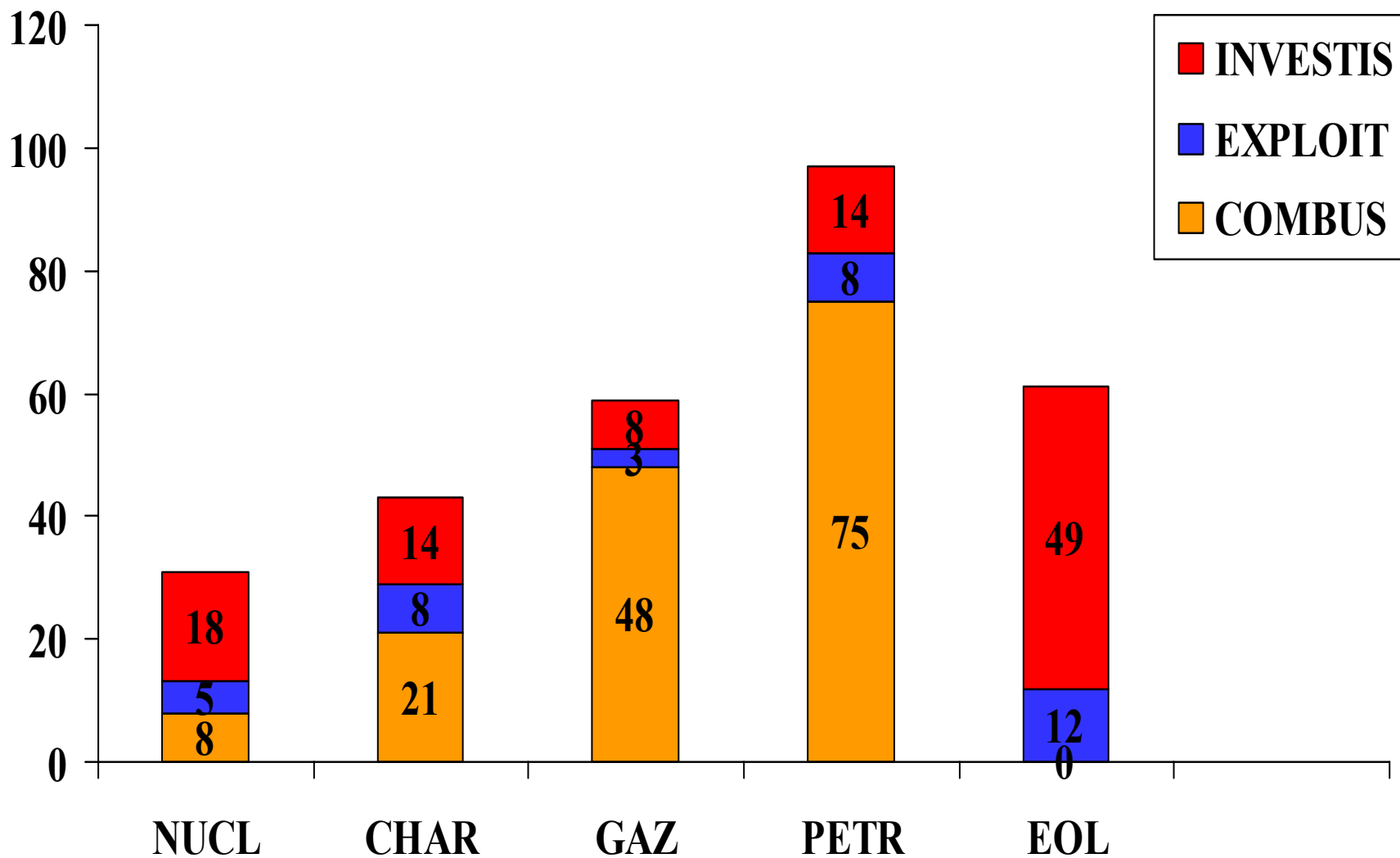
Coûts

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)

