

LECON 10 -2015-

ENERGIES RENOUVELABLES

GEOOTHERMIE-HYDRAULIQUE-BIOMASSE



Potentiel énergétique mondial des énergies renouvelables

Source : US Energy
Information Administration

En 1h = notre E de 365j

Un million de x > Terre
brûle 600 millions de tonnes
d'hydrogène/sec

± 10 000x notre consommation mondiale
à chaque instant

Énergie solaire
86 000 térawatts (TW)



Énergie éolienne
870 TW



Énergie géothermique
32 TW



Énergie hydraulique
7,2 TW

in Diplomatie, 12, 2013

10 000 000 000

Chaque seconde le soleil dégage autant d'énergie que 10 milliards de bombes nucléaires



Si toute l'E du Soleil est dirigée sur la Terre, la croûte terrestre fondrait en 3 min

La Terre 'capte' seulement 1.10^{-11} de l'E solaire émise dans l'espace (dans toutes les directions)



E absorbée par la Terre
3850 ZJ/an

Comparaisons :
photosynthèse capte 3 ZJ
le vent contient 2,2 ZJ
usages humains 0,5 ZJ
dont 0,06 électricité

$Z = 10^{21}$



1 000	kwh
1 000 000	MWh
1 000 000 000	GWh
1 000 000 000 000	TWh
1 130 000 000 000	W Production nucléaire française par seconde
	58 centrales

	soit 400 milliards de fois plus
400 000 000 000 000 000 000 000	W Production du soleil par seconde
12 614 400 000 000 000 000 000 000 000	W Production du soleil par an sur Terre

consommation **Contexte général** hors 'bois'

2013 : 8,7% (BP2014)

+16,3%pr 2012

2,0%

nb E nu 4,4%
6,7% [2013]

Énergie hydraulique

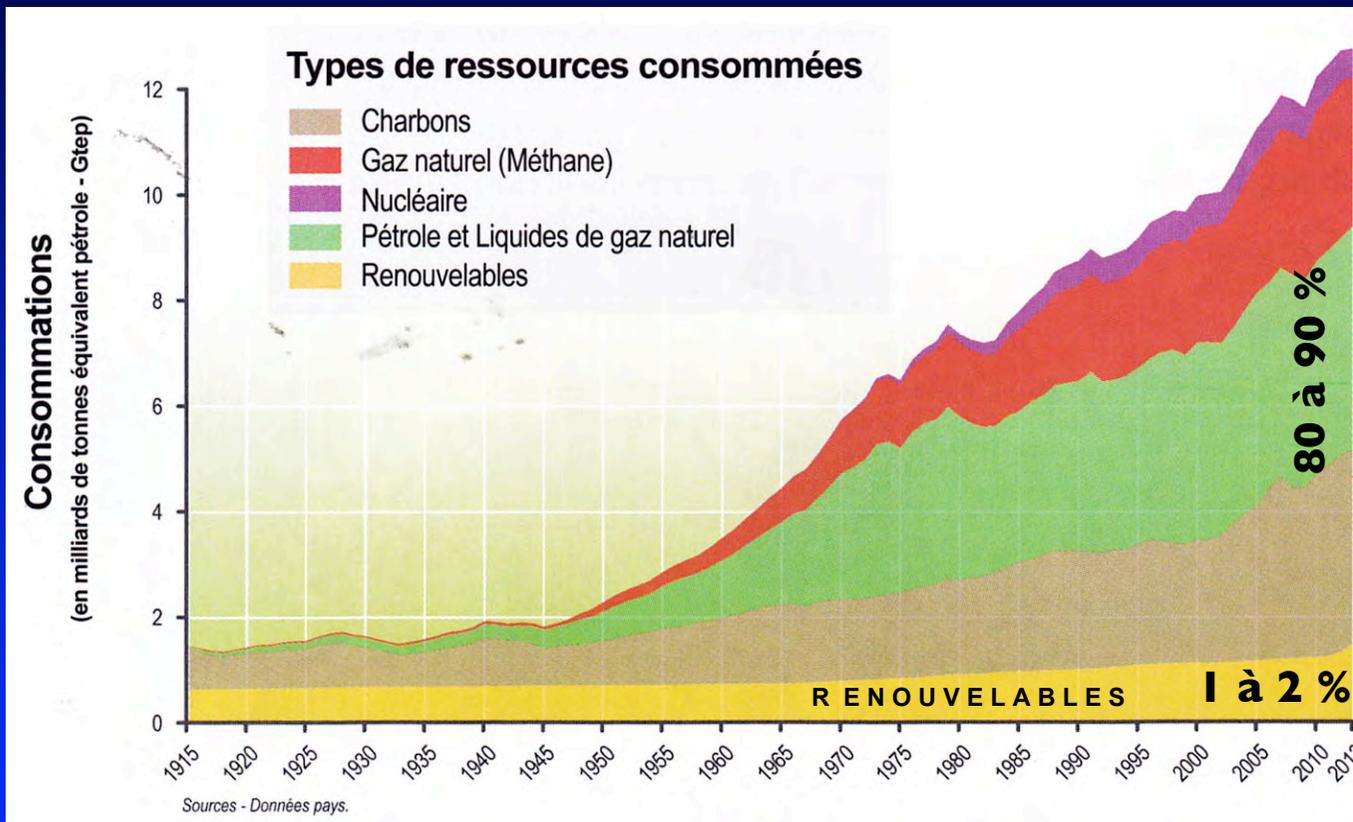
Biomasse



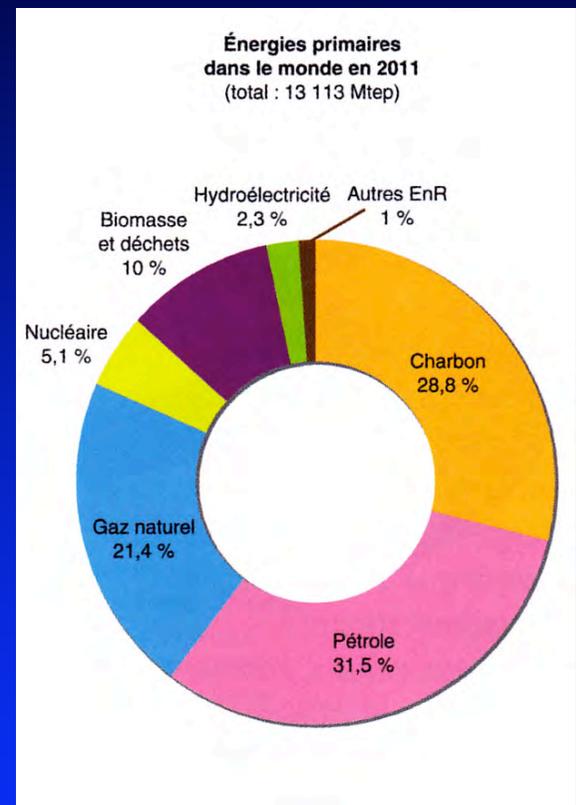
Énergie solaire

Énergie éolienne

Géothermie



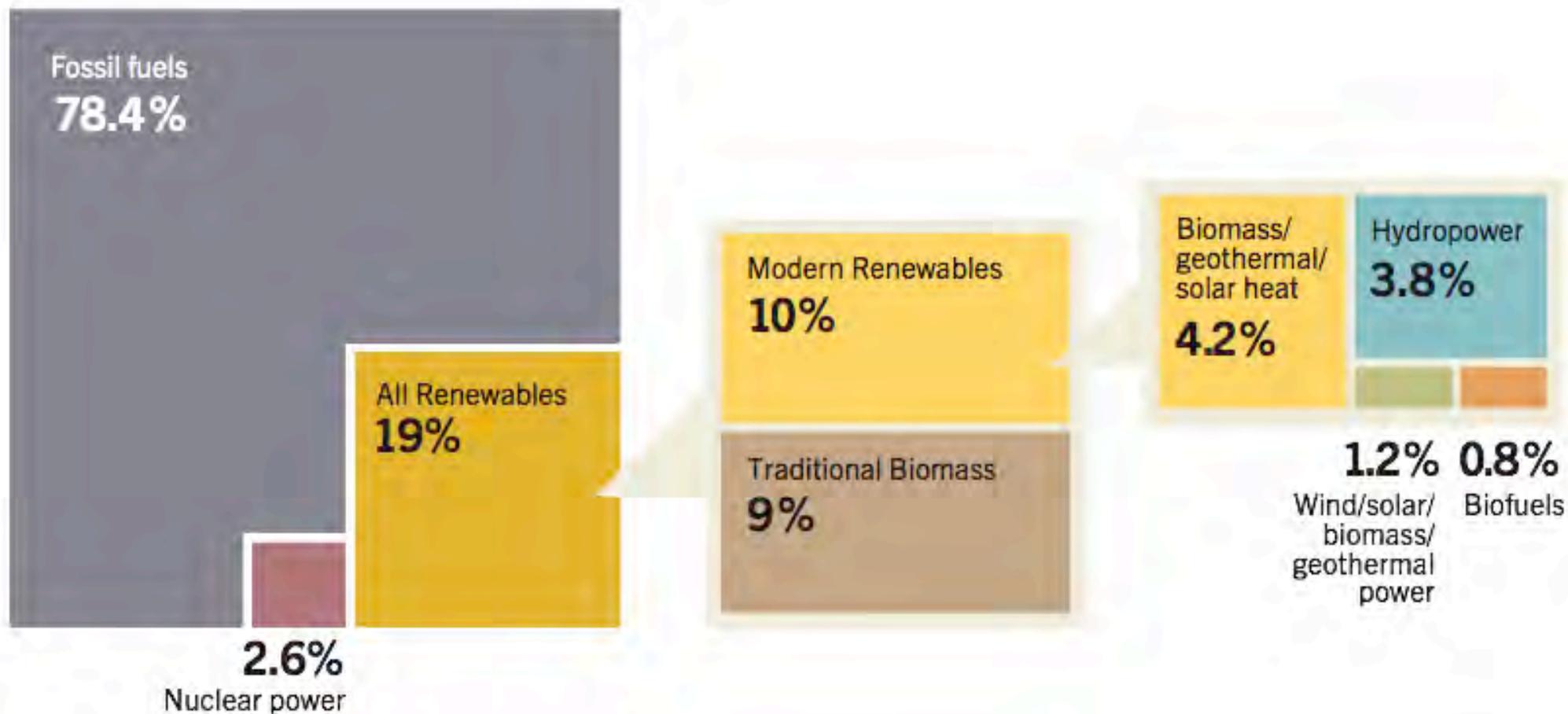
Favennec & Mathieu 2014



Mathis 2014

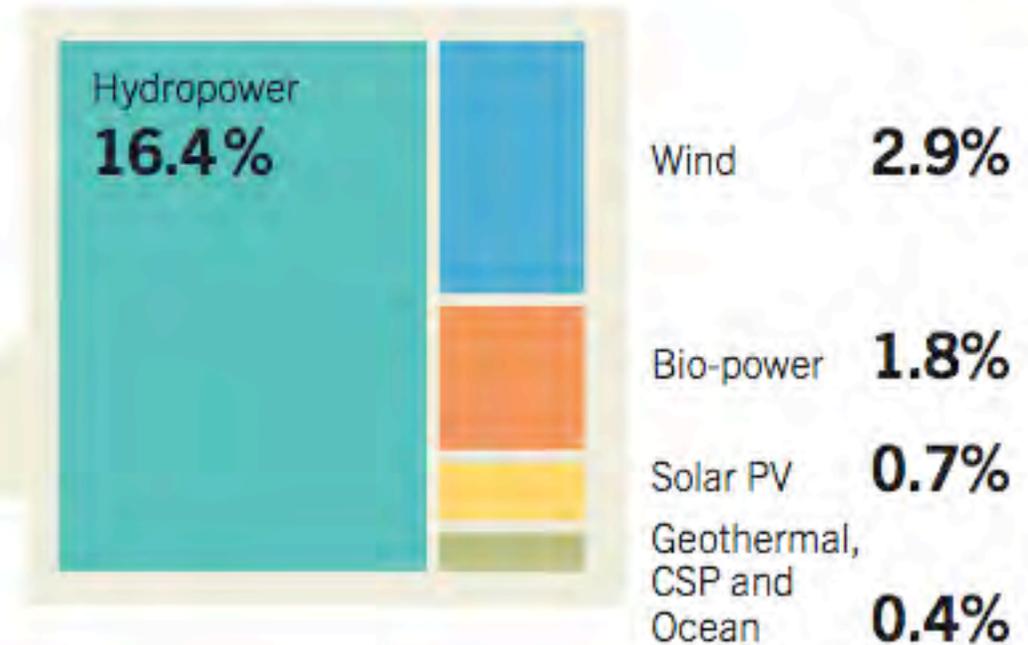
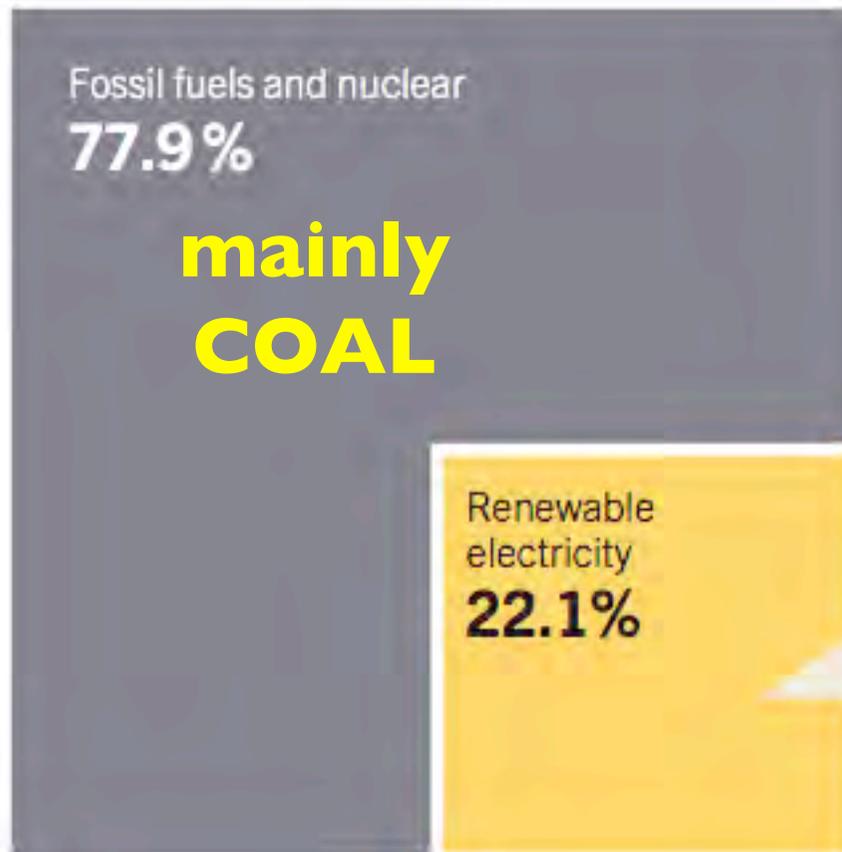
Les ordres de grandeur ne changent pas...

Estimate Renewable Energy Share of Global Final Energy Consumption, 2012



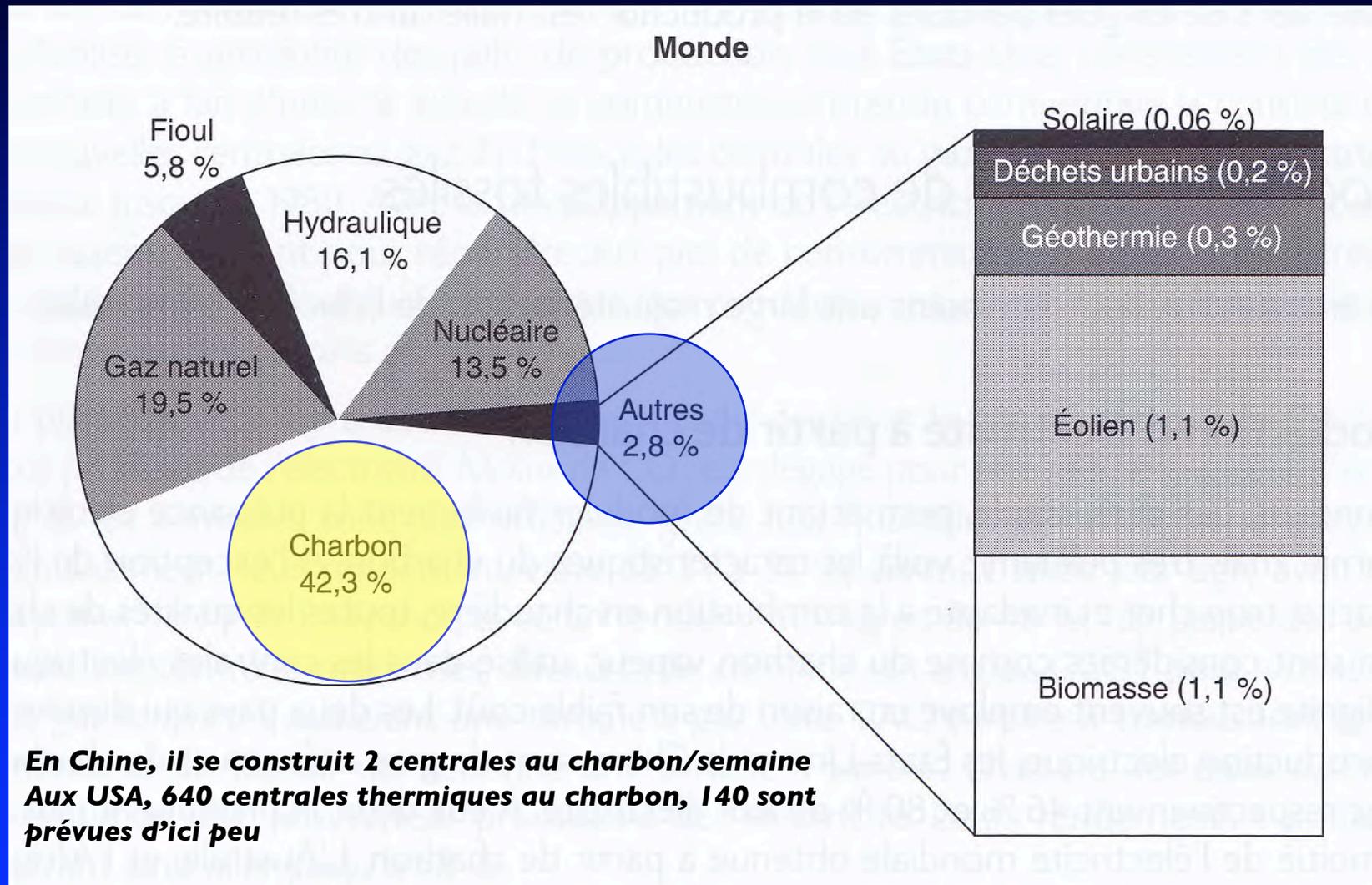
Renewable 2014 Global Status Report

Estimate Renewable Energy Share of Global **Electricity** Production, End 2013



Renewable 2014 Global Status Report

Part relative des différents modes de production d'électricité en 2008



Energy Poor

The world's poorest countries consume only a fraction of the energy used in advanced economies.

Average electricity consumption *Kilowatt-hours per capita per year*

20 | I SELECTED COUNTRIES

United States 13,250

Japan 7,850

Germany 7,100

Albania 2,200

India 680

Bolivia 620

Mozambique 450

Ghana 340

Senegal 190

Yemen 190

Nigeria 150

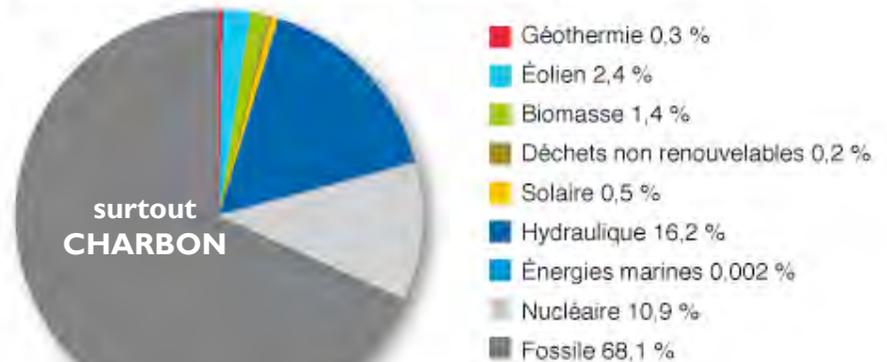
Myanmar 110

Ethiopia 50

Haiti 30



Structure de la production d'électricité en 2012

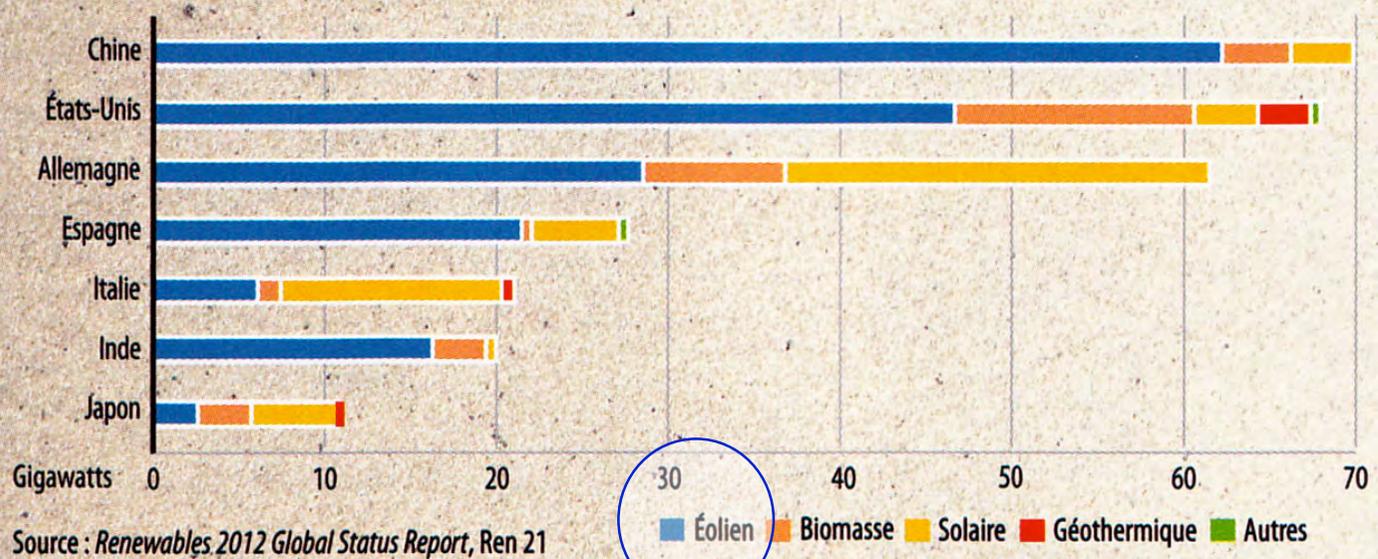
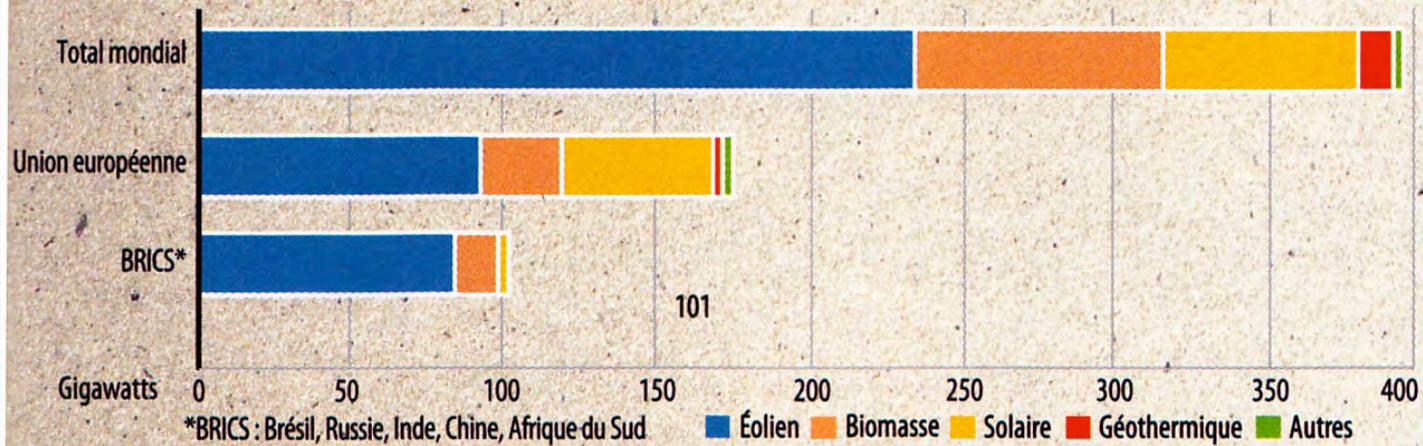


Source : Observ'ER 2013

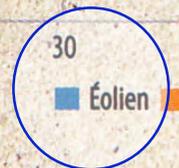
Source: World Bank, By The New York Times, April 2015

Capacités de production énergétique en énergie renouvelable en 2011

(hors énergie hydroélectrique)



Source : Renewables 2012 Global Status Report, Ren 21



Croissance en % de la production d'électricité à partir des ER

(Iacona et al. 2101 adapté des données EIA, mars 2011)



Eolien mondial 2011 = 1,1%
coût hors subvention
= 2X gaz naturel ou nucléaire

Photovoltaïque solaire 2011
= qq 10 millièmes production
électricité mondiale

	Hydrau- lique	Géo- thermie	Éolien	Solaire élec- trique	Bio- masse élec- trique	Agro- carbu- rants.
Période	1980- 2008	1980- 2008	2000- 2008	2000- 2008	1980- 2008	2001- 2008
Allemagne	+8	-	+330	+3700	+440	+850
Autriche	+31	-	+2900	+470	+1500	+1900
Brésil	+184	-	+69000	+137000	+900	+140
Canada	+50	-	+1300	+30	+550	+430
Chine	+800	-	+2000	+650	pas de données	+45000
Danemark	-	-	+70	+180	+1700	+270
Espagne	-20	-	+580	+10600	+1100	+1100
États-Unis	-8	+194	+900	+60	+15300	+540
France	-7	-	+7300	0	+760	+700
Inde	+143	-	+700	+70	pas de données	+110
Japon	-14	+152	+2300	+380	+150	-
Pays-Bas	-	-	+400	+200	+560	-
Portugal	-14	+6000	+3300	+3700	+570	-
Royaume Uni	+30	-	+650	+750	+380	
Russie (depuis 1990)	-4	-	-	-	-	-
Suède	+18	-	+340	+100	+1300	+1000
Suisse	+10	-	+530	+200	+1300	-
Turquie	+195	+4100	+2500	-	+60	-
Europe	+23	+285	+440	+970	+920	+940

Attention: forts taux de croissance parce que petites contributions au départ!
Eolien: +34% (Chine, USA)
Solaire: +47%
Ethanol: +8,1% (USA)

cf www.bp.com (2009)

Qui domine le marché des énergies renouvelables ?

Top 5 des pays par capacité de production d'énergie renouvelable par secteur en 2011

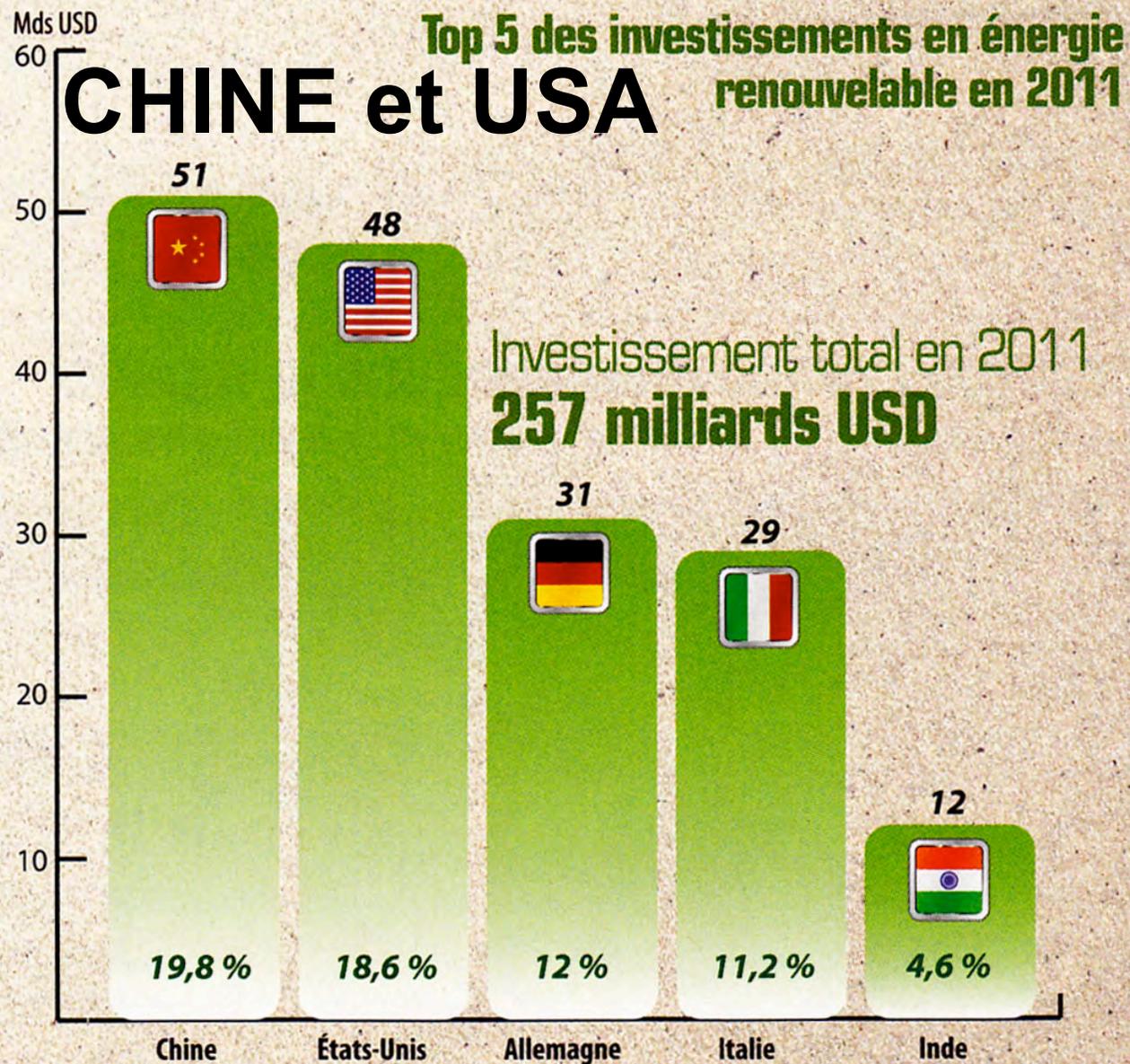
Rang	Total de l'ensemble des énergies renouvelables (incl. hydro.)	Total de l'ensemble des énergies renouvelables (sans hydro.)	Énergie hydroélectrique	Énergie éolienne	Énergie géothermique	Énergie solaire	Biomasse	Production de biodiésel	Production d'éthanol
1	Chine 	Chine 	Chine 	Chine 	États-Unis 	Allemagne 	États-Unis 	États-Unis 	États-Unis 
2	États-Unis 	États-Unis 	Brésil 	États-Unis 	Philippines 	Italie 	Brésil 	Allemagne 	Brésil 
3	Brésil 	Allemagne 	États-Unis 	Allemagne 	Indonésie 	Japon 	Allemagne 	Argentine 	Chine 
4	Canada 	Espagne 	Canada 	Espagne 	Mexique 	Espagne 	Chine 	Brésil 	Canada 
5	Allemagne 	Italie 	Russie 	Inde 	Italie 	États-Unis 	Suède 	France 	France 

Source : Renewables 2012 Global Status Report

in Diplomatie, 12, 2013

Réponse : surtout CHINE et USA

....
ensuite
Allemagne
Italie
Inde



Source : Renewables 2012 Global Status Report, Ren 21

in Diplomatie, 12, 2013

RENEWABLE ENERGY INDICATORS 2013

		START 2004 ¹	END 2012	END 2013
INVESTMENT				
New investment (annual) in renewable power and fuels ²	billion USD	39.5	249.5	214.4 (249.4)
POWER				
Renewable power capacity (total, not including hydro)	GW	85	480	560
Renewable power capacity (total, including hydro)	GW	800	1,440	1,560
 Hydropower capacity (total) ³	GW	715	960	1,000
 Bio-power capacity	GW	<36	83	88
 Bio-power generation	TWh	227	350	405
 Geothermal power capacity	GW	8.9	11.5	12
 Solar PV capacity (total)	GW	2.6	100	139
 Concentrating solar thermal power (total)	GW	0.4	2.5	3.4
 Wind power capacity (total)	GW	48	283	318
HEAT				
 Solar hot water capacity (total) ⁴	GW _{th}	98	282	326
TRANSPORT				
 Ethanol production (annual)	billion litres	28.5	82.6	87.2
 Biodiesel production (annual)	billion litres	2.4	23.6	26.3

**Surface nécessaire pour produire annuellement 10TWh d'électricité
à partir d'énergie renouvelable
(10TWh = production annuelle d'un réacteur thermique moderne)**

Centrales thermiques 'classiques' et nucléaires 1-10km²

Source d'énergie	surface nécessaire
Solaire	100 km ²
Eolien	500 km ²
Solaire photovoltaïque	5000 km ²
Biodiesel (tournesol ou colza)	30000 km ²
Géothermie (pompe à chaleur)	50000 km ²
Géothermie 'géologique'	très faible surface
Hydraulique	faible surface

**ENERGIES
DILUÉES!!!**

lacona et al. 2012

Émissions
de CO₂ *
ou équivalent
CO₂ en g/kWh
par source
d'énergie

> NUCLÉAIRE	6
> HYDRAULIQUE	4 à 7
> ÉOLIEN	3 à 22**
> SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	50 à 150**
> GAZ (cycle combiné)	400
> PÉTROLE (fioul lourd)	850
> CHARBON	750 à 1100*
> BIOMASSE bois	0 à 1500***

* Suivant la technologie
** Suivant lieu de fabrication
*** Si replantation, ou pas
SOURCE : DOCUMENT EDF
ET J.-P. BOURDIER

ÉNERGIES DILUÉES...
MAIS 'SANS' CO₂



2009



- 1 **Photovoltaïque : le silicium s'impose**
par Franck Daninos
- 2 **L'énergie éolienne est-elle vraiment « verte » ?** par Jean-Philippe Braly
- 3 **L'électricité de plus en plus propre**
par Jacques-Olivier Baruch
- 4 **Arthouros Zervos : « Le futur des renouvelables ne s'arrête pas à Copenhague »** Propos recueillis par Yves Sciama

ÉOLIEN

lancé après le premier choc pétrolier en 1973, au Danemark

Europe (pionnière) en 2010 = 5%
consommation électrique, surtout Allemagne



±1 à 2% mondial (électricité)
inconvenient majeur : intermittence
**En Belgique 2012: ± 500 éoliennes
produisent 2% de l'électricité**



Europe (pionnière) en 2012 = offshore
250GW terrestre et 150GW offshore en 2030
(=> ?10% électricité en Europe)

Top 10 des fabricants de turbines éoliennes en 2011

Rang	Compagnie	Pays	Part de marché (%)
1	Vestas	Danemark 	 12,7
2	Sinovel	Chine 	 9,0
3	Goldwind	Chine 	 8,7
4	Gamesa	Espagne 	 8,0
5	Enercon	Allemagne 	 7,8
6	GE Wind Energy	États-Unis 	 7,7
7	Suzlon Energy	Inde 	 7,6
8	Guodian	Chine 	 7,4
9	Siemens	Allemagne 	 6,3
10	Ming Yang	Chine 	 3,6

Sources : Recharge, IHS-EER

Sel
Vagues
Météo

....

Mer du Nord
'milieu hostile'

Coûts des
réparations
NON COMMUNIQUÉS

Des centaines d'éoliennes en mer penchent à cause de la dégradation du ciment

Trends Tendances

16/04/15 à 08:46 - Mise à jour à 09:07
Source : Belga

Des centaines d'éoliennes situées en mer ne sont plus droites et menacent de pencher encore plus. Le ciment utilisé lors de la construction il y a environ cinq ans était censé éviter ces désagréments, mais il a souffert du sel, des vagues et de la météo en général, indique mercredi Eneco.

176
FOIS PARTAGÉ



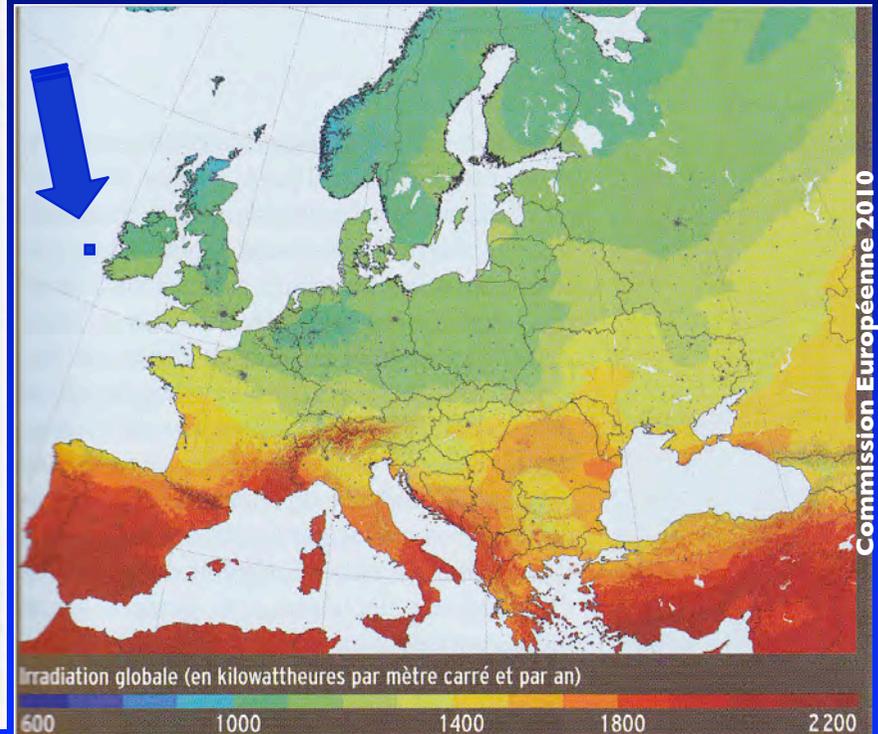
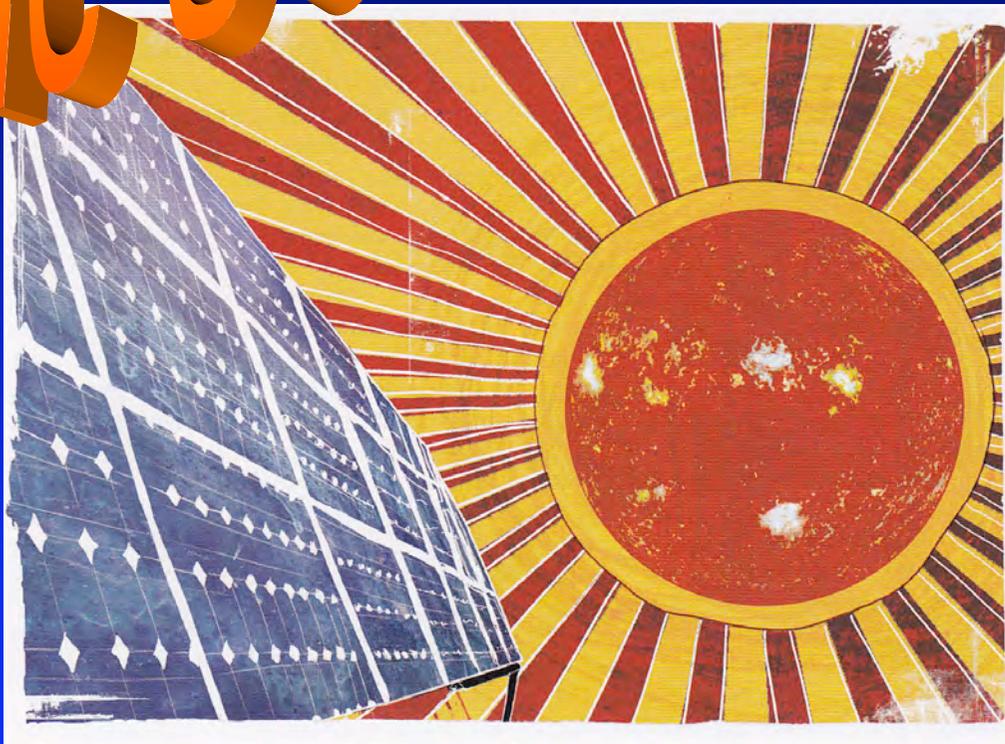
RÉACTIONS 3



Parc Princesse Amamia
au large P-B

LE SOLAIRE

L'énergie de la lumière éclairant un carré de 25 km²/an
= électricité consommée en France pendant un an, soit 550 milliards kWh



Exploitation à partir de cellules photovoltaïques rendement 2010 = 10 à 20%,
en laboratoire = 41% => ?4% électricité en Europe en 2020

Top 10 des fabricants de cellules photovoltaïques en 2011 et 2012

Rang	Compagnie	Pays	Capacité en 2011 (MWc)	Estimation fin 2012 (MWc)
1	Suntech Power	Chine 	2 220	2 746
2	First Solar	États-Unis 	1 981	2 520
3	JA Solar	Chine 	1 690	3 000
4	Yingli	Chine 	1 604	2 450
5	Trina Solar	Chine 	1 550	2 400
6	Motech	Taiwan 	1 100	1 600
7	Canadian Solar	Canada 	1 010	2 000
8	Haeron Solar	Chine 	940	1 376
9	Sun Power	États-Unis 	922	1 200
10	Gintech	Taiwan 	873	1 500

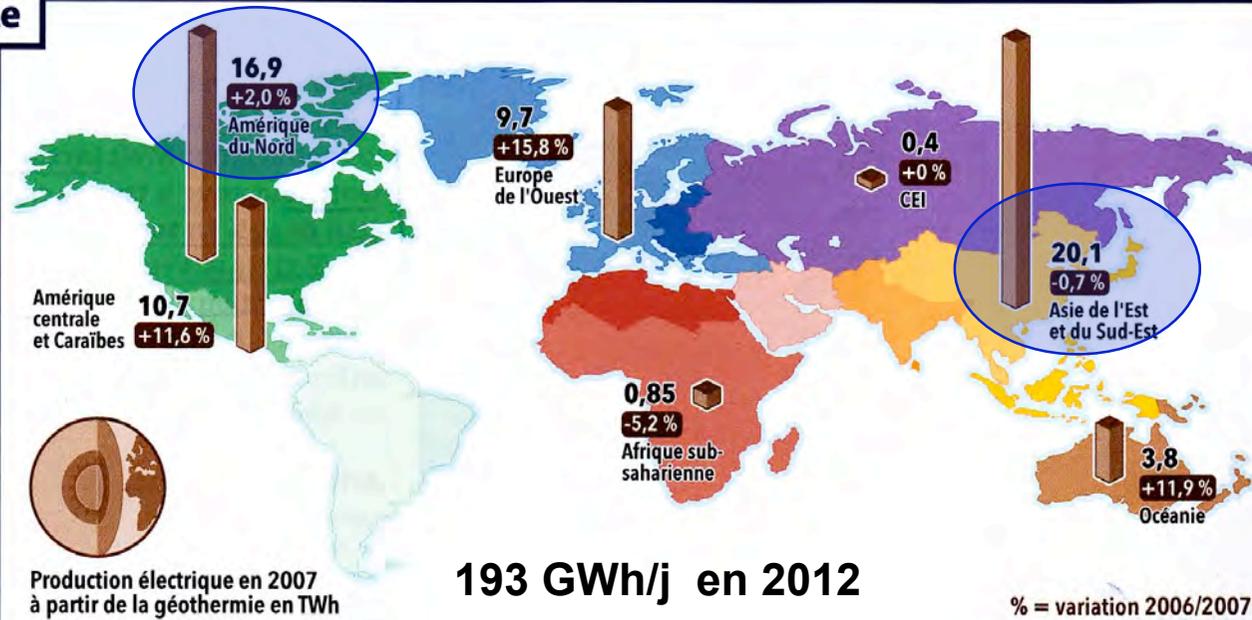
Source : Photon International, Mars 2012

<1%
Cons.
E mondiale
en 2013

Géothermie

La géothermie haute température convertit la chaleur des nappes aquifères (de 100°C à 350°C) en électricité à l'aide de turbo-alternateurs. Elle n'est utilisée que dans les régions d'activité volcanique et tectonique. En 2007, elle représentait 62,6 TWh soit 1,7% de la production d'électricité renouvelable mondiale.

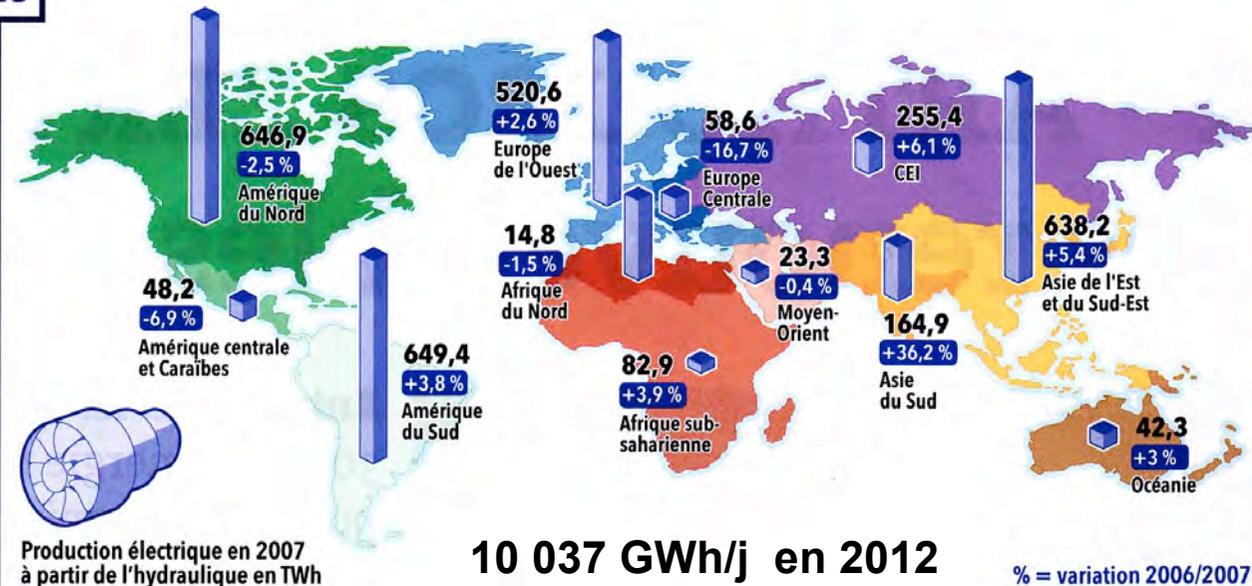
© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS



6,7%
Cons.
E mondiale
en 2013
et
16%
électricité

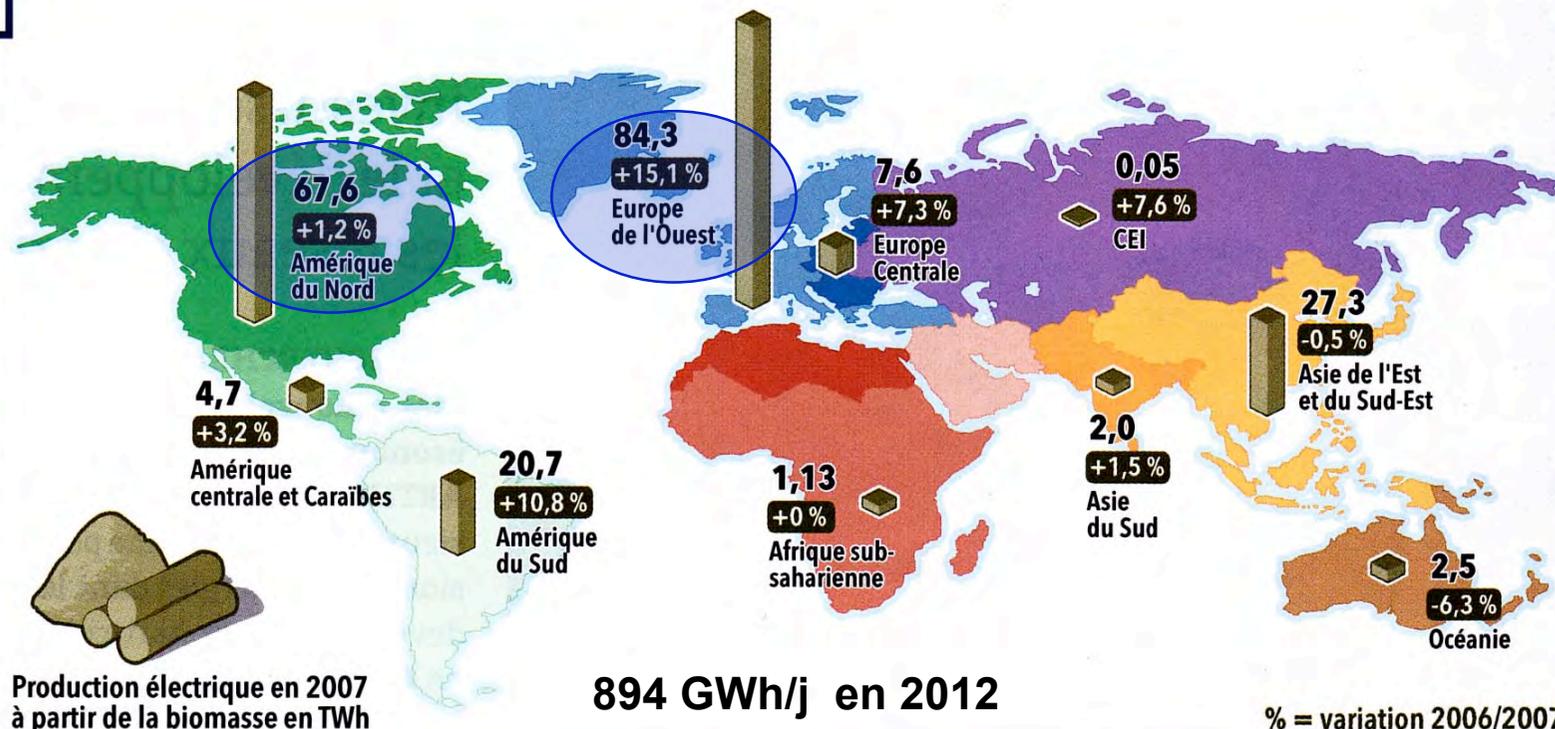
Hydraulique

L'hydroélectricité est la deuxième source d'électricité (3 145 TWh en 2007) derrière la transformation des combustibles fossiles (charbon, pétrole), mais devant le nucléaire. Elle représente 87,3% de l'électricité renouvelable dans le monde. Sa production baisse en Europe centrale, mais croît fortement en Asie du Sud.



Biomasse

Surtout utilisés pour produire de la chaleur, le bois et ses déchets, ainsi que le gaz de décharge ou d'unités de méthanisation ne produisent que 1,1 % de l'électricité mondiale (217,9 TWh), mais 6 % de celle d'origine renouvelable. Ce sont les pays d'Europe centrale et surtout d'Europe de l'Ouest qui investissent le plus.



In La Recherche 2009

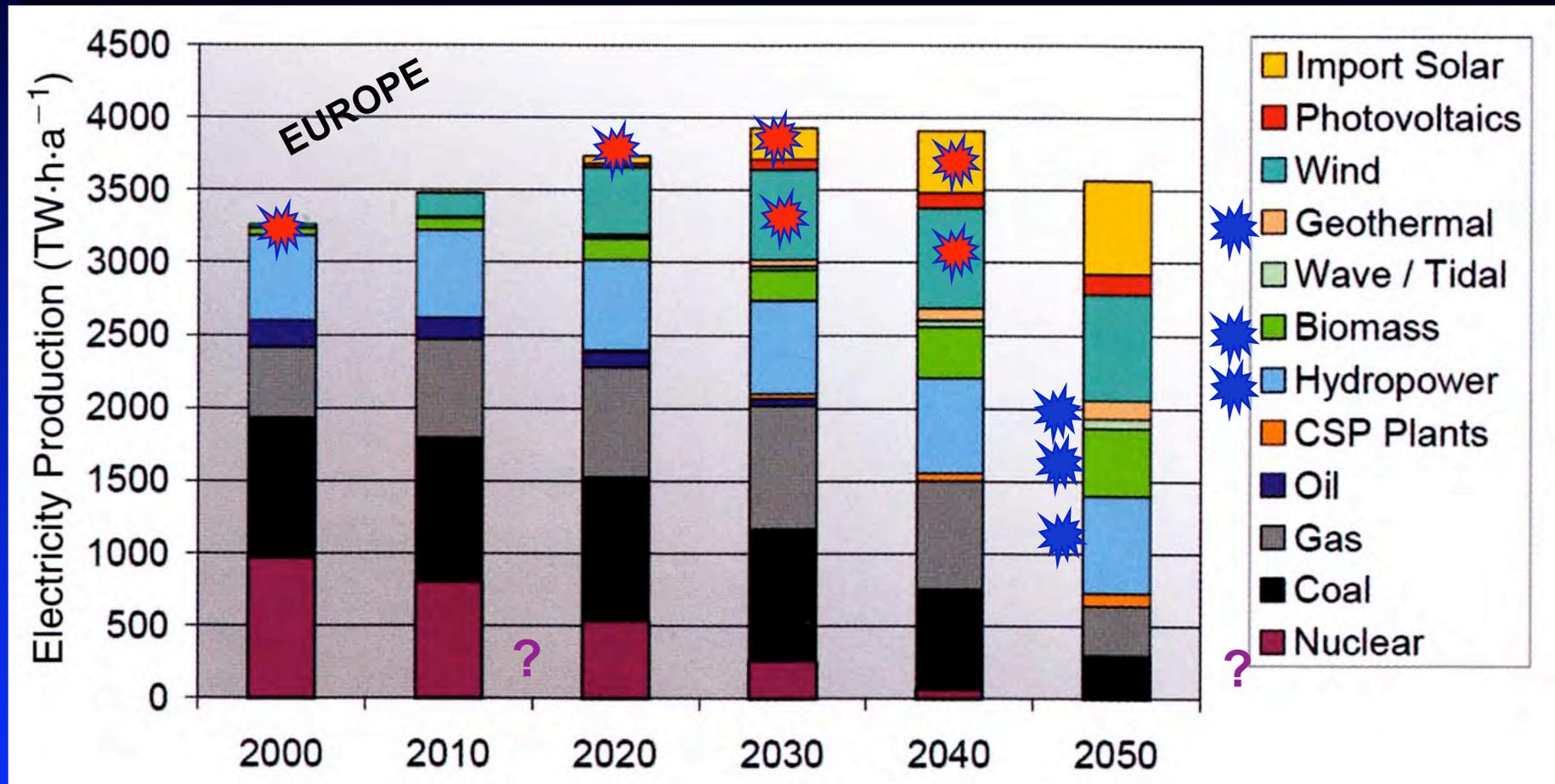
In La Recherche 2009

Emissions de CO₂ ou équivalent CO₂ en g/kWh (décembre 2009)

- Nucléaire = 6
- > Hydraulique = 4 à 7
- Eolien = 4 à 22 (suivant lieu de fabrication)
- > Solaire photovoltaïque = 50 à 150 (idem)
- Gaz (cycle combiné) = 400
- Pétrole (fioul lourd) = 850
- Charbon 750 à 1100 (suivant technologie)
- > Biomasse bois = 0 à 1500 (en fonction replantation ou non)

7,5%
Cons.
E mondiale
en 2013
et
3/4 = BOIS

Les ER ne 'décollent' pas dans la production d'électricité et pour le futur (EUROPE 31 pays)?



<http://www.dlr.de/tt/trans-csp>

CSP = Concentrating Solar Power

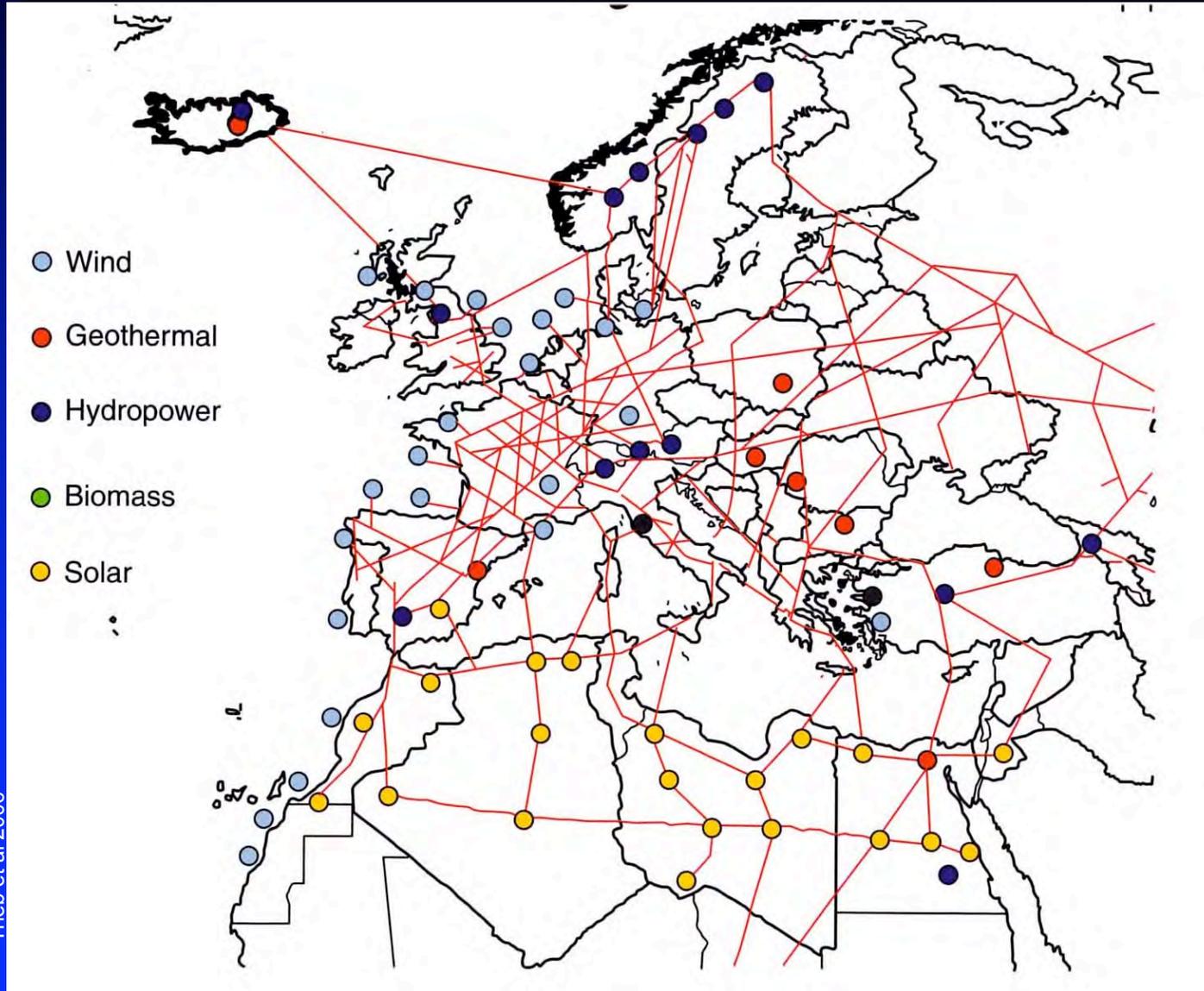
Demande E mondiale en croissance 'constante' => 22Gtep? E 2050

Population 1% - Energie 2% - Electricité 3%

2010: 1,5 G hab n'ont pas accès, en 2030 = 1,3 G hab

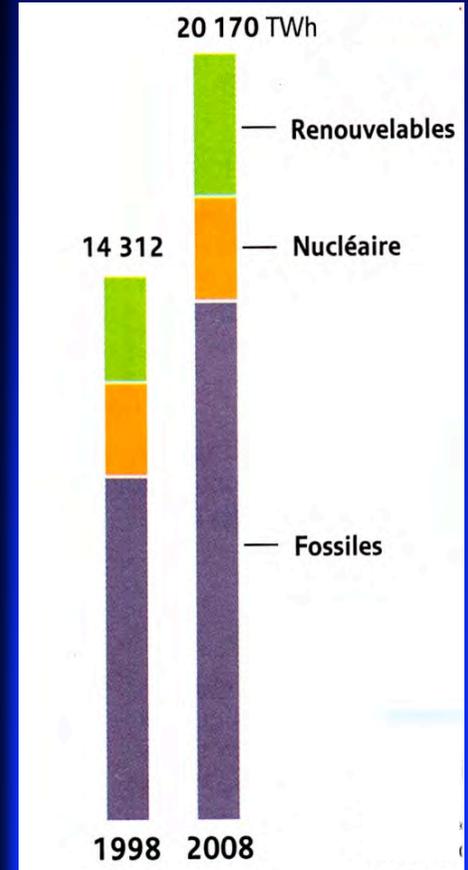
GRILLE EUMENA (Eur, Moyen-Orient, Afr N)

pour pallier le fait que l'électricité conventionnelle ne peut se transférer sur de grandes distances



Trieb et al 2006

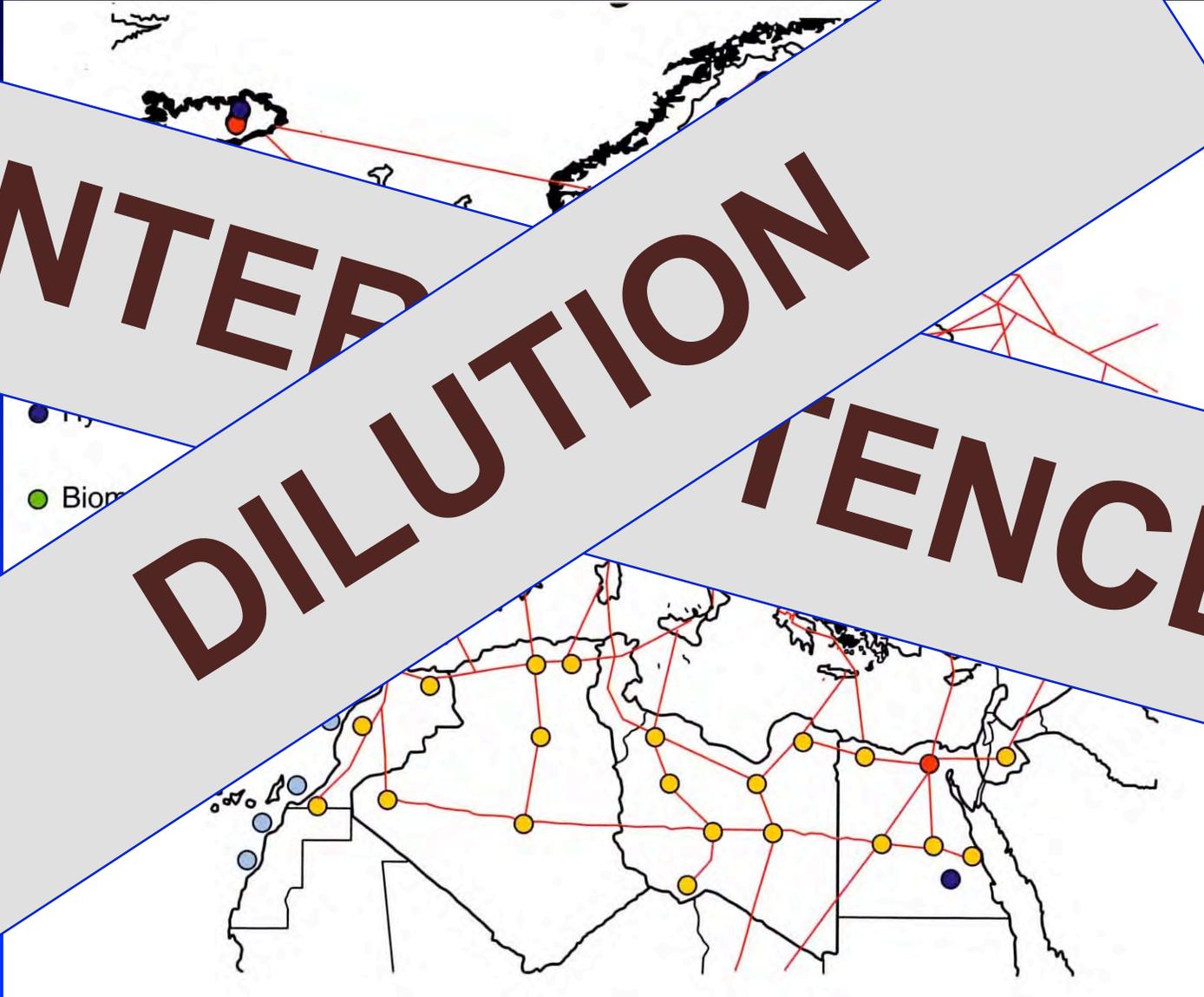
PRODUCTION ELECTRICITE



OBSERVER, EDF 2009

GRILLE EUMENA (Eur, Moyen-Orient, A
pour pallier le fait que l'électricité conventionnelle ne peut se transférer s

**INTER
DILUTION
TENDANCE**



Trieb et al 2006

Manifestation
naturelle : un geyser
en Islande.



2013: 79 pays, production 22Mtep avec $\frac{1}{4}$ = électricité

<http://www.brgm.fr/brgm/geothermie/accueil.htm> 2011 En France = DEUX Réacteurs nucléaires



La chaleur interne de la Terre = radioactivité

Les roches conduisent MAL la chaleur
⇒ la chaleur dégagée en surface est FAIBLE
soit $0,06 \text{ W/m}^2$ (environ 3500x moins que
le flux d'E solaire reçu à la surface du sol)

⇒ si elle était plus forte, la Terre serait depuis
longtemps 'gelée' et la convection thermique,
donc la tectonique des plaques, inexistante

⇒ un tel flux faible n'est pas favorable à la
à la production d'électricité

T° faibles => production seulement de chaleur
T° fortes => production d'électricité



La chaleur interne de la Terre = radioactivité

La capacité ELECTRIQUE géothermale mondiale est de 10 GW, et augmente faiblement (3%/an) depuis 2000. La capacité actuelle serait de 70GW (mondial), et de ?100GW (avec EGS) rien que pour les USA (EGS = projet 'Enhanced Geothermal Systems')

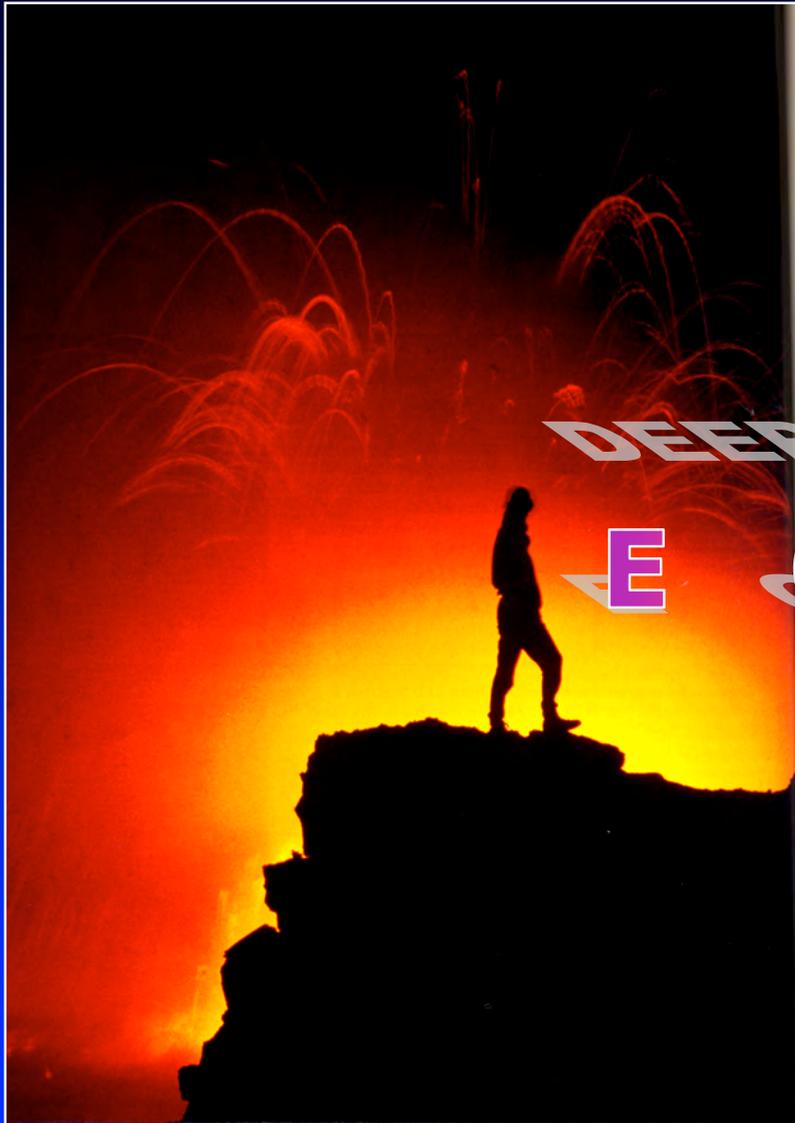
Il y a 10 ans cette capacité surpassait celle de l'éolien => aujourd'hui elle est 10x moindre

Cinq pays produisent plus de 15% de leur électricité avec cette énergie en 2013:

⇒ USA 21%, Philippines 9%, Chine 8%

⇒ Indonésie 6% Islande 5.5%

(% de production à l'échelle mondiale, 2013)



Yellowstone Park,
Wyoming, USA



DEEP HEAT

=

E GEOTHERMALE

Potentiel énorme

Les USA contiennent l'équivalent
de 125 000 fois leur consommation annuelle
en énergie... dans les 'roches chaudes'
(magmas...)

Le contenu énergétique des ressources géothermiques à une profondeur de 3km est estimé à 3 millions de quads, soit l'équivalent de 30 000 années de consommation d'énergie (USA) et à 2000 années de la portion techniquement exploitable à l'heure actuelle

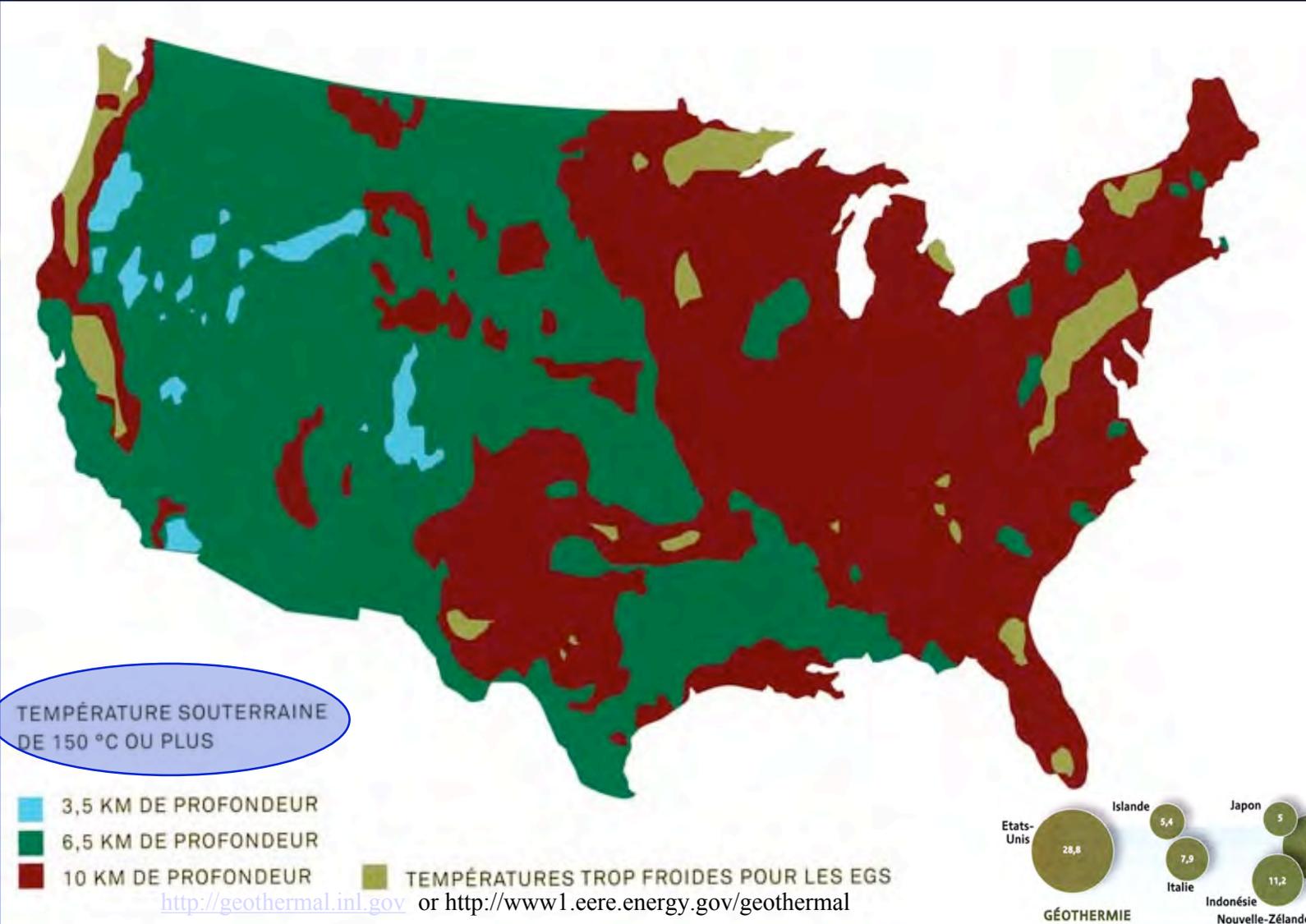
EGS 'Enhanced Geothermal Systems' ou Systèmes Géothermiques Stimulés

= à plus grande échelle et pour le futur => production **SIMULTANEE** électricité et chaleur
(également Alsace, Limagne...)

MIT 2006

Injection
eau
=> 100GW?

Un seul forage
à 3 km
=
5 millions \$!



= 3ème position des ER, derrière l'hydraulique et la biomasse.
Son taux de croissance est plus faible que celui des autres ER

**Principe : la T° augmente avec la profondeur, cela est lié
au flux d'énergie thermique.**

**Bien que le noyau de la Terre soit très chaud (> 5000°C)
et se refroidisse lentement, ce n'est pas à cause de lui
que l'écorce terrestre produit de la chaleur**

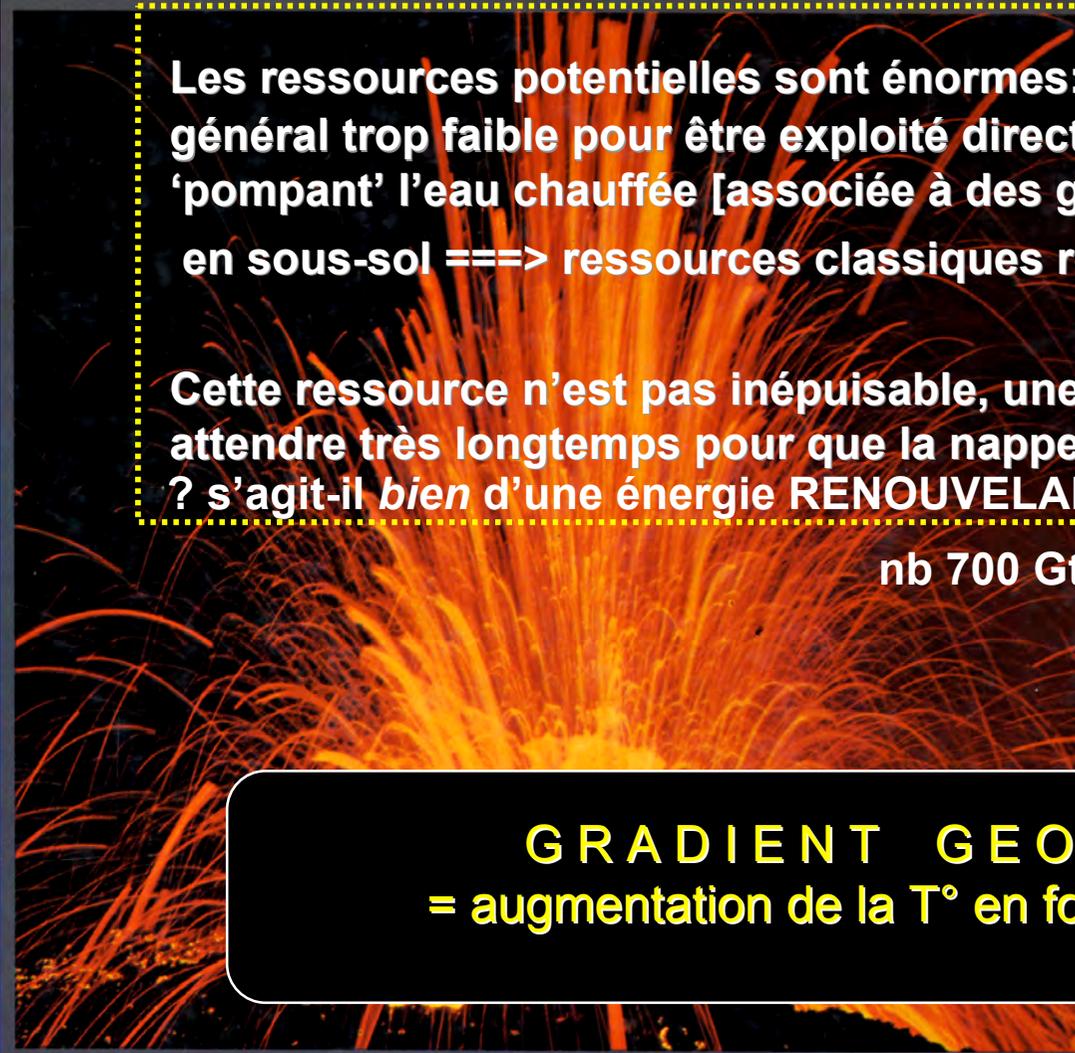


**Cette production a pour origine la RADIOACTIVITE NATURELLE
surtout ^{235}U , ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K dans le manteau**

**La chaleur dégagée est faible (18 J/g/an pour l' ^{235}U , 0,8 J/g/an pour le ^{40}K ,
l'accumulation porte sur des millions d'années et le stockage a lieu dans
des réservoirs naturels (nappes d'eau souterraines, sel....)**

**GRADIENT GEOTHERMIQUE
= augmentation de la T° en fonction de la profondeur**

**Flux géothermique de la Terre: 0,05 à 1 W/m² ↘ zones d'activité sismique
et volcanique**
Gradient géothermique moyen ou normal; 3,3 °C/100m
Durée annuelle d'ensoleillement: 1100 à 1500 kWh/m²/an



Les ressources potentielles sont énormes: **700 Gtep** mais le flux est en général trop faible pour être exploité directement. Cela se fait par des forages 'pompe' l'eau chauffée [associée à des gaz dissous et des sels minéraux] en sous-sol ==> ressources classiques reconnues = **60 Gtep** soit <1/10è

Cette ressource n'est pas inépuisable, une fois la chaleur extraite, il faut attendre très longtemps pour que la nappe se réchauffe à nouveau.
? s'agit-il *bien* d'une énergie **RENOUVELABLE**.....!

nb 700 Gtep = environ 1/3 réserves **PROUVEES** pétrole conventionnel

GRADIENT GEOTHERMIQUE
= augmentation de la T° en fonction de la profondeur

2014 : environ 450 projets dans 64 pays => réserves géoth = X4 en 2035
(représentant moins d'un millièème des ressources en place)

Gradient géothermique : 3,3 °C par 100 m (zones 'normales') [ou 1°/30-40m]
Flux 'moyen' de chaleur géothermique : 0,06 W/m² [60 mW/m²]
[soit 3 500 X moins que le flux solaire reçu à la surface de la Terre]

↓
1°/2,5m
régions
volcaniques
= X10 à X20!

Ex: Bassin Parisien

gradient oscillant entre 3° et 5°C/100m avec fortes variations (Alsace 10°C/100m)

Ex: Islande (zone volcanique)

l'énergie 'sort' spontanément sous forme de geysers ou de sources chaudes

Ex: Limites de plaques tectoniques avec remontées de magmas 'chauds' qui peuvent 'chauffer' des nappes d'eau ou des roches à 1000 m ou 1500 m de profondeur ... Sicile, Açores, Massif Central... Nouvelle Zélande... Yellowstone (200 geysers)

L'énergie géothermique (EG) était déjà exploitée par les Romains

(eau des sources thermales chaudes pour le chauffage, le bain ou à des fins thérapeutiques)

LA PREMIERE PRODUCTION D'ELECTRICITE A PARTIR D'ENERGIE GEOTHERMALE S'EST FAIT EN ITALIE EN 1904

Premier réseau de chauffage urbain géothermique = village Chaudes-Aigues (Massif Central) en 1332 = 30 émergences ou sources de 'Par' à 82°C (la plus chaude d'Europe!) à 300 l/minute

La Terre Solide est une planète **dynamiquement active**
qui reçoit de la chaleur du soleil **et qui en produit**
(les volcans, les séismes, les montagnes, les champs de gravité
et magnétique en sont de nombreux exemples)

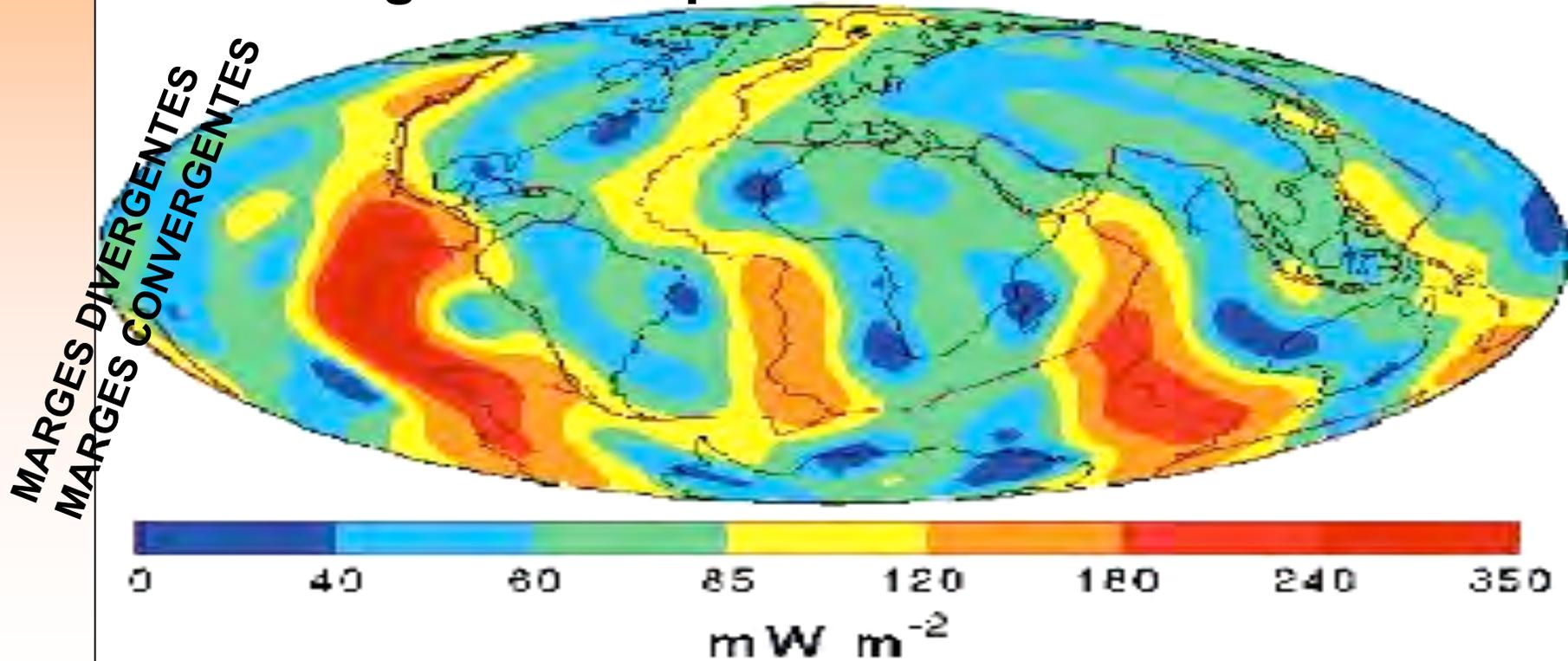
Toutes ces manifestations dynamiques du Globe sont
contrôlées par **l'énergie thermique** de la Terre



D'où vient cette énergie thermique ?
La Terre est-elle en équilibre thermique ?
Quel est son devenir thermique ?

La géothermie est l'étude des répartitions des températures à l'intérieur de la Terre, et des phénomènes physiques et géologiques qui leur sont liés

Le flux géothermique varie de 20 à 100 mW/m²



Flux de chaleur dissipée à la surface de la Terre

	Superficie (km ²)	Flux moyen (mW.m ⁻²)	Quantité de chaleur dissipée (W)
Continents	149,3 . 10 ⁶	58,6	8,8 . 10 ¹²
Plates-formes continentales	52,2 . 10 ⁶	54,4	2,8 . 10 ¹²
Océans	308,6 . 10 ⁶	67,0	30,4 . 10 ¹²
Total			42,0 . 10¹²

FLUX GEOTHERMIQUE MOYEN COMPRIS ENTRE 50 ET 70 mW/m² [ou 1,2 et 1,7 mcal/cm²/s]
ORIGINE DE CETTE CHALEUR?

Les origines de cette chaleur

- L'énergie d'accrétion
- L'énergie de différenciation
- L'énergie radioactive $\pm 90\%$



Chaleur interne	Désintégration radioactive 38 TW	Différenciation + Mouvements + Accrétion 7,3 TW	Total 42,3 TW	Flux moyen 70 mW/m ² X 3500
	Chaleur externe			Flux moyen après dissipation... 1400 W/m ² au sol: 85 à 290 W/m ² 240 W/m² en moy
	X 3500 (au sol) nb 10.000-15.000 X consommation E mondiale...	Soleil 7.10 ⁵ TW	Total 7.10 ⁵ TW	

Les éléments dont la désintégration génère une chaleur importante

Isotope	Taux de production de chaleur massique (J/kg/°K)	Période (Ga)
$^{235}\text{U} \rightarrow ^{207}\text{Pb}$	$5,69 \cdot 10^{-4}$	0,70
$^{238}\text{U} \rightarrow ^{206}\text{Pb}$	$9,37 \cdot 10^{-5}$	4,47
$^{232}\text{Th} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$	$2,69 \cdot 10^{-5}$	14,0
$^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$	$2,79 \cdot 10^{-5}$	1,35

d'après Sclater et al. 1980

**Les concentrations en éléments radioactifs
ne sont pas uniformes dans la Terre.**

**Néanmoins, les roches crustales sont
les plus riches en éléments radiogéniques**

**La production de chaleur interne par la radioactivité est un
mécanisme durable car la période de ces éléments
producteurs est au minimum de 700 Ma**

Que se passera-t-il quand la Terre sera dans un état isotherme ?

Arrêt du volcanisme

Absence de séismes

La convection s'arrêtera

Le mouvement des plaques s'arrêtera

Le champ géomagnétique disparaîtra presque totalement

Les montagnes ne se formeront plus

Le rayonnement solaire sera beaucoup plus intense à la surface de la Terre

Les reliefs disparaîtront progressivement

La vie sur Terre sera modifiée

L'utilisation de la géothermie

Localement, la présence d'un flux géothermique va provoquer un échauffement des roches mais surtout, compte tenu des différences de conductivité thermique, de l'eau contenue dans celles-ci



On distingue les champs géothermiques à basse température ($T < 150^{\circ}\text{C}$ à 1000 mètres de profondeur) et les champs géothermiques à haute température ($T > 200^{\circ}\text{C}$ à 1000 m de profondeur)

La facilité d'exploitation des eaux géothermales dépend essentiellement de la profondeur des gisements

Nécessité d'avoir une source de chaleur de grande capacité

SOURCE D'ENERGIE TRES PUISSANTE

- Les réservoirs géothermaux peuvent atteindre des températures de 700°F/370°C (plus de 3 fois l'eau bouillante)
- Un réservoir géothermal est donc une source très puissante d'énergie!
- On exploite donc un RESERVOIR SOUTERRAIN de chaleur

EXPLORATION ET FORAGE

Les régions les plus chaudes sont situées en bordure de plaques tectoniques

- Ceinture de Feu circum-Pacifique (subduction, marges actives)
- Rides médio-océaniques (plaques divergentes, marges passives)
- Rifts continentaux
- 'Hot spots' ou Points chauds (intra-plaques)

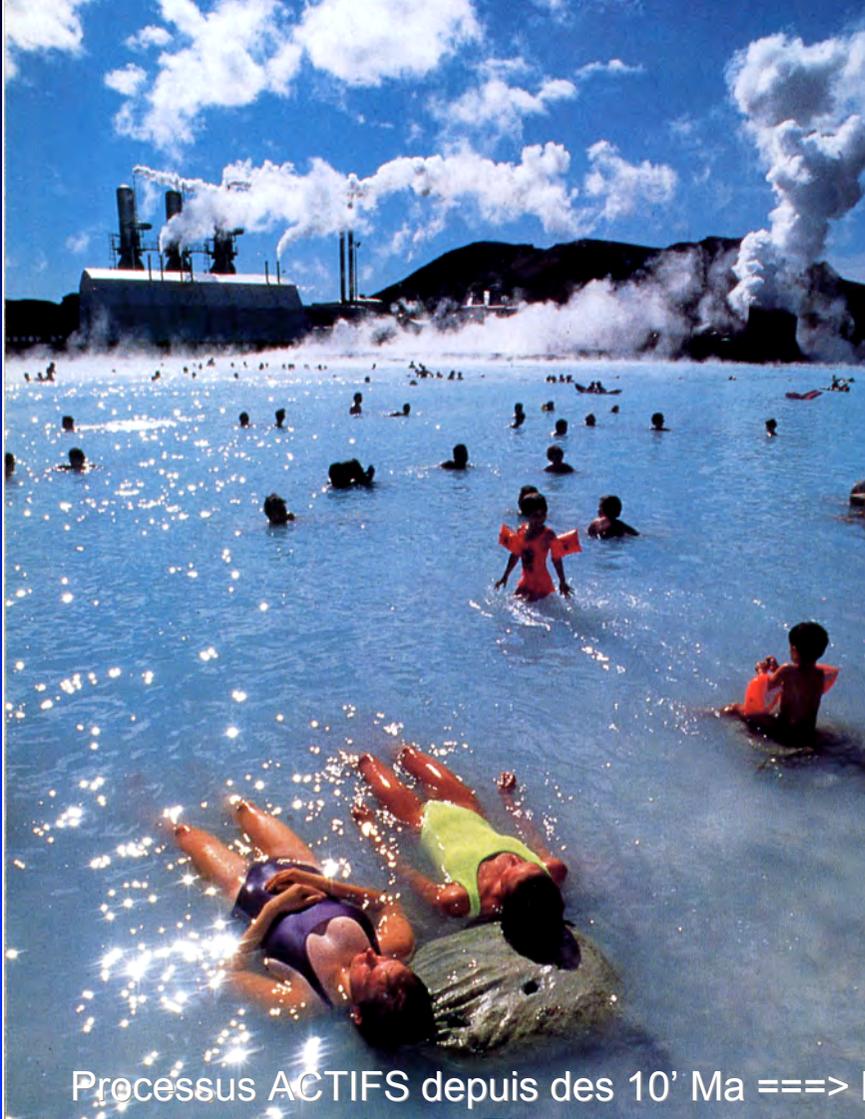
EXPLORATION

- Images satellites et photographies aériennes
- Etudes volcanologiques [Mt Mayo, Philippines, éruption 1999, El Hoyo Nicaragua..]
- Cartographie géologique et structurale [Basin and Range basin, Est de la Sierra Nevada]
- Analyses géochimiques
- Analyses géophysiques [électrique, magnétique, sismique...]
- Gradient de T° (trou de forage)
- ...

MARGES DIVERGENTES

Reykjavik est la 'capitale sans cheminées'
> 80% du chauffage = géothermie

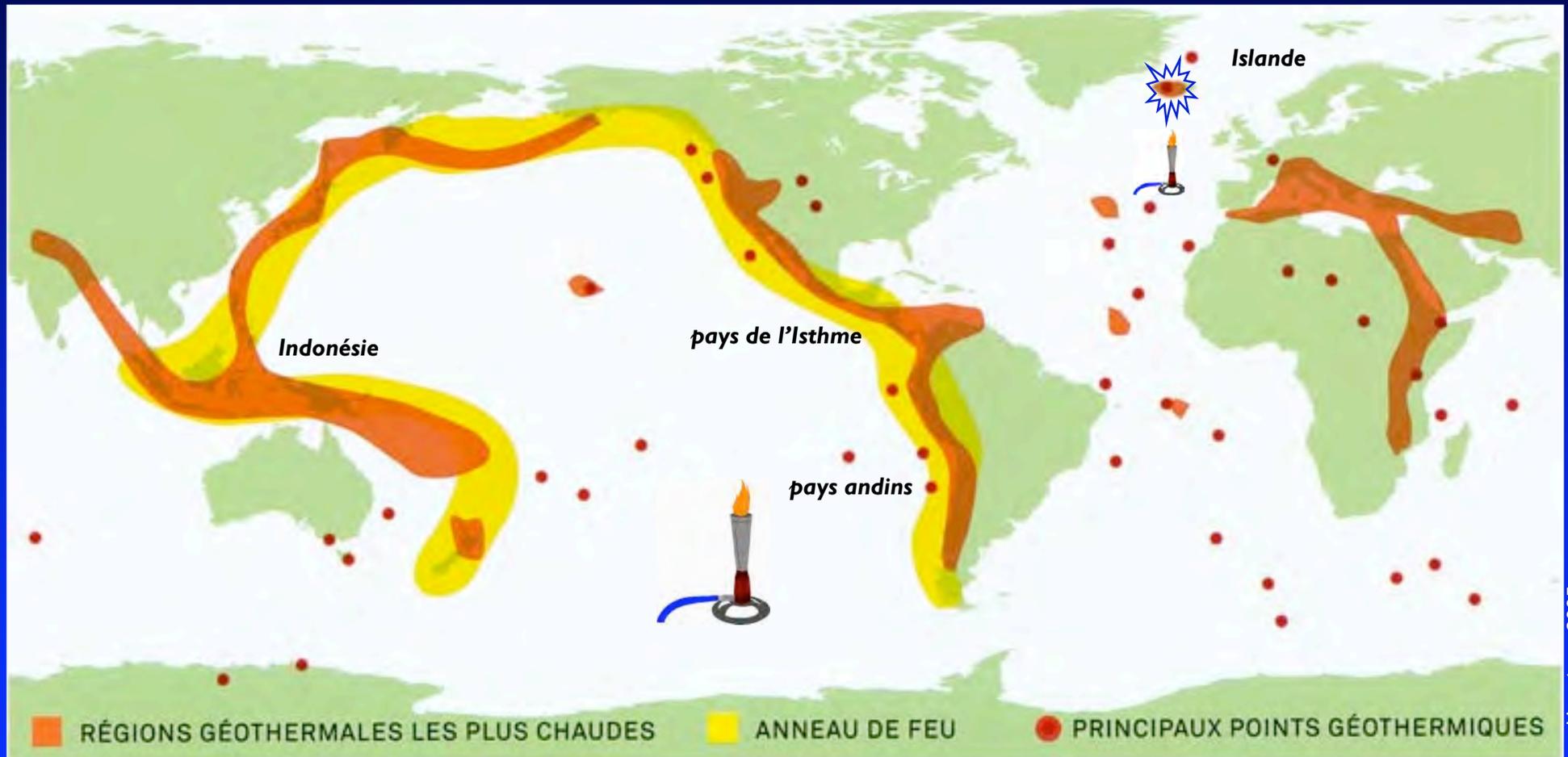
I
S
L
A
N
D
E



Processus ACTIFS depuis des 10' Ma ==> la vapeur d'eau est expulsée par les éruptions volcaniques. Elle provient de l'eau de pluie, stockée sous terre, puis réchauffée...

BORDURE DE PLAQUES TECTONIQUES

LIMITES DE PLAQUES ET POINTS CHAUDS (= 'HOT SPOTS')



EXPLORATION ET FORAGE

Premier forage **d'exploration** de petit diamètre : à partir de la plate-forme d'un camion, la profondeur atteinte est comprise entre 200 et 1500 m, le but est de connaître les roches [lithologies] et les températures [gradients et anomalies]

Puits **de production** à partir de plus grandes plates-formes de forage: profondeur jusqu'à 3 à 4 km, coût de la plate-forme = 1 million de dollars ou plus. Installation de puits 'test ' pour les débits [ex. des puits dans le Désert du Nevada]

EXPLORATION, FORAGE ET PRODUCTION D'ELECTRICITE

LE DOUBLE PUIITS OU « DOUBLET »

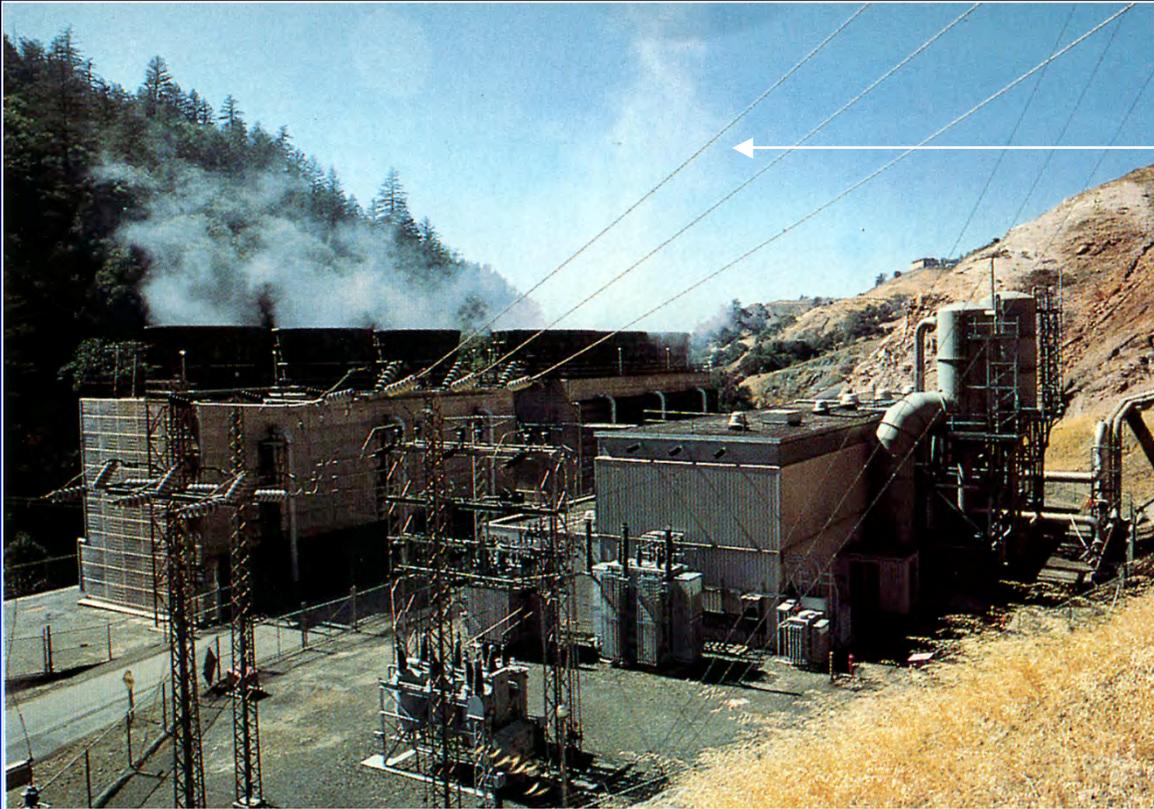
La vapeur 'naturelle' alimente une turbine. La vapeur est condensée par évaporation dans une colonne de refroidissement et renvoyée par un puits d'injection vers le bas pour soutenir la production. On a donc des puits de production et des puits d'injection.

L'électricité est produite à partir du générateur (turbine) et aucun hydrocarbure n'intervient dans le processus ==> le seul rejet = vapeur d'eau ==> l'énergie géothermale est 'PROPRE' et les usines peuvent être installées partout



- dans des prairies ou champs de maïs [Philippines]
- dans des parcs forestiers ouverts au public
- dans des déserts [Mammoth Lakes, Désert de Mojave, Californie]
- dans des forêts tropicales [Mt Apo, Philippines]

SONOMA, CALIFORNIE: un des plus grands champs au monde ==> 'GEYSERS'



= VAPEUR
et **non**
EAU CHAUDE

Fournit 6% de l'électricité en Californie dans les années 90'
= 1500 MW

2009: N Californie avec 22 centrales géothermiques est la plus grande installation géothermique actuelle dans le monde. Produit 60% de l'électricité sur la côte N Californie à partir des sources chaudes situées au N de San Francisco = 'LES GEYSERS' sur une surface de 78km²

Jaillissement de vapeur à partir d'un forage expérimental
Kawah Kamodjang, île de Java, INDONESIE - 1978



Krtaft 1978

LES DIFFERENTS TYPES D'USINES

- VAPEUR SECHE [dry steam] : ce n'est donc pas de l'eau qui est utilisée
Les champs de vapeur sèche sont **rares** = HT 250-300°C, gisements 1 à 3km prfds
=> **production électricité via une turbine**
- VAPEUR FLASH ou à Réservoirs d'eau chaude [flash steam]
Ce sont les champs les plus communs nécessitent séparation eau-vapeur
Ex : Nouvelle Zélande, East Mesa en Californie, Nevada, Japon ...
Certaines eaux contiennent du Zn, de la silice et autres sels
qui sont récupérés et commercialisés [ex Imperial Valley, Californie]
- CYCLE BINAIRE [binary cycle] : la chaleur géothermale de l'eau chaude est utilisée pour 'faire travailler' un autre fluide qui alimente la turbine.
Le second fluide agit comme un vecteur de 'transfert de chaleur'.
Avantage : **les réservoirs peuvent fonctionner à de plus basses températures**
Ex : Soda Lake, Nevada, 25% de l'électricité de Hawaii est fournie par ce système, également en Thaïlande ...

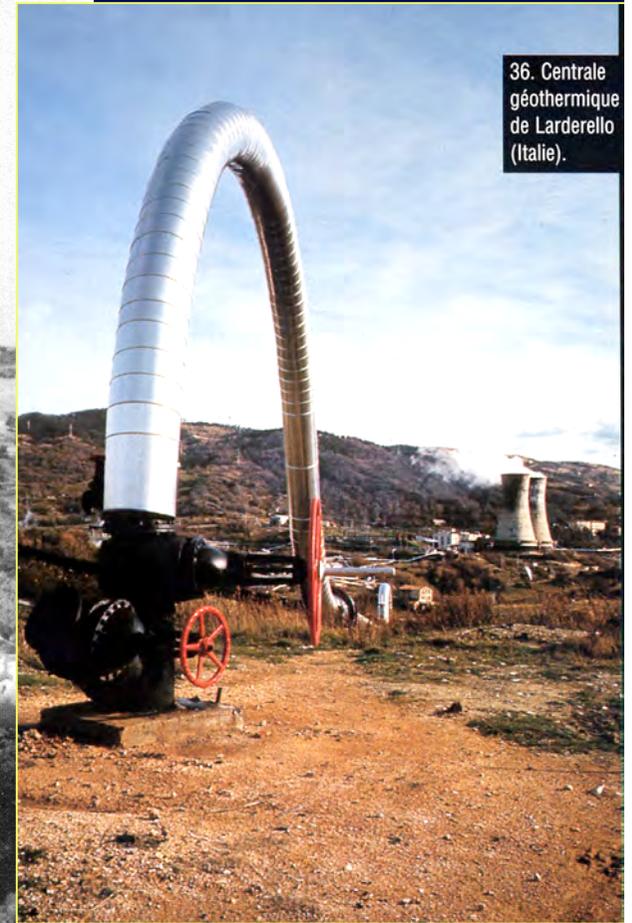
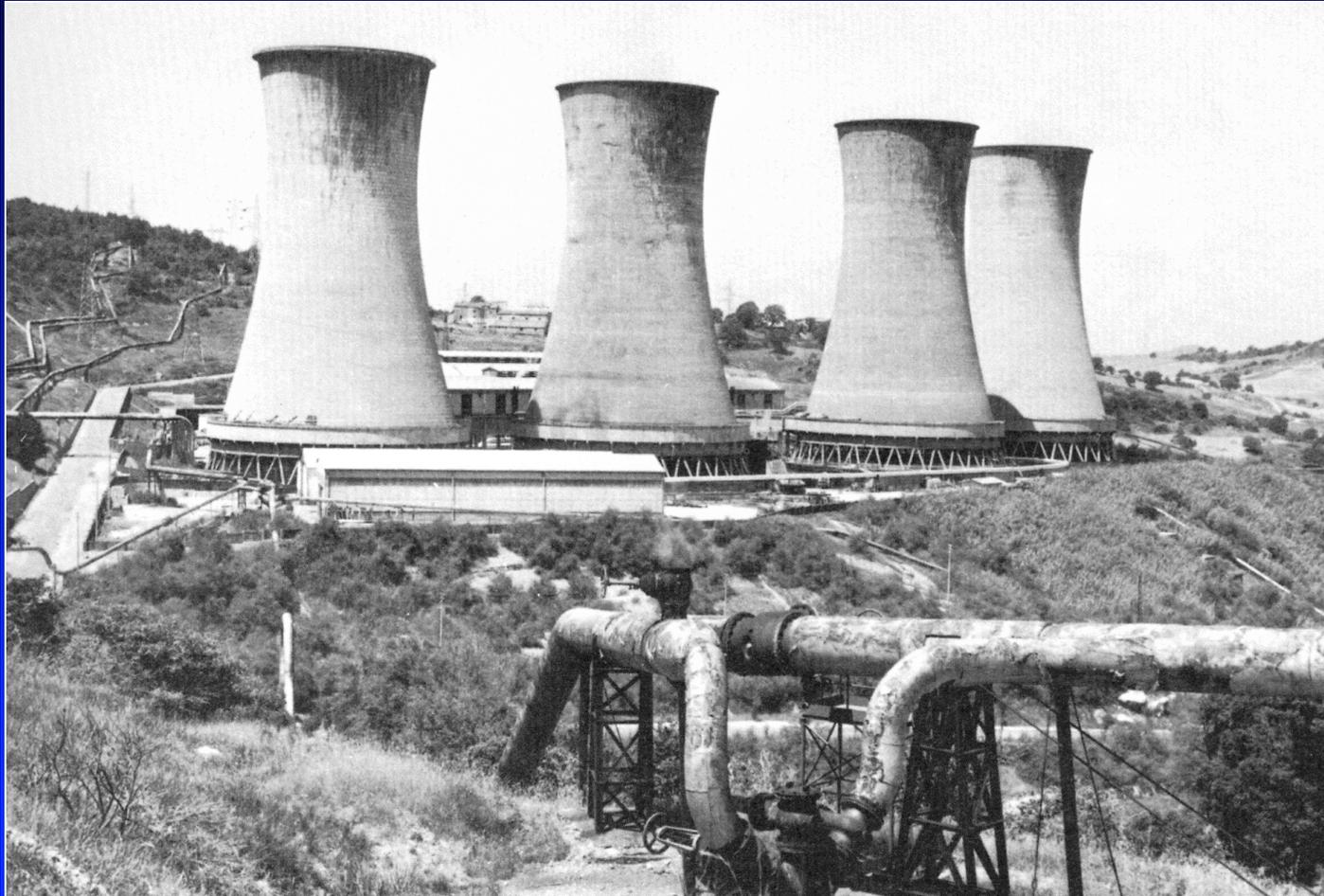
PREMIERE USINE GEOTHERMALE

1904 LARDERELLO en Italie

Conçue par le Prince Piero Ginori Conti à partir d'un champ de vapeur sèche
L'usine rapidement modernisée fut détruite lors de la seconde guerre mondiale, et reconstruite ensuite. Elle produit toujours aujourd'hui, un siècle après la mise en exploitation de ce champ historique.

Les premières usines des USA datent de 1962: champ de vapeur sèche des « Geysers », dans le Nord de la Californie. C'est encore aujourd'hui le champ géothermal avec la production mondiale la plus forte. Il renferme 20 usines qui **recyclent les eaux usées des villes avoisinantes!** dans des puits d'injection (ce qui augmente la production tout en contribuant à améliorer l'environnement).

LARDERELLO, TOSCANE: Réserves les plus grandes du monde



36. Centrale géothermique de Larderello (Italie).

À partir des SOFFIONI, venues de vapeur d'eau surchauffée (450 °C) = 430 MW

AVANTAGES DE L'ENERGIE GEOTHERMALE

- Fournit une énergie 'propre' et de sécurité utilisant peu de surface (occupée)
- Est renouvelable et 'soutenue'
- Fournit une puissance continue et contrôlable ('constante' càd non intermittente)
- N'utilise aucuns hydrocarbures et les préservent donc pour d'autres utilisations
- Contribue à la diversité des sources d'énergie
- Evite les importations d'énergie et bénéficie aux économies locales
- Permet des installations modulaires dans des villages ou villes éloignées
- (• Bénéficie des prospections et des techniques et pétrolières)

DESAVANTAGES: les zones TRES chaudes sont rares, les zones 'normales' sont irrégulièrement distribuées, l'eau peut manquer dans les régions arides, l'eau ramenant la chaleur peut véhiculer des éléments indésirables et provoquer des fuites de CO₂ des champs géothermiques

+ **CORROSION** des tubes par l'eau salée qui détache le Fe => FeS

**L'énergie géothermale apporte des solutions
à la fois locales et globales**

L'E géothermale pourrait apporter 100% des besoins électriques à 39 pays [= 620.000.000 personnes] en Afrique-Amérique Centrale/Sud et Pacifique
www.geotherm.org.PotentialReport.htm

ENERGIE GEOTHERMALE MONDIALE

- Seule la géothermie HT ($>150^{\circ}\text{C}$) est utilisée pour produire de l'électricité
Elle est la **4ème** filière de production d'électricité à partir d'ER [1Hydraulique-2Biomasse-3Eolien]
ce qui représente **0,3% à 0,4%** de la production d'électricité mondiale
- La géothermie ME et BE [<150 et $<90^{\circ}\text{C}$] sert à la filière 'production de chaleur'

<http://www.brgm.fr/brgm/geothermie/accueil.htm>

<http://www.geothermie-perspectives.fr>

UTILISATION DE L'ENERGIE GEOTHERMALE

- Balnéaire (stations thermales)
- Agriculture (serres et réchauffement des sols)
- Aquaculture (poissons, fermes d'alligators, crevettes, ...)
- Usages industriels (séchage et chauffage)
- Chauffage résidentiel (villes, habitations, piscines ...)

Quelques exemples ...

- 95% des habitations de Reykavik sont chauffées à l'énergie géothermale
Reykavik est considérée comme une des villes les plus propres du monde...
- Idem pour la ville de Boise en Idaho : aux Etats-Unis 18 villes sont ainsi chauffées et 270 pourront l'être dans les prochaines années
[elles se situent toutes dans l'Ouest]
- Chauffage urbain également en Pologne, France, Hongrie, Turquie, Italie
- Pompei se chauffait déjà à l'énergie géothermale en l'an 'zéro', la France dès les années 1400.

Selon la T° de la source géothermale, on classe la géothermie en différentes catégories suivant qu'elle produit ou non de l'électricité

1. GEOTHERMIE de BASSE ENERGIE : 50° - 90°C

= utilisation directe par transfert de chaleur (bassin parisien)

France, Russie, Turquie... **et Belgique!**

2. GEOTHERMIE de MOYENNE ENERGIE : 90° - 150°C

= utilisation avec échangeur de chaleur

(Am Centrale, Nvle Zélande, Philippines)

3. GEOTHERMIE de HAUTE ENERGIE : > 150°C

= utilisation par forages

(USA, Philippines, Mexique, Italie, Indonésie, Nvle Zélande...)

Nb GEOTHERMIE de TRES BASSE ENERGIE : 10° - 50°C

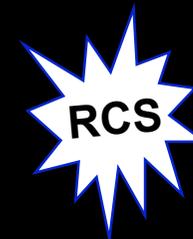
= utilisation par sondes géothermiques

(Suède, Autriche, Suisse, Allemagne...)

Nb ROCHES CHAUDES FRACTUREES = fracturation à 5000m (200°C)

et récupération après injection, USA, France, UK, Allemagne...

+? Risque sismique



Energie des volcans: pas de technologie adaptée aujourd'hui

Selon la T° de la source géothermale, on classe la géothermie en différentes catégories suivant qu'elle produit ou non de l'électricité

1. GEOTHERMIE de BASSE ENERGIE : 50° - 90°C

Géothermie 'basse énergie'

30°C -100°C

sources: qq 100'm jusqu'à 2500 m

[= nappes d'eau]

surtout dans les bassins sédimentaires



si eau peu corrosive ==> chauffage

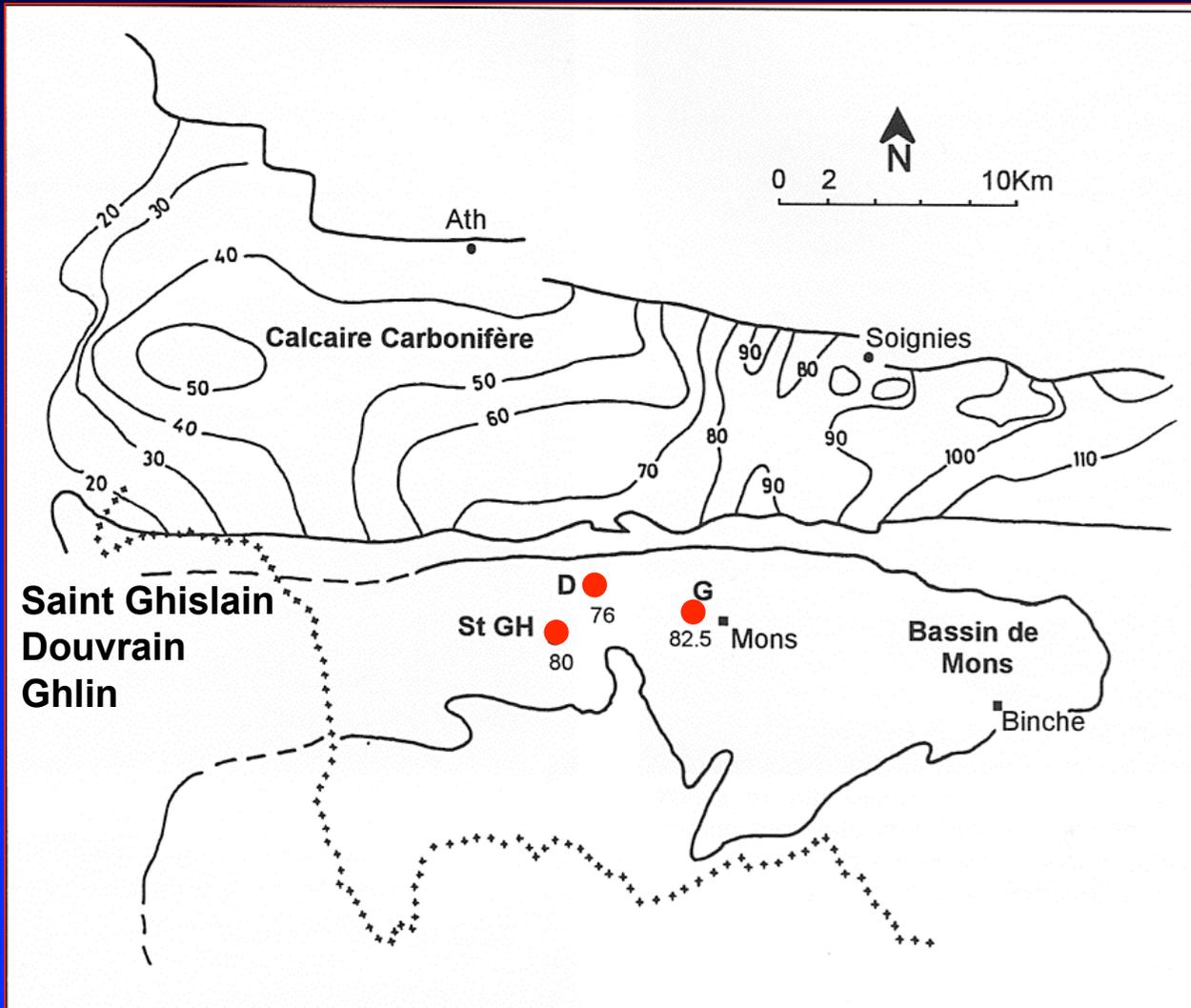
Ex: bassins parisien et aquitain, approvisionnement de 220 000 logements,
= 1 470 GWh/an (économie de 160 000 tep/an et de 700 000 t de CO₂)

1. GEOTHERMIE de BASSE ENERGIE : 50° - 90°C

- convient pour chauffage urbain, des serres, pisciculture, industrie, thermalisme
- mais l'eau 'pompée' ne doit pas être trop corrosive, sinon on la réinjecte après 'perte calorique'
 - Avantage de la réinjection = maintenir la pression de la source
 - Désavantage de la réinjection = refroidissement de la nappe, ex. la T° diminue de 4°C tous les 10 ans (on peut éventuellement la réinjecter plus loin)
- finalement: on réalise un doublet càd 2 forages = puisage et réinjection. L'eau chaude cède dans un échangeur ses calories...

- ◇ Le puits à une durée de vie moyenne de 30 ans,
- ◇ Un doublet qui pompe à 200m³/h d'eau rejette après passage dans l'échangeur de l'eau à 35 °C et produit 8000 thermies [± 1tep], soit l'E pour 2000 à 3000 logements

BULLETIN DE LA SOCIETE BELGE DE GEOLOGIE 105, 77-85 - 1997
DIX DE GEOTHERMIE EN HAINAUT par Delmer et al.



sondages
exploités

Saint Ghislain
Douvrain
Ghlin

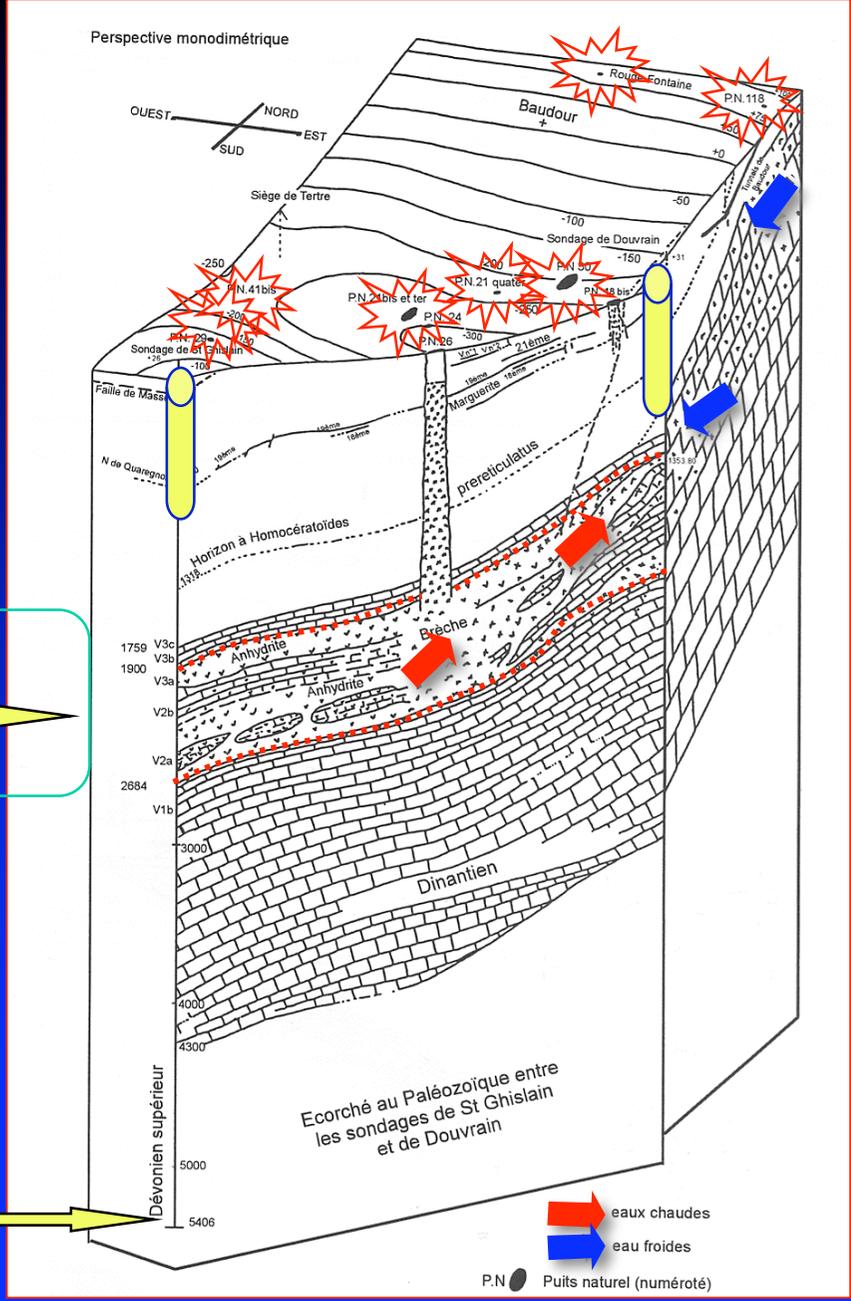
Le forage de St Gh
commencé en 1972
a atteint 5400 m
[en 1979]

L'eau géothermale
est puisée à 2400m

Gradient géothermique : 3°C/100m

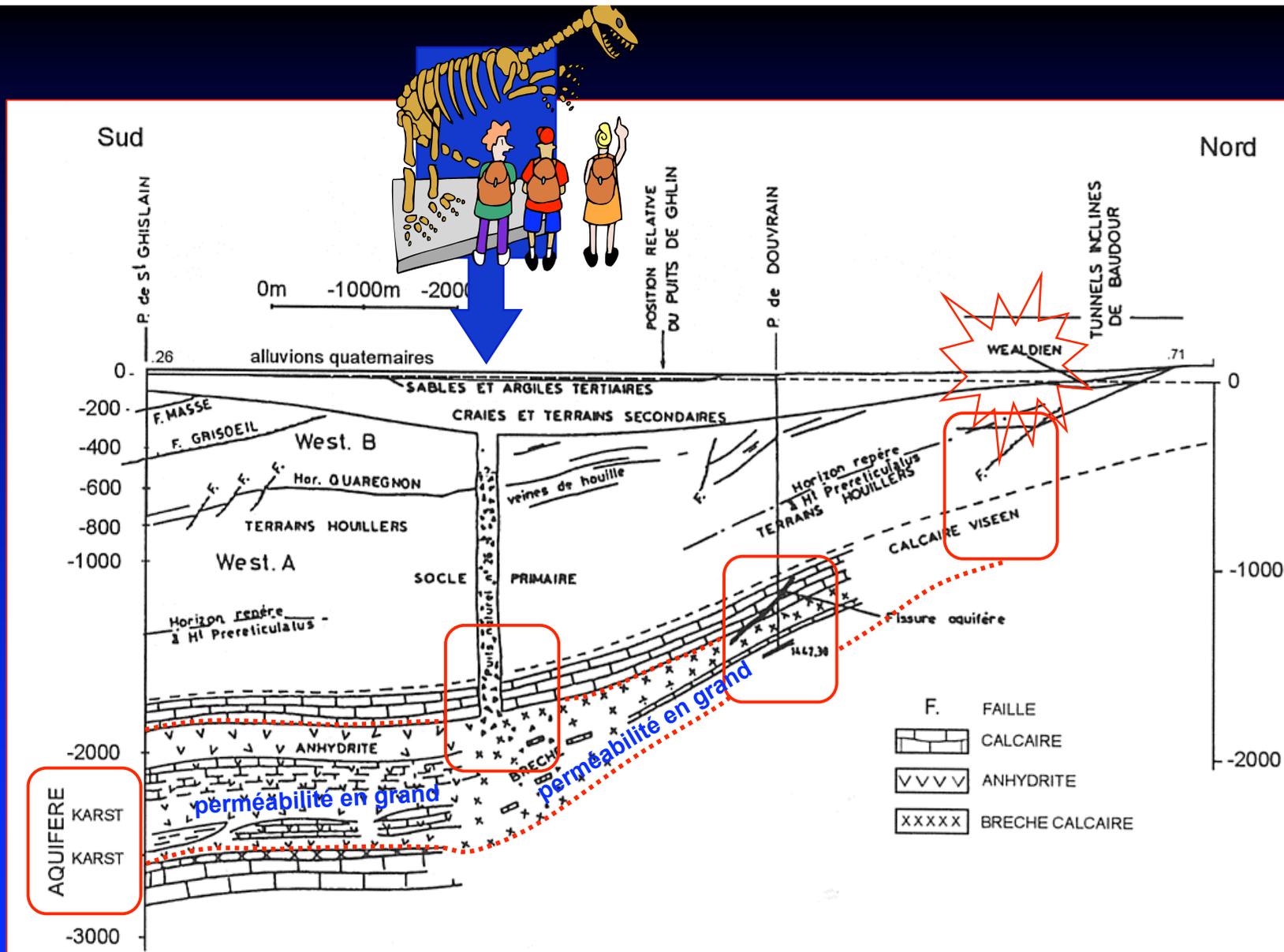
1800 à 2700 m

5400 m



**DISSOLUTION DES SULFATES
ET CHLORURES?
VISEENS [CARBONIFERE)
=
'Perméabilité en grand'

nb
Isotopes du soufre
Concentration CaSO4
dissolution gypse**



PUITS D'EAU CHAUDE GEOTHERMALE (ST-GHISLAIN et DOUVRAIN)

Exploitation IDEA (données techniques APERe 2005 pour la Région wallonne)

- Source : nappe phréatique à 72° située dans le calcaire viséen à 2400 m
- Conduit de l'eau géothermique: 2 km en acier inox, diamètre 244 mm
- A la surface, le puits (St Ghislain) est équipé d'une pompe d'un débit de 150m³/h
- 32 échangeurs de chaleur en plaque d'une puissance totale de 5,2 MW sont utilisés pour le transfert de la chaleur
- L'eau chaude du réseau urbain est dirigée à travers 6 km de canalisations par 3 pompes
- Puissance nominale du réseau : 11 MW
- Energie moyenne : 60 000 GJ utiles/an

Economie en CO₂ : 5 400 t/an

Economie d'énergie : 2,3 millions de m³ de gaz naturel /an

Coût global 5 500 000 € (forage du puits estimé à 50 000 €)



RESULTAT

- 355 appartements sont chauffés +1 hall omnisport +1 hôpital +1 piscine +3 écoles
- . Après cette utilisation, l'eau géothermique n'est plus qu'à 40°C; elle est alors dirigée vers 4000 m² de serres horticoles, et ensuite avant d'être rejetée dans la Haine, les dernières 'calories' 'chauffent' des boues de stations d'épuration qui produisent du biogaz par fermentation

PROBLEME?

- corrosion par le soufre a nécessité de remplacer les canalisations en fonte par des alliages Cu-Sn-Al...

PUITS D'EAU CHAUDE GEOTHERMIQUE (ST-GHISLAIN et DOUVRAIN)

Pour finir

St-Ghislain : environ 500 000 m³ d'eau géothermique est extraite chaque année, avec un débit de pointe de 150 m³/h

==> = environ 9 800 tep [soit en 70 000 bbl ... = **0,0004 % consommation bbl belge/an**]

- La T° des eaux extraites reste stable, les seules variations sont liées à la remontée des eaux (et à leurs débits) depuis le fond jusqu'à la surface, aux faibles débits la T° (de surface) de l'eau chute à 66 °C
- Les eaux sont saturées en sulfates, environ 1,8 g/l soit ± 8500 t en 10 ans
- Pas de changement de la composition chimique depuis 1985, date de la mise en production ==> 'réservoir infini?'



Douvrain : sondage sous-exploité alimentant le conditionnement d'air de la clinique de Baudour

- T° max de 66 °C rarement atteinte en raison du faible débit géothermique < 50 m³/h
- Production moyenne d'eau géothermique = ± 85 000 m³/an
- Importante modification chimique depuis 1985 = ? 'contamination' par aquifères de surface se mélangeant à raison de 20%? aux eaux chaudes en profondeur



CONCLUSION : SOUS L'AXE EST-OUEST DU BASSIN DE MONS L'AQUIFERE GEOTHERMIQUE PROFOND SEMBLE EPAIS, DE GRANDE CAPACITE ET EXPLOITABLE DURABLEMENT, MÊME PAR PLUSIEURS PUIITS. PLUS AU NORD, IL EST REDUIT, MOINS CAPACITIF...



PROJET GeoTherWal financé par la Région Wallonne Avec partenaires industriels (OREX, GeoLys)

2012

Nouveau projet approuvé par le Gouvernement RW = GEOTHERMIE PROFONDE DU BASSIN DU HAINAUT

But : chauffer la future gare de Mons et complexe commercial + production électricité

Moyens: au moins deux forages de 5 km de profondeur (dont un en 2012)

DIRECTION GÉNÉRALE OPÉRATIONNELLE



DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, DU LOGEMENT, DU PATRIMOINE ET DE L'ÉNERGIE

Chaussée de Liège, 140-142, B-5100 JAMBES

Département de l'Énergie et du Bâtiment durable • Direction de la Promotion de l'Énergie durable

GEOTHERWAL

GEOTHERWAL : Optimisation des sondes géothermiques en système fermé.

Montant de la subvention : 1 092 727 €

Durée de la recherche : 48 mois

Programme : Erable

Résumé :

La géothermie est l'un des outils permettant, à un coût modéré, de stocker et d'exploiter un réservoir souterrain de chaleur. Cet outil est encore trop peu développé en Wallonie. Le type d'installation sur lequel porte ce projet est particulièrement intéressant pour des besoins de chauffage de l'ordre d'une ou quelques habitations unifamiliales, domaine dans lequel il existe un fort besoin et un fort potentiel d'économies de chaleur en Wallonie.

Le projet porte sur des installations géothermiques en basse énergie fonctionnant grâce à des forages de 100 à 200 m de profondeur et consiste dans l'optimisation de la géométrie des sondes géothermiques verticales en système fermé et de la nature du coulis de scellement.

L'objectif de ce projet comporte deux facettes complémentaires : d'une part optimiser les échanges thermiques à petite échelle dans le forage et à proximité immédiate de celui-ci, en tenant compte de la géométrie de l'échangeur thermique et de la nature même du coulis de scellement (champ proche), et d'autre part d'optimiser les performances à long terme du réservoir de chaleur sur base d'essais in situ à échelle réelle (champ lointain).

Pour évaluer et optimiser les performances d'une installation géothermique, trois facettes seront développées :

1. des essais en laboratoire pour une caractérisation des propriétés et des réponses au sein du puits ;
2. des essais in situ, en forage géologique avec une instrumentation de pointe ;
3. l'analyse détaillée de ces résultats avec des modélisations numériques à petite et à grande échelle avec un code aux éléments finis.

2011

1. GEOTHERMIE de BASSE ENERGIE : 50° - 90°C

- principale difficulté de l'exploitation thermique = transport de la chaleur
==> les centrales géothermiques alimentent donc leur environnement proche, au-delà de qq km, le rendement diminue notablement
Amélioration: performances (nouveaux) matériaux isolants
[les pertes caloriques sont alors $>1^{\circ}\text{C}$ sur 10' km!] mais coût très élevé...

Selon la T° de la source géothermale, on classe la géothermie en différentes catégories suivant qu'elle produit ou non de l'électricité

2. GEOTHERMIE de MOYENNE ENERGIE : 90° - 150°C

Géothermie 'énergie moyenne'

90°C -150°C (jusqu'à 180 °C)

sources: >200' m à qq km

[nappes d'eau sous pression]

- dans les bassins sédimentaires

- zones volcaniques

[volcanisme actif ou ancien]

- zones de tectonique active



La T° est (encore) trop faible pour produire de l'électricité
avec un cycle ouvert ==> cycle fermé binaire
avec échangeur de chaleur ...

2. GEOTHERMIE de MOYENNE ENERGIE : 90° - 150°C

◇ surtout: Am Centrale, Nvlle Zélande, Philippines

- L'électricité produite va de qq kW à qq MW, et correspond à un investissement compris entre 1000 et 4000 euros/kW
- Installation à durée de vie de 30 à 50 ans
- Technologie: maîtrisée depuis 1980: le fluide géothermal passe dans un échangeur de chaleur et cède son énergie à un fluide de travail (organique ou mélange eau-ammoniaque) se vaporisant à BT et se détendant ensuite dans une turbine couplée à un alternateur, puis se condensant au contact du circuit d'eau d'un condenseur (le liquide obtenu est alors renvoyé à l'échangeur de chaleur pour effectuer un nouveau cycle -vaporisation, détente, condensation, pressurisation).

Selon la T° de la source géothermale, on classe la géothermie en différentes catégories suivant qu'elle produit ou non de l'électricité

3. GEOTHERMIE de HAUTE ENERGIE : > 150°C

Géothermie 'haute énergie

>150°C jusqu'à 350 °C

sources: > 200'm à qq km

[vapeur ou eau liquide sous pression]

- dans les zones géologiques à convection (thermique)

- ◇ **Réserves: > 1 000 000 MW dans le monde**
- ◇ **Exploitation: par forage, extraction vapeur sèche ou humide qui actionne des turbines produisant l'électricité**
- ◇ **Prospection moins coûteuse que la prospection pétrolière**

Islande: la quasi-totalité de la population est chauffée par le sous-sol, la pression d'exploitation est de 3 bars et la T° de 140°C. La chaleur est 'récupérée' à travers des 'cascades d'échangeurs'... (meilleur rendement), ou d'abord utilisée par les industries puis par les autres utilisateurs (maisons, serres...).

3. GEOTHERMIE de HAUTE ENERGIE : > 150°C

Guadeloupe, complexe géothermique de la 'Bouillante', à l'ouest de Basse Terre, inauguré en 1985, puise son énergie à 300 m de profondeur, dans un aquifère chauffé à 250 °C par le massif de la Soufrière

= **Gisement exceptionnel** et 'inépuisable' fournissant 150 t/h d'un mélange de vapeur d'eau

= **Centrale électrique** débitant 4,8 MW qui devrait produire 20 MW et **assurer 15% de l'électricité de la Guadeloupe**

Rejets: uniquement eau ou vapeur d'eau

Nouvelle Zélande: **Centrale de Wairakei** (1958) ne produit plus que 160 MW sur les 175 MW à son apogée. L'épuisement du gisement entraîne une baisse de pression et **un affaissement de terrain de 14 m nécessitant la réinjection d'eau dans la nappe**

EGALEMENT GEOTHERMIE HAUTE TEMPERATURE HORS ZONE VOLCANIQUE

RCS

= systèmes conductifs

Ex. Réchauffement de l'eau injectée dans des ROCHES CHAUDES SECHES (RCS) préalablement fissurées = technique en voie d'expérimentation à SOULTZ-sous-FORET, en Alsace, Graben du Rhin
Flux géothermique = ± 90 mW/m², roche exploitée = granite carbonifère (330 Ma)

- injection eau à 3600 m-5000 m dans des granites fissurés à 160 °C, p = 350 bars
- Récupération vapeur à 150 °C et 142 °C en surface avec débit de 3 000 m³/h
- . Gradient géothermique: 10,5 °C/100 m dans les premiers 900 m et normal ensuite.
- . Résultat: Prolongation des forages à 5 000 m pour atteindre 200 °C et récupérer en surface 190 °C avec débit de 350 m³/h et production d'électricité

Il s'agit du plus grand projet « roches chaudes fracturées » au monde

- 20 années de recherches, 80 M€ investis,
- production 2015 : 1,5MWe et 13MWth

Risque
Sismique?

EN CONCLUSION ...

'POUR'

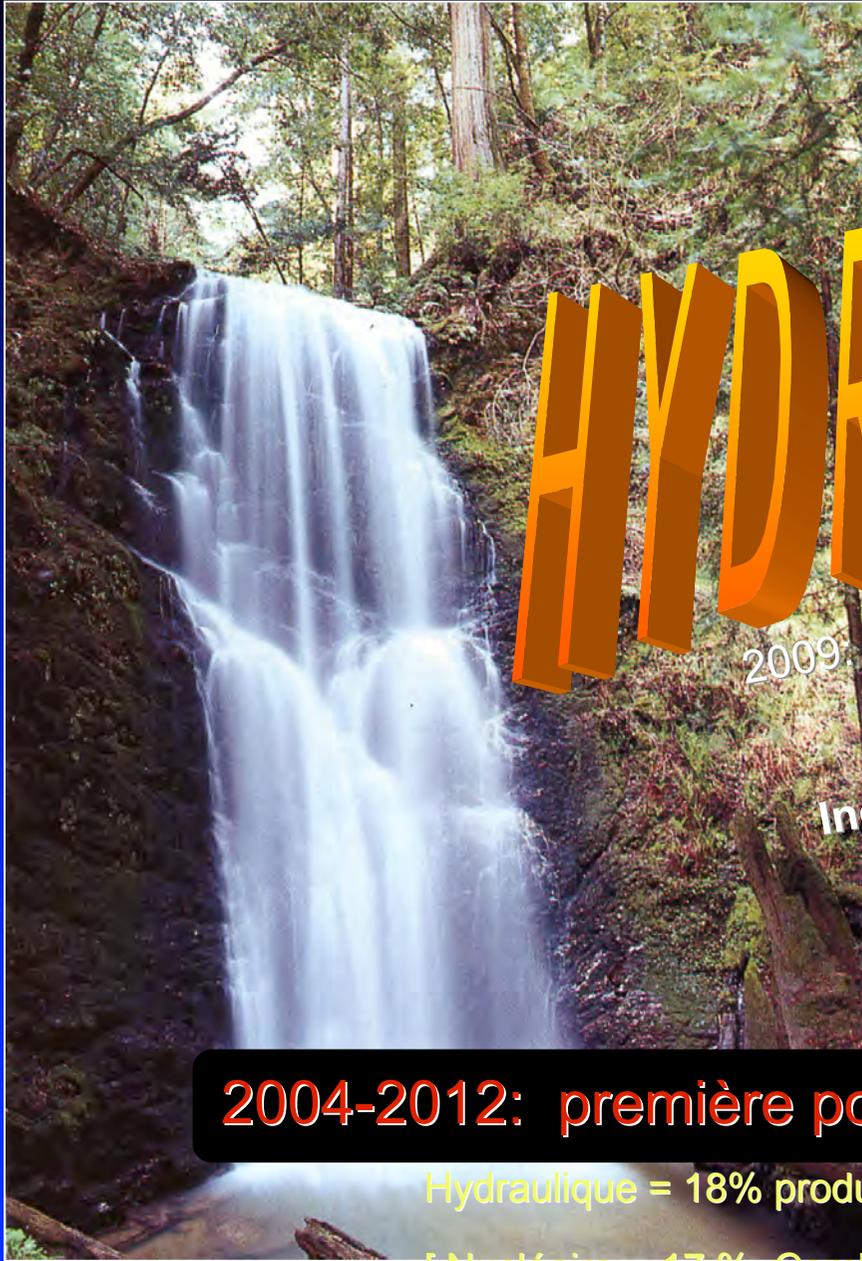
- le principal attrait de l'E géothermique est SA CONCENTRATION = forte production d'électricité à partir d'une surface au sol réduite
- le secteur PROGRESSE actuellement, mais est largement dépassé par d'autres ER

'CONTRE'

- l'extraction de vapeurs souterraines entraîne la remontée de polluants tels que H₂S ainsi que des minéraux-métaux toxiques susceptibles de polluer les lacs et les rivières

'POUR' ou 'CONTRE'

- les centrales géothermiques rejettent également du CO₂, mais les émissions sont de l'ordre du millième de celles des centrales à combustibles fossiles



HYDRAULIQUE

2009

2008 = 8% électricité USA
Trois-Gorges (capacité 22,5GW/prod 92,1TWh) Chine
2X le solaire mondial, 12RNU
Inondation 600km² et 4millions de paysans chassés
2% électricité Chine en 2009

Soit 10X plus que solaire+géothermique+éolien

2004-2012: première position des énergies renouvelables

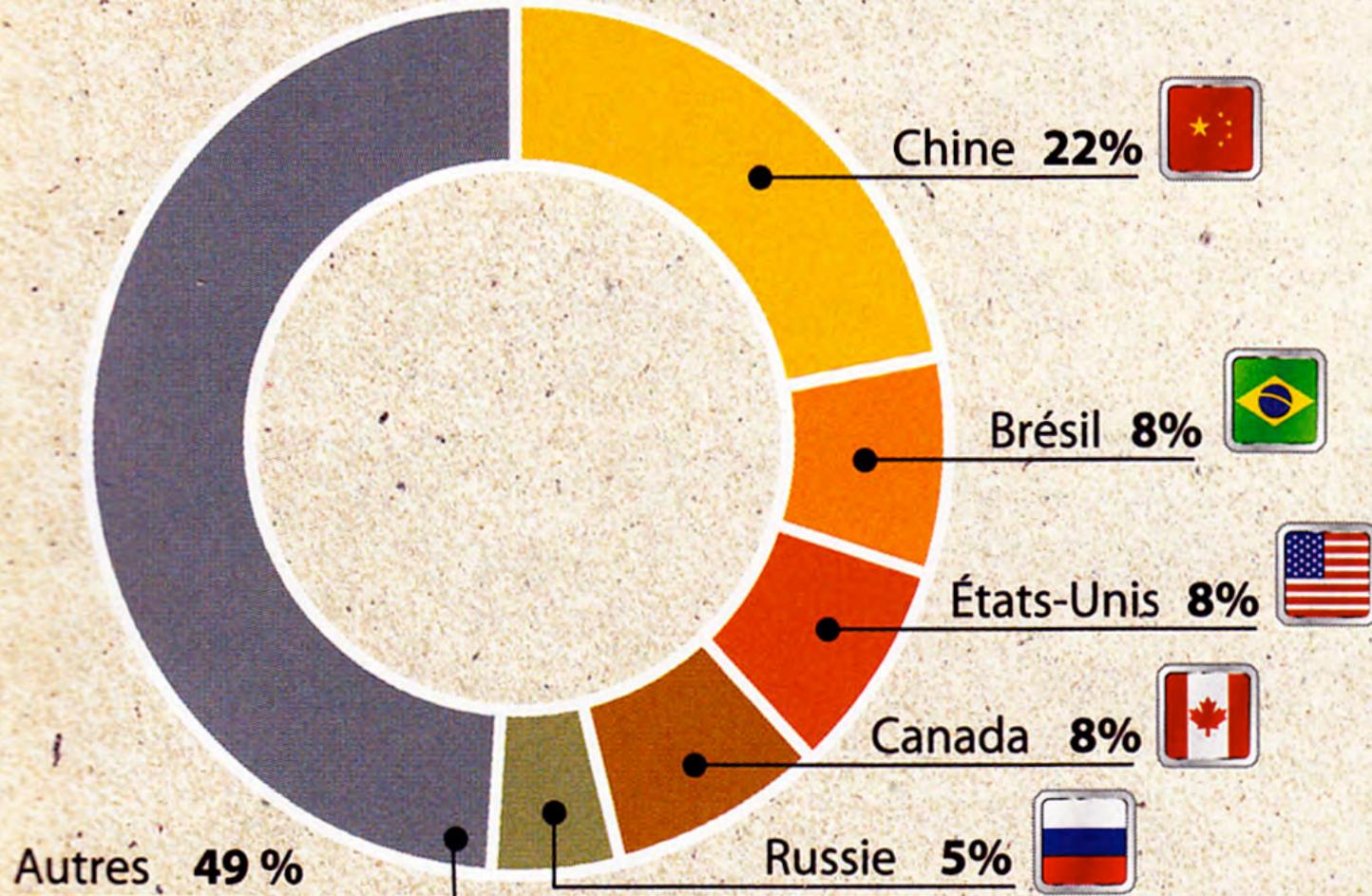
Hydraulique = 18% production électrique mondiale années 2000'
= 5% de l'E totale mondiale en 2005

[Nucléaire = 17 %, Combustibles fossiles = 64 %, Autres ER = 1%]

TOP 5 des pays producteurs d'hydroélectricité en 2011

2008: 13 000 grands barrages ('houille blanche')

Nb total barrages (incluant les 'petits' = 45 000 pour 160 pays)



2013
part prod
Mondiale
(sur les 150 pays)

Chine 24,1%
Canada 10,5%
Brésil 10,4%
USA 7,4%

COMME TOUTES LES ER, CELLE ISSUE DE L'EAU EST DILUEE ==> CONCENTRATION NECESSAIRE
= LACS DE RETENUE (BARRAGES) POUR STOCKER L'ENERGIE

E
A
U
D
E
C
O
U
L
E

- Très inégalement répartie, avec régions sans pluie (Mont Cameroun, Sahara) et régions très arrosées, avec $10 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{an}$ [région de Cherrapunji, Inde],
- Ecoulement mondial = $12\,000 \text{ Tm}^3$. Mais situation 'évoluant' car certains fleuves ont été amputés de 80% ou 90%, voire 100% [ex. des rives de la Mer d'Aral ayant avancé de qq 10' de km en moins de 30 ans, l'eau des fleuves Amou-Daria et Syr-Daria étant prélevée pour l'irrigation des plantations de cotons...]

**LA CAPACITE TOTALE DES BARRAGES EST DE 4 Tm^3 ,
LEUR VOLUME PERMET DE PLANIFIER LE DEBIT DES FLEUVES
ET D'ATTENUER LES EFFETS DES CRUES ET ETIAGES**

**L'AMELIORATION APPORTEE AU CYCLE NATUREL N'EST QUE DE 16 % ,
ET LE POTENTIEL DE PROGRESSION INFIME, LES SITES STRATEGIQUES
IMPORTANTES ETANT EXPLOITES OU SUR LE POINT DE L'ETRE**

Eau = recouvre 72% surface Globe mais seul 0,7% d'eau douce est disponible
 Avec 9 pays prenant 60% de la ressource [17000m³/personne en 1950 => 5100m³ en 2020?]
 Consommation 567litres/j/hab (usa), ±150 Eur et < 10 Afrique

Qui sont les plus gros consommateurs d'eau ? 2012

Rang	Pays	Prélèvement total (en km ³ par an)	Part dédiée à l'agriculture (%)	Part dédiée à l'industrie (%)	Part dédiée aux municipalités (%)
1 ^{er}	Inde 	761,0	91	2	7
2 ^e	Chine 	554,1	65	23	12
3 ^e	États-Unis 	478,4	40	46	14
4 ^e	Pakistan 	183,5	94	1	5
5 ^e	Indonésie 	113,3	82	6	12
6 ^e	Iran 	93,3	92	1	7
7 ^e	Japon 	90,0	63	18	19
8 ^e	Vietnam 	82,0	95	4	1
9 ^e	Philippines 	81,5	82	10	80
10 ^e	Mexique 	80,3	77	9	14

LA CAPACITE TOTALE DES BARRAGES EST DE 4 Tm³

Les prélèvements liés à l'activité humaine = 3,5 Tm³ puisées
dans les nappes superficielles et souterraines

Les restitutions au cycle de l'eau ne sont que de 1,6 Tm³
[90% est consacré à l'irrigation des cultures]

MAIS L'EAU REJETEE EST PROPRE ≠ USAGES DOMESTIQUES ET INDUSTRIELS

De plus: le réchauffement climatique entraîne un accroissement de 3 % de l'évaporation de l'eau douce

La gestion de l'eau est en équilibre lorsque les prélèvements < 20% des apports moyens annuels

En EUROPE: on prélève > 20% [car la disponibilité moyenne de l'eau est > demande
= politique à court terme et dégradation prévue en 2070 avec consommation > offre]

Probablement même AVANT car POLLUTION!

EXPLOITATION DE L'ENERGIE HYDRAULIQUE

basée sur la variation d'E potentielle de l'eau en fonction de la hauteur

- * Un corps de masse m situé à une hauteur h a dans le champ de pesanteur terrestre dont l'accélération est g une énergie potentielle mgh .
- * S'il passe de la hauteur $h1$ à $h2 < h1$, son E diminue de $mg(h1 - h2)$.
- * On peut récupérer une partie de cette E lorsque l'on fait passer de l'eau dans une turbine.



La puissance extraite (d'une chute d'eau) est proportionnelle à son débit et à sa hauteur: toutes les situations intermédiaires entre hautes chutes/faibles débits et faibles chutes/fort débit existent



BARRAGES

RETENTION EAU LAC NATUREL
RETENTION EAU LAC ARTIFICIEL
RETENTION COURS D'EAU

Les barrages reportent la poussée de l'eau sur le sol ou sur les parois latérales

BARRAGES

Le dénivelé des plus hauts barrages est proches de 200 m, soumettant les turbines à une eau à haute pression (± 20 atm). Un débit assez faible est alors suffisant pour produire une quantité importante d'électricité . Exemple du barrage HOOVER sur le fleuve Colorado, qui est le plus grand barrage des USA: 221 m de dénivelé et capacité de production de 1800 MW

Des barrages moins élevés (quelques mètres seulement) mais avec des débits forts engendrent des productions d'électricité du même ordre. Une installation de taille réduite avec un dénivelé de 30 m peut générer 500 kW d'électricité à partir d'un débit de $3 \text{ m}^3/\text{s}$. Les turbines ont un diamètre d'environ 1 m.

Les constructions les +imp [ex. barrage d'Itaipu, fleuve Parana, Brésil] ont une capacité de 10 GW, soit l'équivalent de 10 grandes centrales thermiques et voient passer 9 000 t d'eau/sec.

- Le barrage des Trois-Gorges sur le Yang Tsé Kiang, n°1 mondial, a eu en 2009 une capacité de 22,5 GW = 2 % des besoins d'électricité du pays. Sa structure est longue de 2,3 km!

et génère un lac de retenue de 600 km^2 . Il fournira 84,7 G kWh par an. 120GW! supplémentaires sont prévus

**BARRAGE de GLEN CANYON
(HOOVER)**

à 175 km en amont du Gd Canyon
(Colorado)

Construction 1960
Electricité en continu

Effet Négatif
car les sédiments s'accumulent
et ne sont plus nettoyés par
les crues d'hiver

En 1990
'crues artificielles'
en ouvrant des vannes...



DES RÉSERVES LIQUIDES
Le barrage du Glen Canyon, sur le Colorado (E.-U.), fournit de l'énergie hydroélectrique. Le réservoir fournit aussi de l'eau potable et sert à l'irrigation.

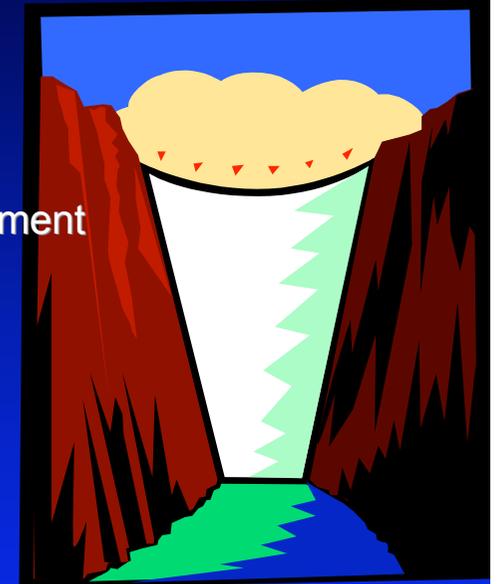
EAU

TURBINE

**E mécanique
couplée
à un alternateur**

ELECTRICITE

Il en existe plusieurs types... (80 à 1000 tours/min)
Elles ont remplacé la roue des moulins, car leur rendement
est bien meilleur [de 70 à 100% au lieu de 20 %]



Production liée au débit des cours d'eau
et/ou à la gestion des barrages

**LE POTENTIEL MONDIAL DE L'HYDRAULIQUE EST DE 40 000 TWh
mais seulement 18 000 TWh seraient exploitables et on exploite
aujourd'hui $\pm 20\%$ de ce potentiel,**

L'hydraulique est la source d'ER commerciale la plus utilisée



ELLE FOURNIT [EN 2003] 14 % DE L'ELECTRICITE DES PAYS DE L'OCDE
mais son extension semble limitée en Europe, car elle a été largement développée



ELLE CONCERNE SURTOUT LES PAYS D'ASIE, AM LATINE, CEI [ex-URSS]
où elle est sous-exploitée

Energie
mondiale
espérée
=
X2 à X10

A l'échelle de la Planète, le taux moyen de progression est voisin de 2 %/an,

On distingue:

- * LA GRANDE HYDRAULIQUE : puissance de qq MW à > 10 GW pour certains grands barrages
- * LA PETITE HYDRAULIQUE < 10MW
[2-10 MW = petites centrales, 0,5-2 MW = minicentrales, < 0,5 MW = microhydraulique]
- * et les centrales 'au fil de l'eau': n'ont pas de réservoir de stockage, aussi pour des sites isolés, il faut prévoir une E d'appoint pour les périodes sans eau

L'E hydraulique est COUTEUSE en INVESTISSEMENTS mais ECONOMIQUE en FONCTIONNEMENT

La GRANDE HYDRAULIQUE est particulièrement rentable

⇒ *nécessite d'importants prêts qui enferment les pays pauvres dans le cercle vicieux de la dette...*

EN CONCLUSION ...

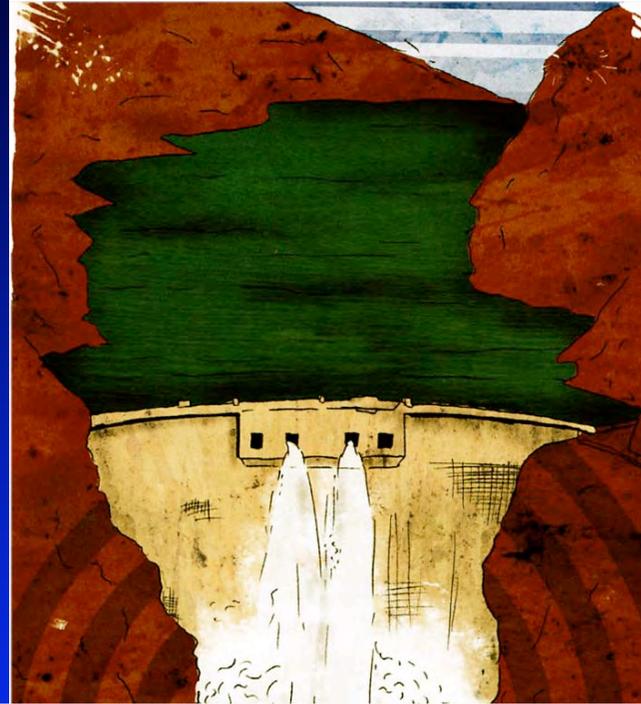
'POUR'

- le principal attrait de l'E hydraulique est SA CONCENTRATION
= forte production d'électricité à partir d'une surface au sol réduite
- stockage assez facile de l'électricité ('pompage pendant les heures creuses et turbinage' aux heures de pointe')
- pas d'utilisation d'hydrocarbures (centrales et transport), mais pour la construction...?

'CONTRE'

- impact environnemental des nouveaux barrages sur les climats et écosystèmes locaux: barrage d'Assouan p.ex. Suite aux changements de l'écoulement fluvial, le niveau de la nappe phréatique peut être modifié, causant des problèmes d'approvisionnement en eau...
- déplacement des populations [1,5 millions d'habitants ou plus? pour le barrage des Trois Gorges en Chine [1000 km de retenue!], ... 30 à 60 millions au cours du XXè s]
- la suppression de la végétation qui occupait la zone inondée = 'déforestation' et incidences potentielles sur la biodiversité; De plus la décomposition des plantes et de l'humus ==> CH₄ et CO₂...
- risque de rupture de barrages: une rupture en moyenne par an dans le monde [30 000 morts en Inde, 1979, rupture du barrage de Morvi]
- déclenche des séismes? (ex: Aquila, Abruzzes, Italie, 6 avril 2008, 308 morts)
= énergie 'douce'?

EN CONCLUSION ...



'POUR'
'CONTRE'



Le Conseil mondial de l'énergie prévoit une contribution de l'hydroélectricité limitée à 7% du total des besoins d'énergie primaire [suite à tous ces facteurs limitatifs]

[+ ENERGIE DES VAGUES, +INVERSION DES MAREES, +COURANTS MARINS ...]

= les énergies marines : 155 pays (2013)

Australie 14%, USA 12%, Argentine 9%, UK 7% Indonésie 7% Canada 4% ...



Brésil - Agriculture

Semis direct dans l'État de Santa Catarina

2012 : deuxième position des énergies renouvelables

Loin derrière l'hydraulique.... seulement 1,9 %
ou 7,5% si on ajoute le bois

'BOIS - BIOGAZ - BIOCARBURANT'

DEFINITION les feuilles sont des capteurs d'E solaire

C'est l'énergie stockée dans la matière vivante comme la végétation.

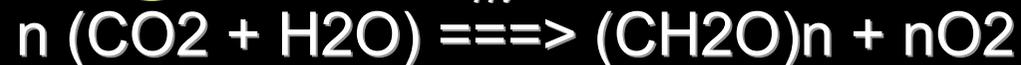
La végétation utilise indirectement l'E solaire pour produire de l'E
[ex usage du bois -feu, chauffage, éclairage-... il y a -500 000 ans]

Surtout dans les PVD à faible densité de population : pour 3 milliards d'habitants (soit la moitié de la population humaine), la biomasse 'traditionnelle' [bois-déchets végétaux-charbon de bois-bouse de vache séchée] = source principale, parfois unique d'énergie.

Rendement très faible de $\pm 10\%$ et son utilisation massive depuis longtemps a conduit à une déforestation aux 17 et 18^è siècles dans nos pays.



500 kJ/mole
 $h\nu$



faible rendement 1/3 E solaire est bioconvertie à l'échelle de la cellule

À l'échelle de la culture: rendement théorique MAX < 6 %

- sous les climats tropicaux: rendements de 2 à 3 % (canne à sucre = 2 %)
- en Europe (climat tempéré): 0,4 - 1 % pour les cultures, et < 0,2 % pour les forêts



1 100 tep/ha/an



nb rendement MO/HC = 10^{-9}
=> millions d'années nécessaires

production d'énergie

5,5 tep/ha/an
soit 15 tonnes de matières sèches/ha/an

Utilisation majeure

Alimentation [+industrie de l'ameublement, pâte à papier...] et
protection des équilibres biologiques + lutte contre l'érosion

Nb: la croissance de la biomasse absorbe du CO₂... qui sera 'restitué' à la combustion

=? Bilan équilibré <===**NON!** Car des gaz à effets de serre sont émis lors de la fabrication
des engrais ainsi que lors des manutentions (transport, traitement...) de la biomasse

Néanmoins = bilan global plus intéressant que celui de l'utilisation des combustibles fossiles



VALORISATION ENERGETIQUE DE LA BIOMASSE

Pour les produits HUMIDES $\xrightarrow{\text{par transformations biochimiques}}$ LENTES

Pour les produits SECS $\xrightarrow{\text{par transformations thermochimiques}}$ RAPIDES

Biomasse

====> 1. BOIS

====> 2. BIOCARBURANTS

Le pouvoir énergétique de la biomasse sèche est d'environ 1/3 celui du pétrole

La moitié du BOIS utilisée dans le monde l'est à des fins énergétiques

1. le BOIS

Ex:

- la surface forêt française est de 14,6 millions d'ha [1/4 France]
= 14 % forêt de l'Europe des quinze = 0,3 % forêt mondiale
- le bois a une faible teneur en eau (pr aux autres matières végétales)
= 40 à 60 % pour le bois frais, 20 à 25 % bois séché à l'air
- pouvoir calorifique 14 à 20 MJ/kg (sec) et 10 à 13 MJ/kg (séché à l'air, 25 % humidité)

EN TENANT COMPTE DU RENDEMENT DES CHAUDIERES

1 TONNE DE BOIS SECHE A L'AIR = 0,25 TEP

[en fait le bois ne brûle pas, lorsqu'il est chauffé, il absorbe d'abord de la chaleur pour éliminer son humidité avant d'émettre vers 200°C des gaz = PYROLYSE.

En présence d'air ces gaz s'enflamment et libèrent de la chaleur, $T^{\circ} = 800^{\circ}\text{C}$, et le bois se transforme en charbon de bois, combustible de pouvoir calorifique 33 MJ/kg]

Dans l'UE, la France qui est en forte position pour la consommation de bois

(4% de ses besoins en E 2009) derrière la Lettonie, la Finlande, la Suède (15%)

2. les BIOCARBURANTS

- à partir des végétaux
- ils sont 3X plus chers que ceux tirés du pétrole, ils peuvent être mélangés aux carburants usuels à raison de 5 à 10 %, parfois plus
- = éthanol ou éther dérivé 'ETBE' [=éthyl-tertio-butyl-éther] pour l'essence
l'éthanol est utilisé 'pur' au Brésil depuis 1970'...
(= fermentation des sucres dans les cannes à sucre)
sinon E85 soit 85%éthanol+15%essence (pour démarrage à froid)
= biodiesel ou ester méthylique d'huile de colza pour remplacer le diesel



RENDEMENT des biocarburants = f de la variété agricole utilisée

Ex: 1 ha de blé produit 2500 l d'éthanol ≠ 1 ha de betterave = 6500 l

1 ha de colza = 1300 l d'ester

Rendement: 1,5 pour le bioéthanol et 2 pour l'ester de colza

2. les BIOCARBURANTS

pour une tonne de biocarburant,
remplaçant une tonne de pétrole,
il faut disposer d'environ un ha de
terre agricole (soit 100mX100m)



= > ENERGIE CONSOMMATRICE D'ESPACE ET D'EAU

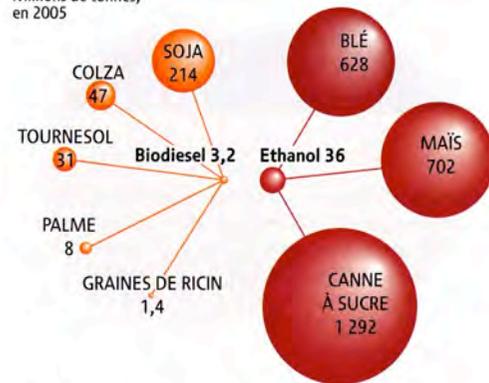
En France 2005, transport = 50 millions t/pétrole/an, pour remplacer tout le pétrole importé,
par la production in situ de biocarburants (colza, betteraves) = 50 millions d'ha = surface France [55 millions ha]



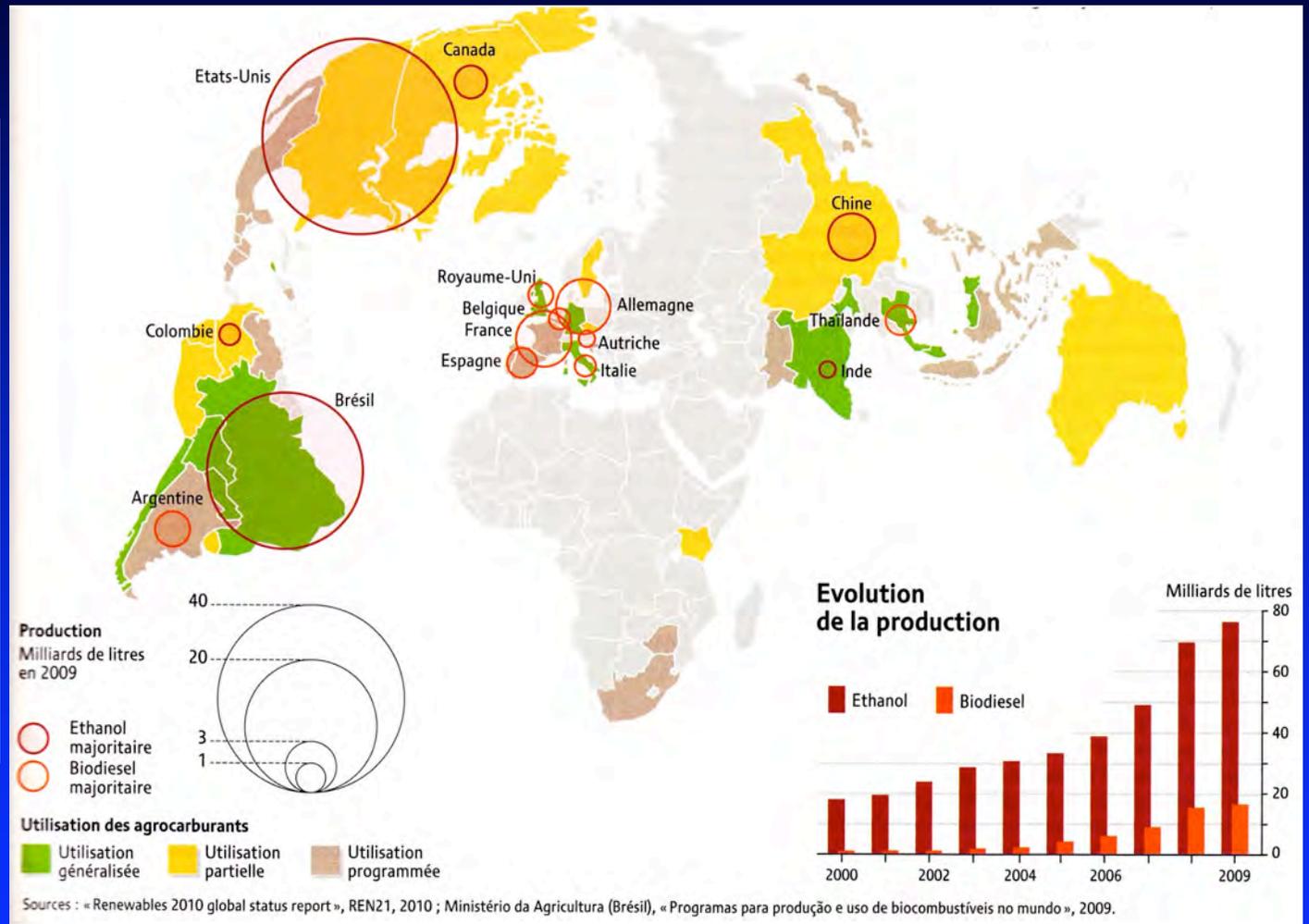
Du carburant avec des aliments...

Sources de production

Millions de tonnes, en 2005



Source : Brazil Institute - Woodrow Wilson International Center for Scholars, « The global dynamics of biofuels », 2007.



2012: USA premier consommateur d'agroc carburants : 61800 kg éq.pétrole
 N°2 = Brésil (31300 kep) et N°3 = Union Européenne (18300 kep)

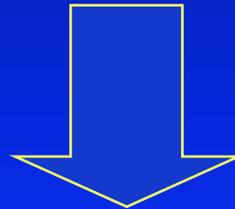
Éthanol et biodiesel : quelles perspectives ?

Rang	Pays	Éthanol		Biodiesel	
		Production en 2013 (millions de litres)	Progression d'ici 2020	Production en 2013 (millions de litres)	Progression d'ici 2020
1 ^{er}	États-Unis 	55 770	 29 %	6 058	 -3 %
2 ^e	Brésil 	28 685	 61 %	2 587	 22 %
3 ^e	UE-27 	7 049	 56 %	11 288	 62 %
4 ^e	Chine 	9 006	 14 %	-	-
5 ^e	Argentine 	497	 83 %	2 697	 14 %
6 ^e	Inde 	2 516	 18 %	349	 95 %
7 ^e	Canada 	1 605	 -8 %	488	 -25 %
8 ^e	Thaïlande 	990	 37 %	952	 41 %
-	Monde	113 854	 37 %	28 508	 34 %

2. les **BIOCARBURANTS**

Cela pose le problème des surfaces disponibles...

Dans l'immédiat en extrapolant la croissance actuelle avec une rentabilité raisonnable, la production pourrait atteindre 6 000 milliards de l/an en 2050 (soit $\pm 2X$ la consommation actuelle)



En 2030-2050, si tous les véhicules sont économes, les biocarburants devraient suffire... pour cela il faut défiscaliser les biocarburants, et subventionner les cultures énergétiques en supprimant les subventions improductives attribuées à l'agriculture dans certains pays (USA et Europe)

Une partie de la rente énergétique serait ainsi transférée des pétroliers aux agriculteurs (cas du Brésil depuis > 30 ans)

2. les BIOCARBURANTS

... finalement les priorités devraient être:

- le reboisement dans les pays où la déforestation s'installe
- le développement de cultures énergétiques dans tous les pays où il n'y a pas pénurie de terres agricoles (Etats-Unis, Europe, Brésil...)
- gestion des déchets agricoles (et urbains) afin de réduire les émissions de méthane et de produire du biogaz

LES BIOCARBURANTS ONT UN EFFET POSITIF SUR LA POLLUTION

Moins d'oxydes de soufre, moins de CO₂, moins de particules
Mais plus d'oxydes d'azote

Peut-on utiliser la biomasse pour lutter contre l'effet de serre?
OUI! Mais il faut d'abord planter avant d'exploiter, car exploiter sans replanter ne fait que diminuer le stock de biomasse terrestre, ce qui est analogue à ce que l'on fait lorsque l'on utilise des combustibles fossiles.

LES BIOCARBURANTS ONT UN EFFET POSITIF SUR LA POLLUTION?

C'est comme si
le CO₂ ne
'jouait' pas



C'est comme si
le CO₂ ne
'jouait' pas

= RAISONNEMENT FAUX!

car il ne tient pas compte des cultures servant à la production des biocarburants
⇒ pour produire 100 l d'éthanol, il faut 100 l de combustibles fossiles
(engrais, transport, irrigation etc)

+ AUTRE DILEMME: BIOCARBURANTS CONTRE NOURRITURE

2008...

UTILISER DES RESIDUS DE BOIS COMME MATIERES PREMIERES...

Les biocarburants actuels ne font plus l'unanimité (ex: Allemagne...)

- bilan écologique négatif (défrichage, brûlis = émission CO_2)
- bilan écologique négatif (monoculture intensive => engrais... = émission N_2O et effet de serre fortement accru = CO_2)
Effet de serre ? > combustibles fossiles...
- bilan économique catastrophique? Augmentation des produits alimentaires de 20 à 50 % (= pouvoir d'achat cf. Situation mondiale en avril 2008!)

Il faut utiliser des plantes NON ALIMENTAIRES fournissant un maximum de biomasse à l'ha, demandant le moins d'eau, pas ou peu d'engrais et pesticides

....

Il faut transformer efficacement l'intégralité des tissus végétaux (constitués surtout de cellulose et d'hémicellulose)

...

Microalgues productrices d'huile, culture en bassins

Nouvelles générations...

2008...2009

UTILISER LES microALGUES ... comme biocarburants de 3ème? génération

- elles contiennent beaucoup d'énergie (acides gras)
- elles peuvent être cultivées en mer (ou dans des bassins dans des 'hangars') avec des rendements/ha de 30X à 100x supérieurs aux biocarburants terrestres soit 40 000 l/ha
- elles sont biodégradables
- d'après le Ministère américain de l'Energie (2008): une superficie d'environ 40 000 km² (= ±Pays-Bas) suffit pour remplacer le pétrole brut consommé aux USA/an

Nouvelles générations...

Enfin on pourrait 'recycler' les plates-formes de forage par des cultures d'algues?
(elles ne demandent que de l'eau, de la lumière et du CO₂)
Actuellement études IFREMER (Nantes)

Biocarburant : le potentiel des micro-algues se développe aux Etats-Unis

Info rédaction, publiée le 05 mai 2012

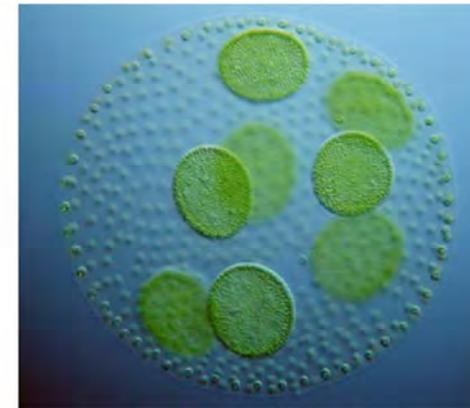


Le biocarburant conçu à partir de micro-algues devrait se développer dans les années à venir. Grâce à la mise au point de nouvelles technologies, alliées à des investissements importants, cette alternative au pétrole ne tardera pas à révéler tout son potentiel, affirment des experts américains.

Le pétrole sera-t-il bientôt remplacé par les micro-algues ? Ces dernières constituent une intéressante source de biocarburant, et selon certains experts, elle est en passe de se développer aux Etats-Unis. Le ministère de l'Energie américain vient en effet de publier une étude qui confirme le vaste potentiel des micro-algues.

Dans quelques années, indique ce rapport, elles pourraient ainsi remplacer 17% des importations pétrolières des Etats-Unis. Mais pour parvenir à cette ambition, le gouvernement investit massivement. Quelque 85 millions de dollars seront consacrés à une trentaine de projets visant à produire ce type de biocarburant. L'avenir des micro-organismes marins comme alternative au pétrole réside selon les experts dans le faible coût de fabrication du carburant.

REEMPLIRONS-NOUS UN JOUR NOS RESERVOIRS DE CARBURANT PRODUIT PAR DES ALGUES ?



Biolgr2
ULB2012

Pas de micro-algue dans nos voitures avant les années 2020

Dans un premier temps, ces biocarburants seront destinés au transport aérien et à l'armée américaine. La Marine s'est fixée pour objectif de remplacer d'ici à la fin de la décennie 50% de sa consommation de pétrole par des biocarburants ne nécessitant pas le sacrifice de terres utilisées pour des cultures destinées à l'alimentation humaine. Une ambition qu'elle entend atteindre grâce aux micro-algues.

Quant aux automobilistes, ils devront attendre les années 2020 avant de se voir proposer ce type de produit à la pompe, estime Riggs Eckelberry.



2010
Projet NEMO - Europe

UTILISER LES enzymes et microOrganismes ... comme biocarburants de 2^{ème}? génération

<http://www.vtt.fi/news/2009/08192009.jsp>

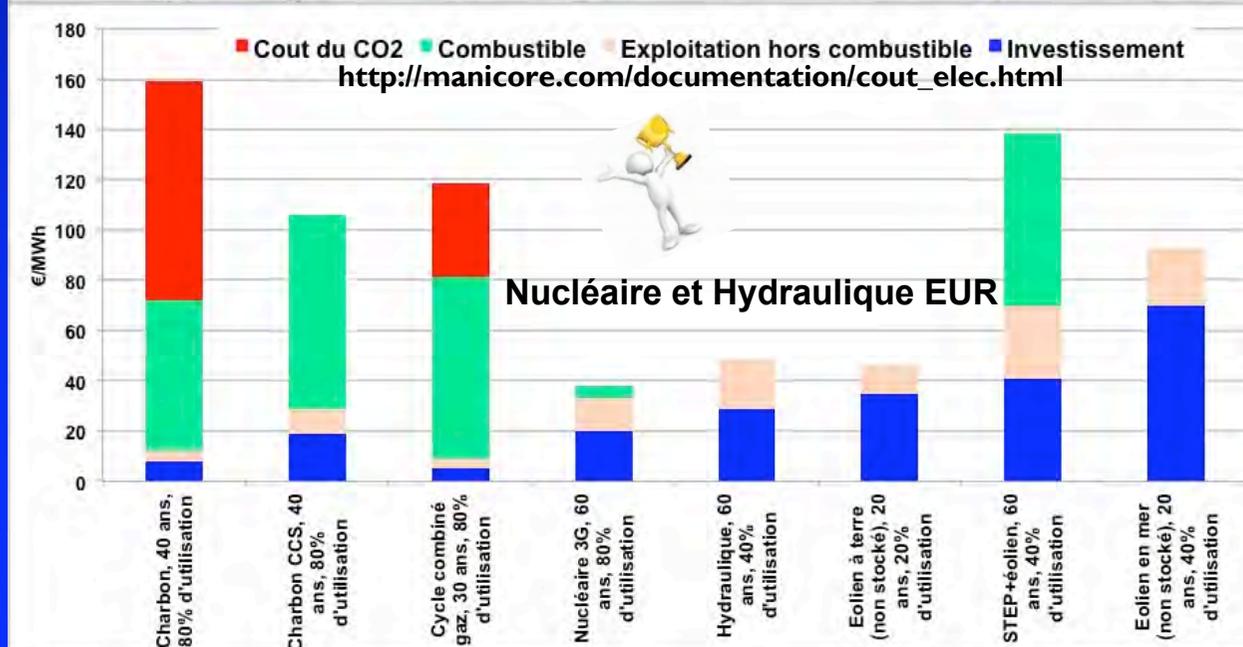
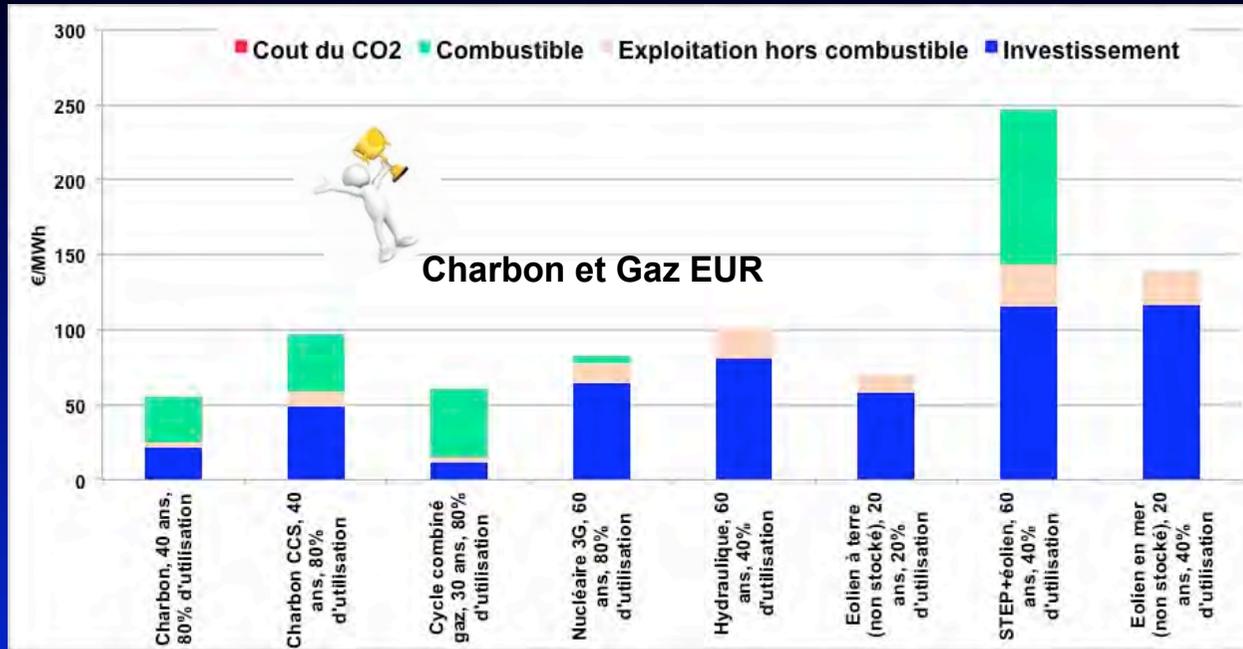


Novel high-performance Enzymes and Micro-Organisms for conversion of lignocellulosic biomass to bioethanol => biocarburants à partir de déchets de l'agriculture et de l'industrie forestière (à partir de la lignocellulose des plantes -tiges, feuilles...., il faut extraire la lignine, la cellulose, l'hémicellulose et en tirer du glucose pour fermentation...)

- transformation en 4 étapes: prétraitement, extraction, fermentation et distillation

- 18 partenaires: 9 pays (BE-CH-DE-FI-FR-IT-NL-SI-SE) + entreprises privées (Green Sugar...)
- objectif UE: 10% des carburants du transport doivent être d'origine renouvelable en 2020
- 8,25 M€ sur 4 ans

HYDR-NU-CHARBON-GAZ-PETROLE-GEOTH-EOLIEN-SOLAIRE



2013

consommation **Contexte général** hors 'bois'

2013 : 8,7%

+16,3%pr 2012

2,0%

nb E nu 4,4%
6,7% [2013]

Énergie hydraulique

Biomasse



Énergie solaire

Énergie éolienne

Géothermie