



**GEOL-F-103 : Problèmes actuels de gestion de l'Energie**  
2 ECTS (option BAC1-2-3, 24-0-0-0)

P.H. HEENEN (physicien ULB) et A. PREAT (géologue ULB)

<http://uv.ulb.ac.be>

L1 Introduction et effet de serre  
L2 Notions de géologie et bassins sédimentaires  
L3 Plaque arabique et évolution kérogène  
L4 Formation hydrocarbures et notion de gisement  
L5 Combustibles fossiles: réserves-prod.-géopolitique  
L6 Energie nucléaire: fusion et fission  
L7 Réacteurs nucléaires: fonctionnement et filières  
L8 Le cycle du combustible nucléaire  
L9 Energie nucléaire: sécurité et futur  
L10 Géothermie-Hydraulique-Biomasse  
L11 Energies solaires  
L12 Synthèse et débat

+ résumé L1-L5  
+ glossaire géologie hydrocarbures et effet de serre  
+ glossaire énergie nucléaire  
+ liste bibliographique

P.H. HEENEN A. PREAT



**QCM**

- 10 questions à 3 choix : 10 points
- 2 questions à 5 points chacune: 10 points  
[2 heures]

LECON 1 - 2016

L'ENERGIE  
GLOBALE



INTRODUCTION GENERALE

PREATA, GEOL-F103 10/2011

**LES ENSEMBLES PRIMAIRES**

- **ENERGIES FOSSILES** = énergies **concentrées** mais non renouvelables [E solaire stockée au cours des temps géologiques]
  - ◊ **Charbon** ◊ **Pétrole** ◊ **Gaz naturel**
- **ENERGIES NUCLEAIRES** = énergies **très concentrées**
  - un gramme  $U^{235}$  = autant d'E qu'une tonne de pétrole!,  $1cm^3 = 19g U^{235} = 47,5 T$  charbon!
  - ◊ **Fission** [Centrales nucléaires actuelles] ◊ **Fusion** [...]
- **ENERGIES RENOUVELABLES** = énergies **diluées** ou diffusées mais renouvelables
  - ◊ **Hydraulique** ◊ **Solaire** ◊ **Eolienne**
  - ◊ ◊ ◊ **Biomasse** ◊ ◊ ◊ **Géothermie**

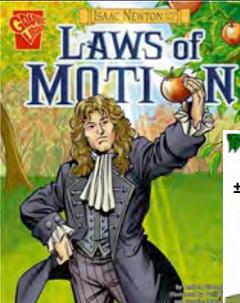
en 1h le Soleil déverse 'notre' Énergie de 365 jours ou il déverse 15000X notre consommation mondiale à chaque instant

PREAT A. GEOL-F-103 Incept

**L'unité de base de l'énergie dans le système international est le **Joule** qui est aussi l'unité de travail et de chaleur**

=

Travail d'une force de 1N dont le point d'application se déplace de 1m dans la direction de la force



**1 (G) tep = 42 GJ**

1 kJ = Énergie dégagée sous forme de chaleur par une personne au repos toutes les 10 secondes

PREAT A. GEOL-F-103 Incept

• **1tep = 342GJ = 100.10<sup>6</sup>cal ou ±11700kWh**

1 calorie = 4,18 J (1cal = quantité de chaleur pour élever de 14,5° à 15,5° la 1<sup>re</sup> de 1g d'eau)  
Le saut d'une puce = 10<sup>-7</sup> J (soit environ 4 dix-millionième de cal),  
L'homme a besoin de 10<sup>7</sup> J d'énergie [32500Kcal] af de nourriture, de chaleur ...  
Une tep représente donc 11,12 ans de ses besoins vitaux!  
[100t = 41,24 tep, 1t = 3,6t]

• Un cyclone dans les Caraïbes = 3,8 x 10<sup>14</sup> J soit 100. 10<sup>6</sup> tep

**1t <sup>235</sup>U ==> 10 000 tep**

**1000m<sup>3</sup> gaz p<sub>atm</sub> ==> 0,9 tep**

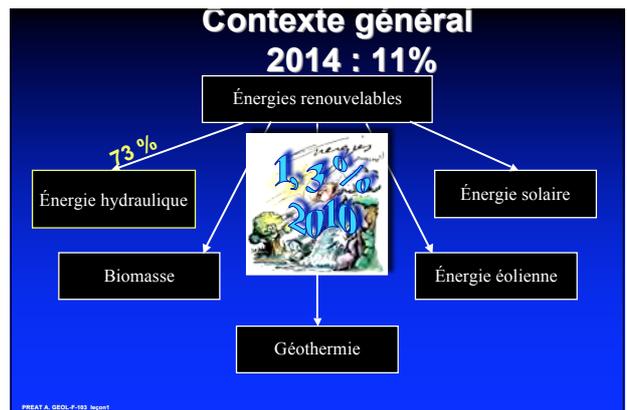
**1t charbon ==> 0,7 tep**

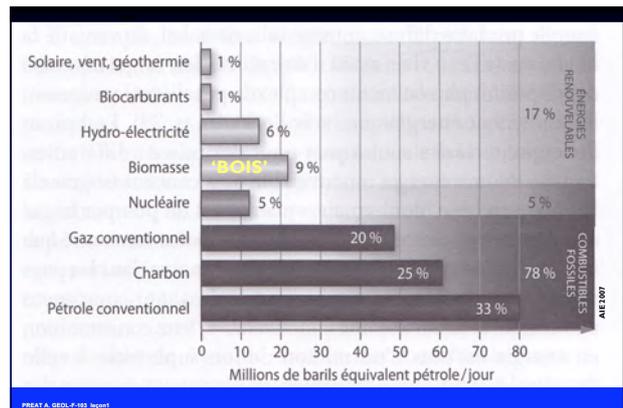
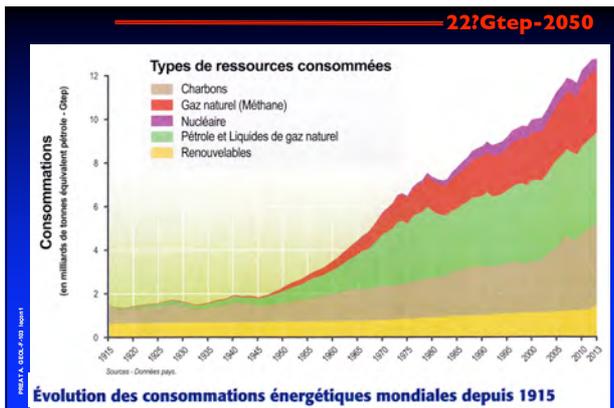
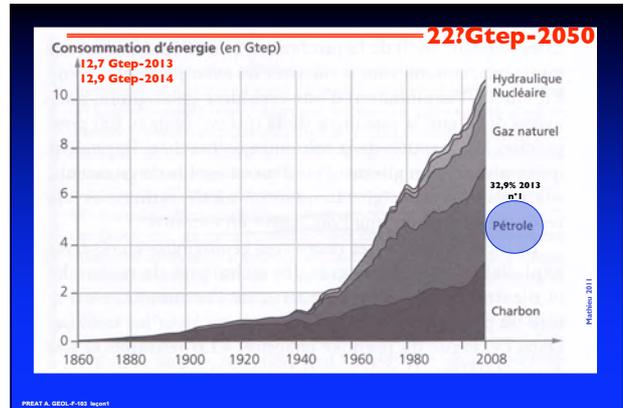
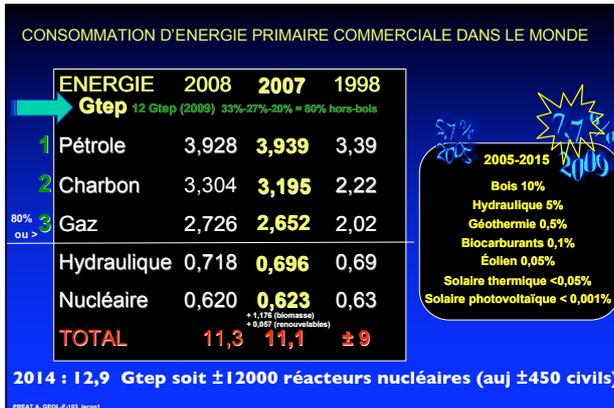
**1 Réacteur Nucléaire de 1GW<sub>e</sub>**

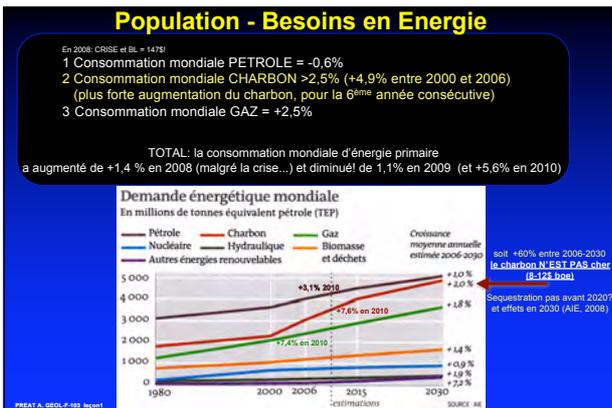
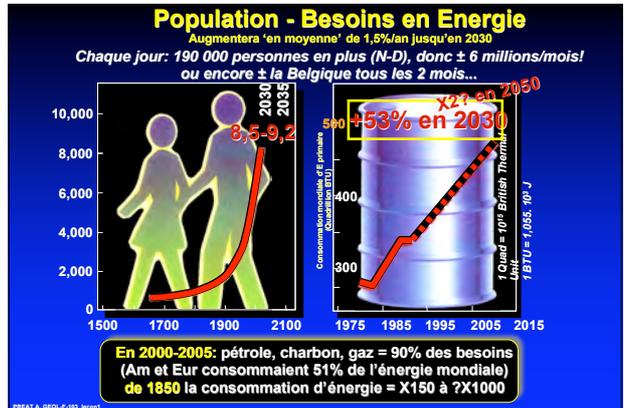
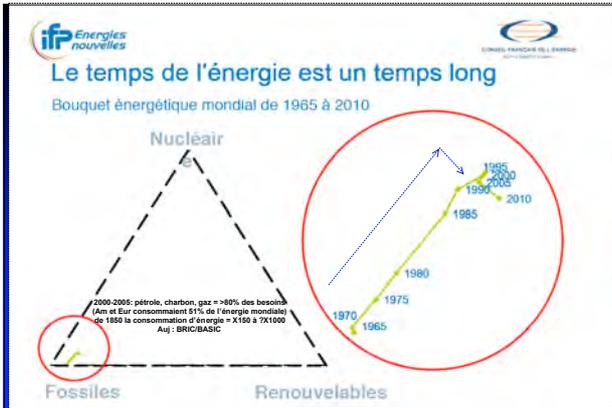
= 100km<sup>2</sup> solaire pv, soit 5000km<sup>2</sup> pour toute l'électricité en France = 2 500 éoliennes (de 2MW) et 500km<sup>2</sup> = 50 000km<sup>2</sup> à partir géothermie = 30 000km<sup>2</sup> à partir biodiesel (tournesol ou colza)

ou 43µg <sup>235</sup>U(0,0000043g) = 70g essence = 3,6t eau sur 100m = 1kWh

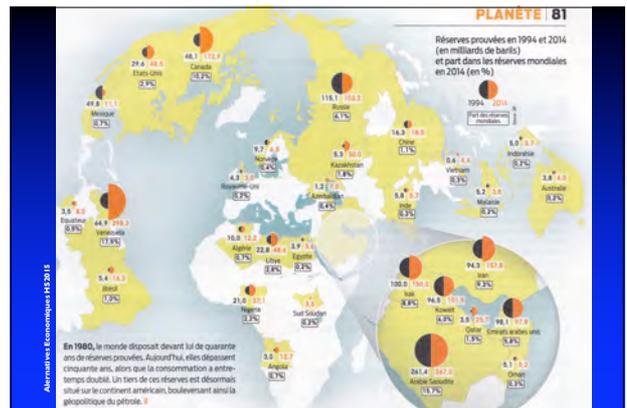
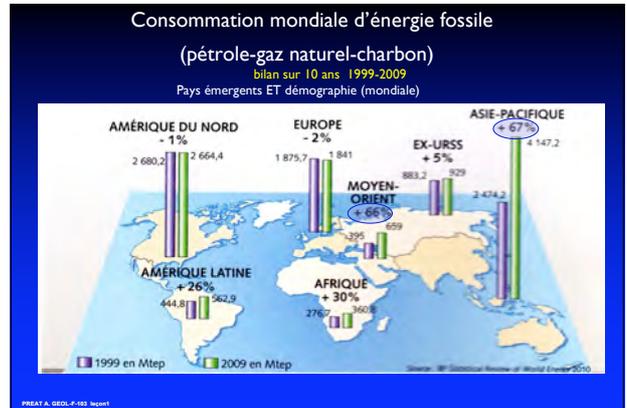
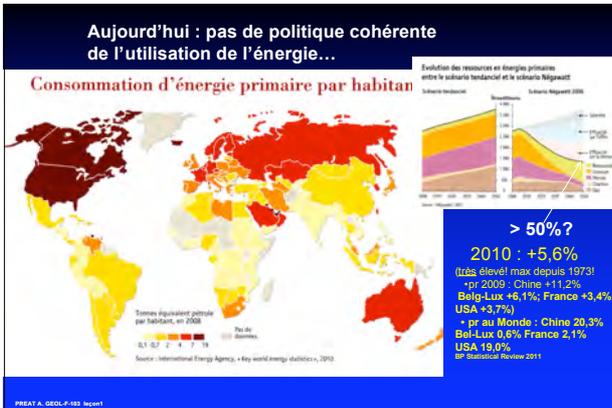
PREAT A. GEOL-F-103 Incept

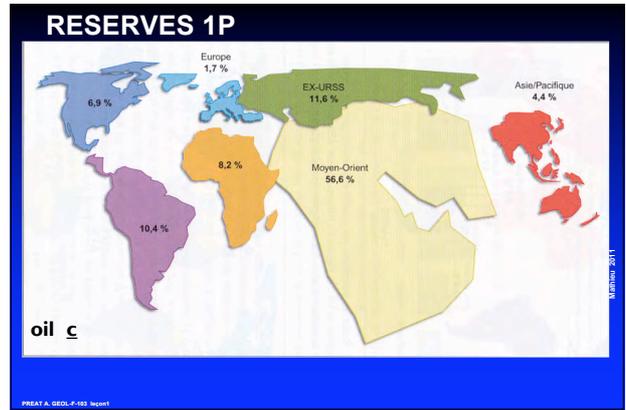
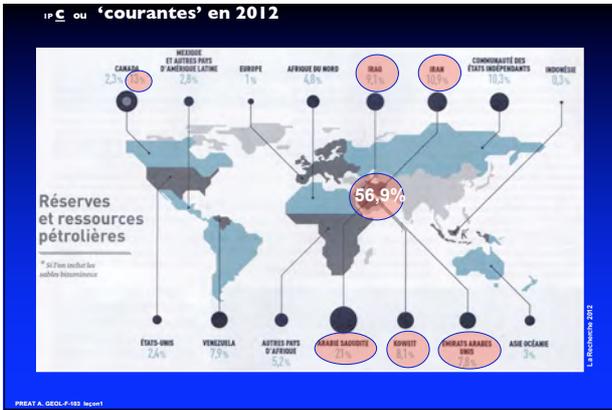












depuis

**2013 - ±92,1 M bbl/j**  
(c + GL et Tar sands)

= travail 300 G esclaves pdt 24h

**1 bbl = 159l**

**1 t = ± 7,5 bbl [5,8-8,2]**

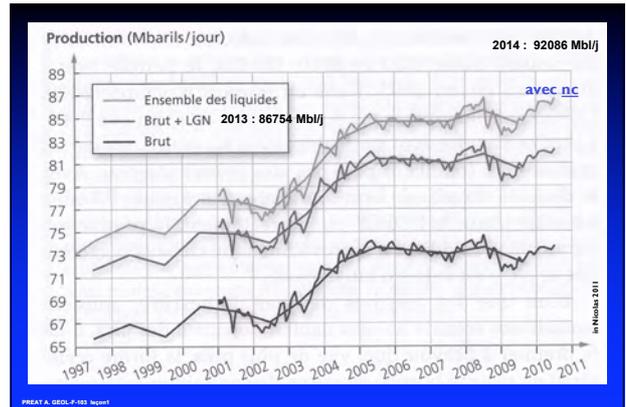
2007 : 85,8 soit 1M(bbl) en PLUS dont 0,7Asie (avec 0,3Chine)  
2008: 87,8 M(bbl) ..... jusqu' juillet 2008 (finalemt 82,7)

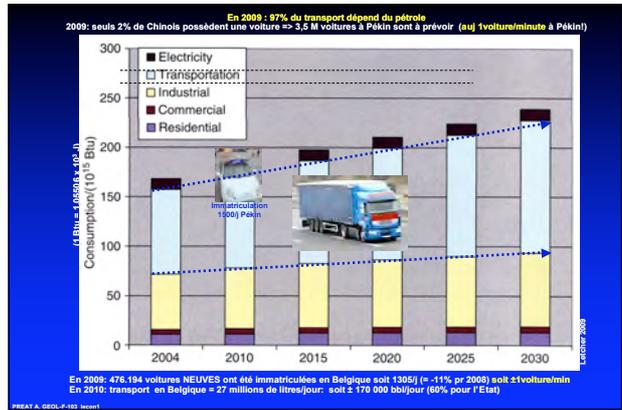
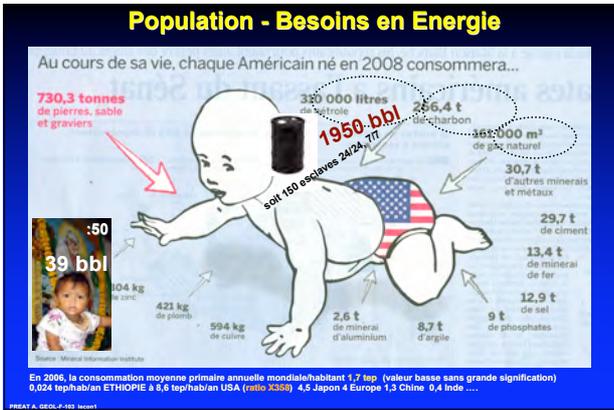
**>1000 bbl/sec**

**15 secondes**

**soit 5500/l au 550l/cout**

PREATA\_A\_GEOL-F-103 Incept





### LES SOURCES D'ENERGIE

VECTEURS D'ENERGIE

- ENERGIES 'SECONDAIRES' OU DERIVEES, PRODUITES A PARTIR DES SOURCES PRIMAIRES
- L'électricité
- L'hydrogène

Elles permettent un transport et une utilisation plus facile que celles des sources primaires

PREAT A. GEOL-F-103 Incept

## LES SOURCES D'ENERGIES




**Energie nucléaire TRES concentrée**

- par fission 1g U<sup>235</sup> ==> 22 000 kWh
- par fusion 1g H (Soleil) ==> 180 000 kWh




**Energies 'moins' concentrées: pour ==> 1kWh**

- combustion ± 0,1kg pétrole, charbon, gaz
- condensation 1,6 kg vapeur d'eau
- captage E solaire sur une surface 1m<sup>2</sup>




**Energies 'pas' concentrées: pour ==> 1kWh**

- chute dans usine hydraulique de 3t d'eau d'une h de 100m
- éolienne: 20 000 m<sup>3</sup> d'air à 60 km/h

PRÉAT A. GEOL-F-103 leçon1

## AVANT DE COMMENCER

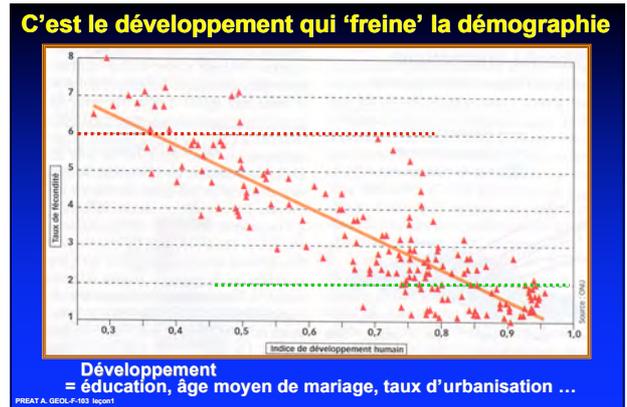
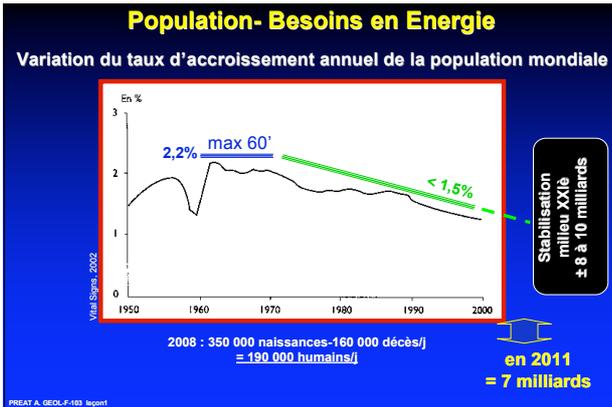


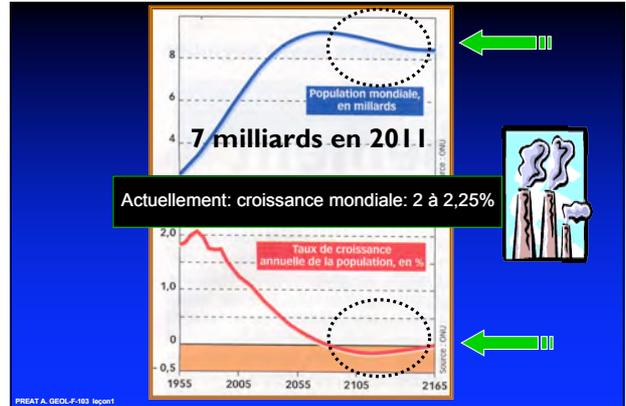
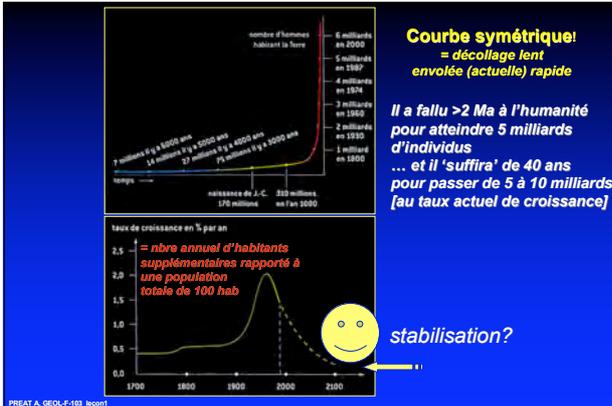

**DEFINITION GEOPOLITIQUE = FLOU**

- 'Robert 1965': géopolitique est l'étude des rapports entre les données naturelles de la géographie et la politique des Etats
- 'Grand Larousse 1962': c'est l'étude des rapports qui unissent les Etats, leurs politiques et les lois de la nature, ces dernières déterminant les autres

**Révolution industrielle (18<sup>è</sup>s)-20<sup>è</sup> et 21<sup>è</sup>s = ENERGIE**  
 càd science + technologie + industrie  
 21<sup>è</sup>s = INFORMATION?  
 càd informatique + cybernétique

PRÉAT A. GEOL-F-103 leçon1





**Population- Besoins en Energie**

**Pourquoi toujours le pétrole?**

1 bbl = équivalent E de 25.000h travail humain, ou 10.000h en tenant compte des meilleurs engins convertisseurs de carburant en travail mécanique

Pétrole+Gaz Naturel+Charbon = auj 80% ou > de la consommation d'E primaire du monde = travail QUOTIDIEN de > 300 milliards d'êtres humains, 'comme si chaque personne sur Terre avait à sa disposition 50 esclaves... (certains plus, d'autres moins...)

**... Le pétrole 'reste bon marché', il est très énergétique sous un faible volume, et aussi très économique lorsque associé à une machine...**

PREAT A. GEOL-F-103 Incept

**Aucune source d'ER ne peut A ELLE SEULE remplacer le pétrole à court (et moyen?) terme**  
 les partisans du nucléaire espèrent profiter de la lenteur du développement des ER et des difficultés croissantes des EF pour 'se relancer' [aussi sans effet de serre, mais avec déchets...]

**en attendant = casse- tête énergétique**

**Une alternative TRES SERIEUSE = SOBRIETE = Réduire la consommation d'E**  
 ==> association NEGAWATT [www.negawatt.org](http://www.negawatt.org)  
 On pourrait diminuer jusqu'à 70% la consommation d'E par rapport aux tendances actuelles, dans nos pays!

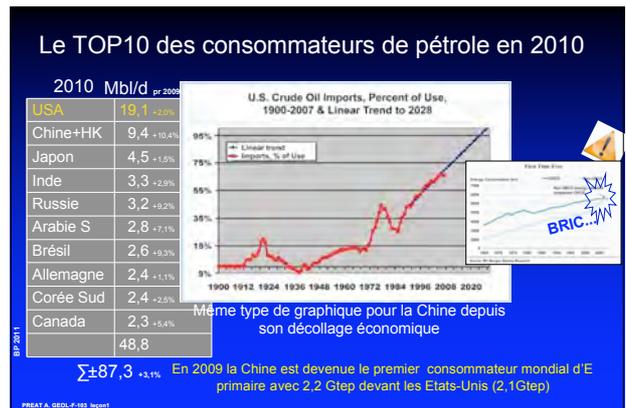
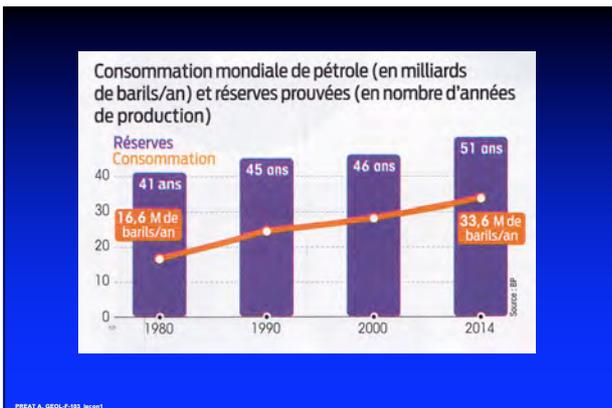
2006

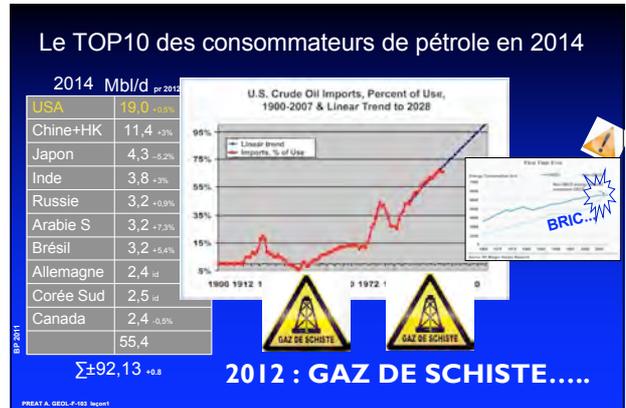
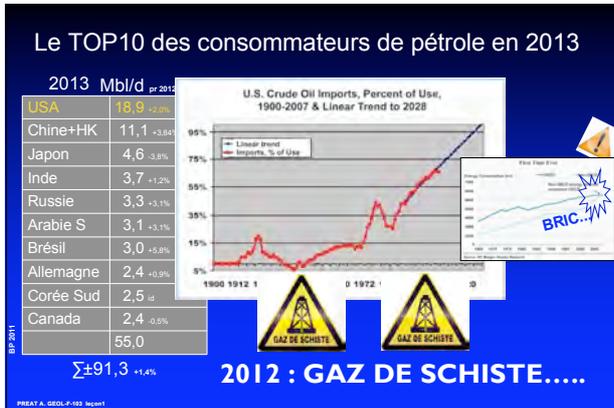
**en attendant = casse- tête énergétique**  
 3à4 %  
 une alternative TRES SERIEUSE



**= SOBRIETE (20) à 25 %**  
 ou 1/4 production mondiale  
 En 2008, 2009 les USA importent 60% de leur pétrole....

2006





### En attendant = casse-tête énergétique

#### Population = Besoins en Energie

- Auj: nous consommons 3 à 4 bbl [1] pétrole pour 1 [5, 1960] découverts
- En dollars 2004 et de 1869 à 2004 prix mondial pétrole = 19,41\$ ... càd 'bon marché' ... (médiane = 15,17\$)
- en 2004: 3,5 milliards d'asiatiques ont consommé 20 millions bbl/j et les américains [293, 10<sup>e</sup> hab] 22 millions.

**En 2004: 1Américain 25bbl/an, 1Japonais 18, 1Européen 12, 1Terrien moyen 5, 1Chinois 1,5 et 1Indien 1bbl/j**

1 bbl = 1600 kWh

il faut 2000 réacteurs nucléaires 'actuels' pour remplacer 1/4 production actuelle de pétrole

449 réacteurs dans le monde en 2008 (168 USA, 89 en France, 65 au Japon, 51 en Russie, 28 en Corée du Sud) Belgique: 11 années et 7 en fonctionnement

En 2006: 20 centr en constr [2Eur, 4Chine, 6Japon, 8Inde]

En Chine 2007: 15+5 ==> X2 en 2020

En 2009 (Mondo): 200 centrales programmées ou proposées pour 2020

**2 nov 2007**

**7 novembre 2007 : 98 \$ (NY, Singapour)**

- déplétion (diminution production)
- demande asiatique
- tension géopolitique (Turquie/Irak)
- spéculation

...  
**PAS DE CATASTROPHE CLIMATIQUE, NI DE GUERRE(S) ...**

« grain de sable ».... >100\$  
 [seuil symbolique]  
 ... 200 \$, .... 300 \$

**Que faire? ° sobriété ° transport....**  
**En l'absence d'une vraie politique:**  
**Riches >< Pauvres**  
 Ex: en 2001, question à V. Poutine  
 « avec abolition des subventions sociales que deviendront  
 tous les misérables (sic) empêchant 30€/mois? »  
 Rép: « Ils mourront, monsieur, ils mourront... »

**à 100\$**  
**le baril, qu'est-ce qu'on fait?**

PREAT A. GEOL-F-103 Incont



**Le baril à 100 \$, l'or explose**

**3 janvier 2008**

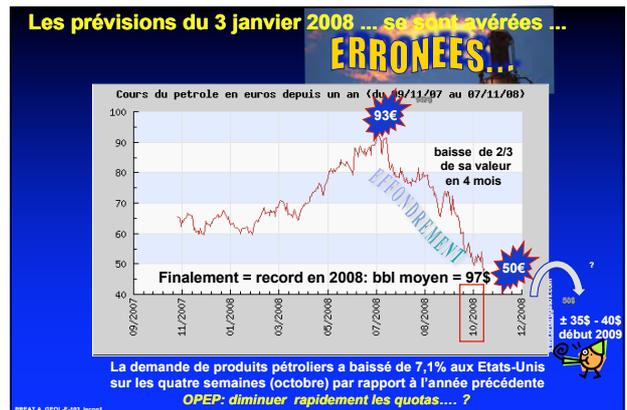
- nouvelles violences Nigéria (premier producteur africain)
- Pakistan (assassinat Bhutto)
- Hiver froid USA (chute des stocks)
- Pas d'augmentation production OPEP (sinon diminution rentrées financières)

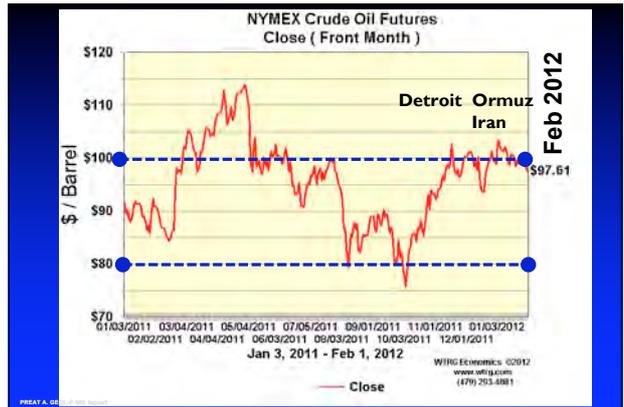
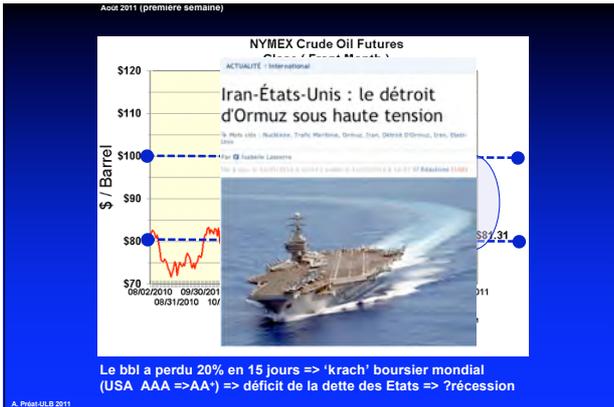
4 formations connues du dollar US et du pétrole WTI

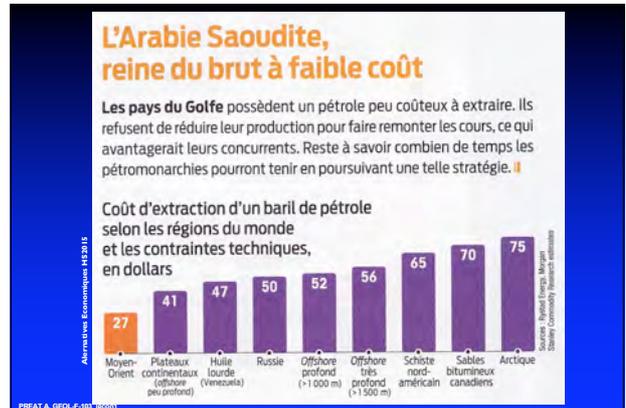
**3 janv 2008**

PREAT A. GEOL-F-103 Incont La Libre Belgique

Les Echos 3.01.08







# 90 / 10

(07 Janv) 2010: 83\$ soit +80% en un an...

froid (-1°C = 5% E)  
 'reprise économique'  
 Tepil € vs \$

**VOLATILITE DES PRIX : court terme**  
 1997 /1998 1bbl = 45  
 Fin 2007 1bbl = 105\$  
 Consommation :117, Production :117

**= spéculation** (transactions financières = 16x transactions physiques)  
 = crise pétrolière (surp prod et baisse demande) => hausse demande et manques approvisionnement (Irak, difficultés Iouko, instabilité Venezuela et Nigeria)

PREATA, GEOL-F-103, Incept

## Le Brut - "L'Or Noir"

### Le Pétrole fournit nos Besoins en Energie

Le 'pétrole' entre en composition essentielle dans près de 300 000 produits (pétrochimie = 8%)  
 Le brut est exploité à partir d'environ 70 000 gisements d'hydrocarbures

**Light Texas Crude**  
Palo Pinto Field  
North Texas



**Heavy Texas Crude**  
Humble Oil Field  
Southwest Texas





1 bbl = 159 l

'léger'

'moyen'

'lourd'

'extra-lourd'

American Petroleum Institute, 1999

PREATA, GEOL-F-103, Incept

## Organigramme simplifié du raffinage du pétrole brut pour la production de carburants



Pétrole brut

Sels (eq g à 100 kg/tonne)  
Sulfure...

→ épuration → distillation →

→

→

**Gaz** 4% <math>+180^{\circ}</math>

**Essences Solvant léger** 46% <math>+250^{\circ}</math>

**Kérosène** 10% <math>+360^{\circ}</math>

**Gazole** 27%

**Résidus** >50% <math>+500^{\circ}</math> craquage

nb pétrochimie: 900 à 2000°C

Les Etats producteurs exportateurs ne raffinent que très peu  
 1. USA 20,1% mondial soit 3850 millions de tonnes (2004)  
 2. Chine 6,9%, 3 Russie 6,4%, ... 9. Arabie Saoudite 2,4%

Les capacités de raffinage sont utilisées auj (2007) à leur maximum (92%) et ne suivent donc pas le rythme de la progression pétrolière 2003-2004: 0,6% >> 4,4%  
 ==> ouragan Katrina en 2005 ...

nb investissement raffinerie stoppée depuis 1976 aux USA!  
 [une raffinerie moderne de gde capacité = 2,5 milliards de \$]

PREATA, GEOL-F-103, Incept

## Produits Pétroliers

### Un baril d'huile brute produit:

**1 Baril (bbl)**  
= 159 l

= 158,984 l ou 0,14 t

1 t = 6,7 à 7,7 [moy 7,3 bbl]



American Petroleum Institute, 1999

Gasoline - 73,8 l

Fuel Oil - 34,8 l

Jet Fuel - 15,5 l

Asphalte - 8,7 l

Kérosène - 0,8 l

Lubrifiants - 1,9 l

Pétrochimie, autres produits - 23,5 l

1 litre de brut pèse entre 890 et 950 g (moy)

PREATA, GEOL-F-103, Incept

## Incertitudes Géopolitiques



**RAFFINAGE**  
Usa96%, Monde92% [2006]

**TRANSPORT MARITIME**  
• 7200 supertankers sous pavillons de complaisance (5 états possèdent en tonnage 50% de la flotte pétrolière mondiale)  
• fort vieillissement de la flotte pétrolière  
• ?pénurie des tankers vs demande pétrolière croissante



- En 2007-2008, l'écart entre la capacité de production et la demande est d'environ 2 %
- > 'grain de sable' = cyclone, =troubles (au Nigéria...) etc.
- 85% de la production mondiale = **Compagnies NATIONALES**
- > Refus d'investir ... car pas d'incitation (l'argent rentre de toute façon)
- > 80 % plates-formes 'rouillées' (pas d'entretien quand le bbl était bas...)
- 500 rigs à refaire = investissement de 250 GS ....(+ prix du Fe)
- goulets d'étranglements transport maritime ('accident', crises...) = détroit Ormuz etc.

PREAT A. GEOL-F-103 report

## Incertitudes Géopolitiques

**RAFFINAGE**  
Usa96%, Monde92% [2006]

**TRANSPORT MARITIME**  
• 7200 supertankers sous pavillons de



15 nov 2008: piraterie en Somalie-Yémen sur supertanker saoudien Sirius Star [Aramco, immatriculation Liberia]

- 2 millions bbl soit 250 millions US\$ (y compris prix tanker de 150M) = 1 journée consommation France
- un supertanker = 3X surface terrain football (=330 m L et 3x le poids porte-avion)
- du 1/1 au 15/11/2008: 219 bateaux détournés
- allongement des routes maritimes et augmentation prix bbl

90% du pétrole importé par l'Europe passe par le détroit d'Ormuz  
Suez-EGYPTE liv/2012

PREAT A. GEOL-F-103 report

## ...courte synthèse...

**Il y a 200 ans:** uniquement énergies renouvelables (bois, traction animale, chutes d'eau, vent)

**Au XIX<sup>e</sup> s:** charbon (invention machine à vapeur)

**Au XX<sup>e</sup> s:** pétrole, gaz, nucléaire

**En 2010:** pétrole, charbon, gaz = 80 à 90% des besoins (Am et Eur consommaient 51% de l'énergie mondiale)

**de 1900 à 2000:** la consommation d'énergie = X10 ou >

**En 2003:** consommation E mondiale = 12 TW [soit l'équivalent de 12 000 réacteurs de 1 GW] [ou équivalent de 10 milliards de tonnes de pétrole]

Prévision pour 2050: 24 TW/an [= X2], stabilisation?

PREAT A. GEOL-F-103 report

## ...courte synthèse...

En 2003: consommation E mondiale = 12 TW [soit l'équivalent de 12 000 réacteurs de 1 GW]

Prévision pour 2050: 24 TW, stabilisation?



Pour comparer, les 'RESERVES' [ordre de grandeur...] [s'appruées]

- Pétrole 1200TW/24 = 40 à 50 ans, Gaz 1200TW/24 = 50 à 70 ans**
- Charbon 4800TW/24 = 200 ans**
- Nucléaire à neutrons lents (U<sup>235</sup>) = 3000TW/24 = 40-50 ans** C. Steffens, 2010 (don pers.)-Aneva, EDF
- Nucléaire à neutrons rapides (U<sup>238</sup>, Th<sup>232</sup>) = 30 000TW/24 = 200-250 ans**
- Fusion thermonucléaire deutérium-tritium: non maîtrisée, rentabilité? quelques 10<sup>3</sup> ans, limitée par la quantité de lithium**
- Fusion thermonucléaire deutérium-deutérium: encore beaucoup plus difficile, Utopique? Il faut atteindre une T° de 100 millions de d°...], quelques 10<sup>9</sup>ans!**
- Nb l'E totale émise par les réacteurs a augmenté de moins de 6% pendant les 10 dernières années (soit < 1%/an, en comptant à partir de 2003)**

Pour comparer, les 'Energies Renouvelables'

**Hydraulique, Eolienne, Chauffage solaire, Photovoltaïque... = 10<sup>3</sup> ans**

mais rendement énergétique ENCORE trop faible...

PREAT A. GEOL-F-103 report



## ... courte prospective ...

### Scénario 2100: diversification à peu près égale des sources d'Énergie pour atteindre 24 TW/an

#### Réserves

- **Énergies fossiles: largement épuisées** (?effet de serre, réchauffement de qq °)
- **Nucléaire à neutrons lents: sources épuisées**
- **Nucléaire à neutrons rapides: 10 000 réacteurs [150 en France]**
- **Eoliennes: 10 millions dans le monde [100 000 en France]**
- **Chauffage solaire, cellule photovoltaïque: technologie maîtrisée**
- **Panneaux dans l'espace: non maîtrisé**

Renéves, 2003



## ... En attendant = casse tête énergétique

### Les EN ne sont pas dépourvues d'inconvénients ...

- **l'hydraulique** est celle qui a le plus fait ses preuves : son potentiel est important dans les pays en voie de développement (la prod. d'électricité à partir de l'hydraulique est = dans TOUTE l'Afrique à celle de la France!), MAIS les gds barrages (Chine... 76=20RNB) sont critiqués : bouleversement écosystèmes, déplacement population, modifications climatiques locales...
- la **biomasse** est utilisée depuis des millénaires (combustion végétaux, déchets organiques, bois). Récemment = gazéification (biogaz ou carburant liquide), pour couvrir les besoins mondiaux assurés aujourd'hui par le pétrole et charbon, il faut exploiter 12 millions km<sup>2</sup> (soit 22XFrance). En 2004 l'ensemble des terres cultivées ne couvrent que 13 millions de km<sup>2</sup> ==> **conflit entre besoins alimentaires et énergétiques ...**
- **éolien** projets d'envergure = offshore, MAIS = toujours caractère intermittent et stockage de l'énergie ...
- **photovoltaïque** = son KWh en 2004 est 4X plus cher que le KWh nucléaire



## ... courte prospective ...

### Scénario 4000: le nucléaire est largement épuisé (?sauf la fusion d-d)

#### Réserves

\*\*\* il ne reste plus que les énergies renouvelables...

Renéves, 2003

[la Terre reçoit et absorbe chaque année une E équivalente à 100 millions de réacteurs nucléaires, soit 10.000X à 15000X/]- la quantité requise pour les besoins actuels de l'humanité

Scénar, 2004





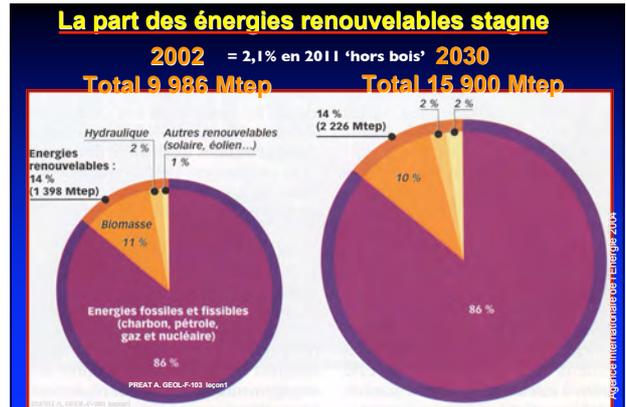
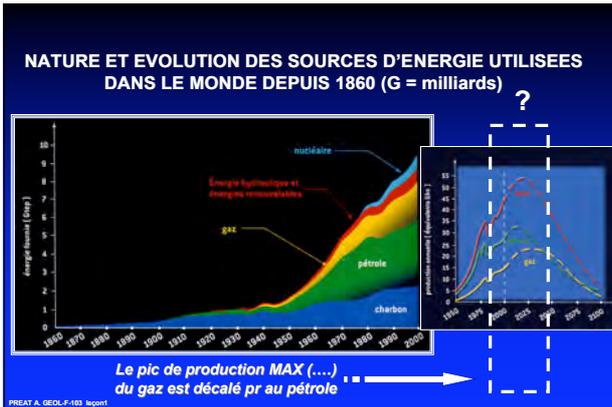
### EQUIVALENCES (suite...)

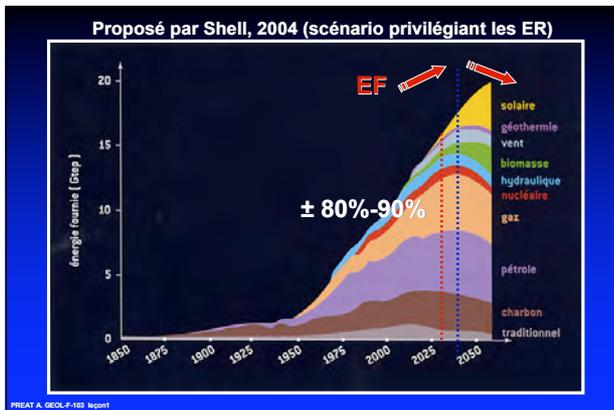
Le pouvoir calorifique du pétrole brut varie légèrement d'un gisement à l'autre, il est également différent pour les produits pétroliers raffinés

1t essence = 1,048 tep  
 1t GPL = 1,095 tep  
 1t fioul lourd = 0,952 tep  
 1t charbon = 0,6 à 0,75 [vs houille, coke, anthracite ...]  
**1tec = 0,697 tep**

--- rappel: 1 tep = 10<sup>10</sup> cal ---

PREAT A. GEOL-F-103 Incopt





↑ 90% = effet de serre accru!

sans l'effet de serre, la  $T^{\circ}_{\text{moy}}$  de la Terre serait de  $-18^{\circ}\text{C}$ . Grâce à ce phénomène **NATUREL** (= 'géologique'), elle est de  $15^{\circ}\text{C}$

... en 2100: réchauffement 'anthropique' de  $2^{\circ}$  à  $6^{\circ}\text{C}$ ?...  
[ $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ...]

PRÉAT A. GEOL-F-103 Incept

**en 2100: réchauffement 'anthropique'**

avec

- montée niveau de la mer de 15cm - 95cm en 100ans
- apparition de maladies tropicales...
- disparition glaciers
- fonte calottes...
- perturbations météorologiques (cyclones, tornades...)**
- etc
- etc
- ...

PRÉAT A. GEOL-F-103 Incept

**GIEC [1988]** Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat  
30 scientifiques élus... publiant un rapport tous les 6 ans, devant être approuvé à l'unanimité de 170 Etats...  
Prix Nobel de la Paix 2007

[www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

Ce que dit le rapport 2001: le changement climatique est DEJA à l'oeuvre

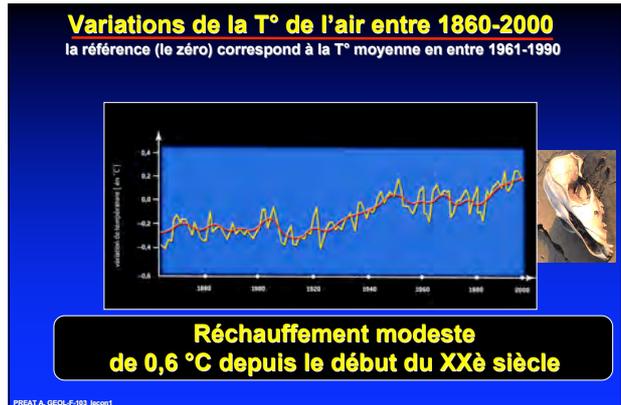
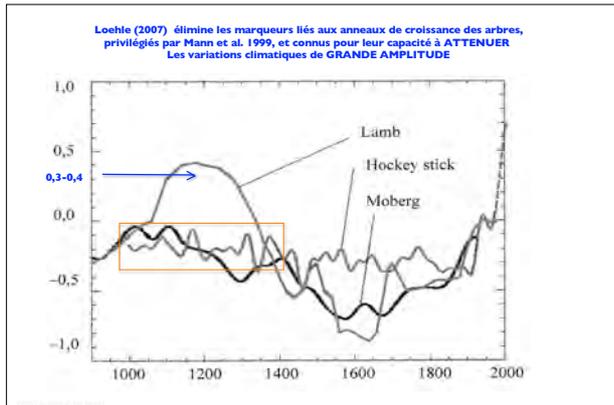
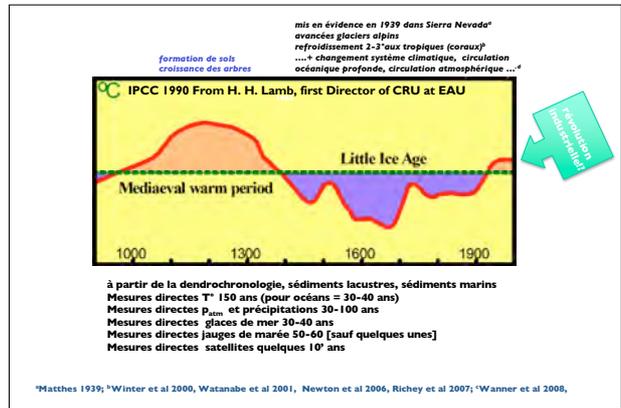
**CONSTAT validé en 2007**

- augmentation de la  $T^{\circ}$  moyenne terrestre de  $0,6 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ ,
- élévation du niveau des mers de 10 à 20 cm depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle,
- décennie 1990 la plus chaude depuis que les relevés météo existent,
- recul de la couverture neigeuse de 10 % depuis les années soixante,
- \*\*\* pour les experts du GIEC = forte augmentation des concentrations atm en gaz à effet de serre à l'oeuvre depuis la révolution industrielle

**PROSPECTIVE**

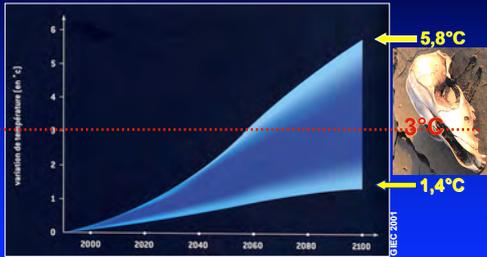
- poursuite élévation  $T^{\circ}$  et niveau des mers au XXI<sup>e</sup> siècle: entre  $+1,4$  et  $+5,8^{\circ}\text{C}$  pour 2100

Conséquences multiples: inondations et/ou sécheresses, pénurie eau potable, progression paludisme et choléra aux tropiques. A l'inverse, certaines régions des latitudes moyennes profiteront du réchauffement climatique, qui viendra améliorer la productivité agricole et diminuer les besoins énergétiques en hiver.



## Variations de la T° : FUTUR ?

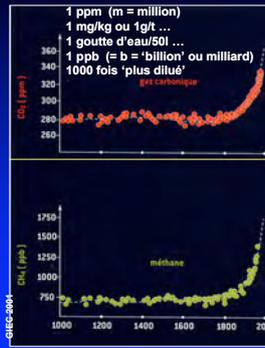
basées sur les modèles construits par les climatologues



Prédiction de l'augmentation de la T° moyenne de l'air d'ici à 2100. Figure basée sur 7 modèles différents (cf hypothèses de base)

PREAT A. GEOL-F-103 Incept

## Le dioxyde de carbone et le méthane



**CO<sub>2</sub>**

- 390 ppm [0,039%, 0,39l/m<sup>3</sup> d'air [2012]
- grande capacité d'absorption du ray IR
- Dissolution des calcaires
- Combustion des forêts
- Respiration animale et végétale
- Emissions volcaniques
- Combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel)
- = gaz stable, temps de résidence atm 200 ans?

**CH<sub>4</sub>**

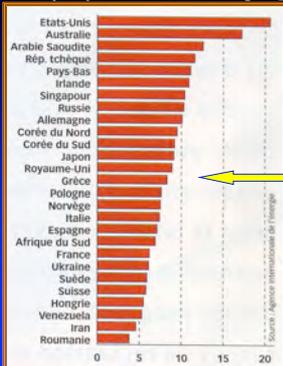
- 40X plus actif que CO<sub>2</sub>
- 1,8 ppm
- décomposition MO en milieu pauvre en O<sub>2</sub>
- Marais, rizières, flatulences des ruminants, décharges ordures ménagères, fuite gaz naturel, grisou
- temps de résidence atm très court
- = 20% de l'effet de serre, largement d'origine anthropique, teneur augmente de 1%/an, SOIT LE TRIPLE DU CO<sub>2</sub>
- + déstockage à partir clathrates?? Risque majeur

PREAT A. GEOL-F-103 Incept

## CO<sub>2</sub> émis par personne en 2000 [t CO<sub>2</sub>/hab]

**rappel**  
1997 - Kyoto  
Il faut réduire d'ici à 2012 les émissions de 5,2% pr 1990  
...  
la Russie signe en 2004  
...  
pas les US et Australie

Entré en vigueur 16-02-2005  
En 2006: 156 pays représentant 61% des émissions



Soit 23,5 Gt en 2005 émis par activités humaines  
13,5 Gt provenant de 7837 sites industriels ont été récupérés

• Belgique +6,4% 1990-2001  
7-7,5% 2010 (objectif)

PREAT A. GEOL-F-103 Incept



Permière stagnation en 2014  
La crise de 2008 n'est pratiquement pas perceptible

## Emissions de gaz à effet de serre par habitant, en tonnes



Observatoire Economique M2011

PREAT A. GEOL-F-103 Incept



• Aujourd'hui on remonte à -740 000 années, forage EPICA 3140m, janv 2003  
 = programme EPICA European Project for Ice Coring in Antarctica  
 (analyse des isotopes et des bulles piégées dans la glace)

• A plus court terme, depuis 1850 période pré-industrielle:  
 $CH_4 = \times 2$  [700 à 1750 ppb] = 50% en plus pour l'effet de serre!  
 $CO_2 = \times 2$  [280 à 385 ppm  $\Rightarrow$  PPM# ppb], mais  $CH_4$  30X +absorbant que  $CO_2$

**Augmentation méthane = anthropique exploitation gaz naturel, décharges, zones agricoles irriguées (rizières), bétail et ... plantes [2006, rhizosphère??]**

### + HYDRATES DE METHANE ou CLATHRATES

molécules d'eau en 'cages' ayant piégé du méthane sous forme solide  
 [intérêt pétrolier, cfr plus loin]

dans marges continentales, où l'eau est relativement froide,  
 et la pression assez élevée, avec matière organique suffisante  
 pour satisfaire les bactéries méthanogènes

#### EXTREMEMENT INSTABLES

$\Rightarrow \Delta T(+)$ ,  $\Delta P(-)$   $\Leftarrow$   $\Delta$ climatiques, soulèvements tectoniques ou  
 glissements sous-marins

## les hydrates de méthane ou CLATHRATES

découverts dans les années 70' lors de forages marins  
 danger = puits éruptifs .... ensuite = source d'E?

Ech naturels de clathrates,  
 dragués en mer et  
 se décomposant sur le pont

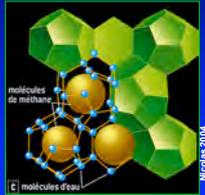


Les clathrates sont blancs  
 et interstratifiés avec le  
 sédiment

Chauffée dans les mains,  
 la glace des clathrates  
 fond, libérant de l'eau et  
 du méthane ici enflammé

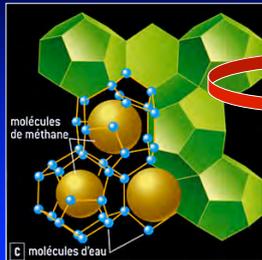


Structure cristalline des  
 clathrates montrant  
 l'empilement des polyèdres  
 (en vert)



En écorché, les cages de  
 molécules d'eau (en bleu)  
 piègeant les molécules de méthane

## les hydrates de méthane ou CLATHRATES



=  
 piège très efficace,  
 1 m<sup>3</sup> de clathrates peut contenir  
 près de 170 m<sup>3</sup> de méthane gazeux

◊ 'prisonniers' à 70m de pfdour  
 dans le permafrost sibérien,  
 ils s'échapperont dès que  
 $T^{\circ} = -5C^{\circ} \Rightarrow$  crise climatique?  
 ◊ + 'tsunamis' si exploités sur  
 le talus

**Origine? Décomposition anaérobie de bactéries**  
 Connues au moins jusqu'à 1km de profondeur (forages océaniques)

## les hydrates de méthane ou CLATHRATES

**années 80'**: transition Paléocène-Eocène [-55Ma]

On découvre que les rapports isotopiques du carbone avaient  
 changé TRES RAPIDEMENT en moins d'un millénaire dans les  
 océans profonds, sur Terre aux pôles ou aux tropiques

L'isotope le plus léger <sup>12</sup>C a été favorisé aux dépens du <sup>13</sup>C

Au même moment la Planète a connu un réchauffement  
 $T^{\circ}$  moy = augmentation de 3 à 4°C, et plus aux hautes latitudes,  
 du fond des océans pendant 10.000 ans. Retour 'à la normale' après  
 200.000 ans (progressif par 'feed-back'...)

depuis lors: ? épisodes soudains au J, P/T et Pcm/Cm

Auj: le mécanisme déclencheur est (toujours) inconnu...

**= possible modèle de catastrophe climatique**

**Le réchauffement peut-il induire une fusion des clathrates?**



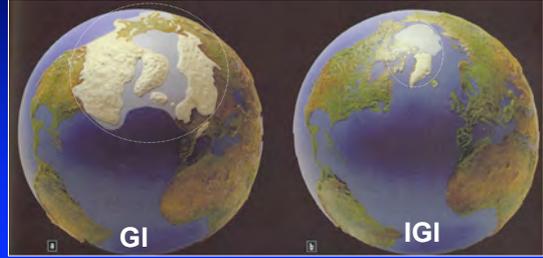
77 gisements recensés en 2001 (cercles blancs = échantillonnés)  
 nb à la fin dernière GI ==> réchauffement de l'eau de qq d°  
 ==> fusion des clathrates dans les sédiments de la marge de Norvège  
 (cousin eau-méthane) ==> gigantesque glissement sous-marin en Mer du Nord: 450 m (ép) X 800 km (raz-de-marée, tsunamis ...  
 et dépôt de sédiments à + 4m en Ecosse [nb 26.12. 2004 -1030m==>-30m qq h!]

PREAT A. GEOL-F-103 Incept

Nicola 2004

**Calotte glaciaire Arctique**

Dernière glaciation -24 000 ans couvrait une grande partie hémisphère Nord  
 T° moy globale inf de 5° à celle d'aujourd'hui  
 Aujourd'hui = Interglaciaire (cf NM...)



PREAT A. GEOL-F-103 Incept

Actuellement on remonte à -1,7 Ma avec 17 cycles  
 Soit 17 X 100 000 ans [excentricité, Milankovitch 1924]

Précession  
 Obliquité  
 Excentricité

$\Delta T_{air} = 5-6^{\circ}C$

Aujourd'hui = Interglaciaire pour encore 50 000 ans

- Grâce à EPICA: 'court terme possible' = Dryas+Optimum Holocène
- Dryas Récent: refroidissement pdt 2000 ans [entre -14 et -12000 ans]  
 cause: retrait du Gulf Stream
- Optimum Holocène: réchauffement de 2-3°C pdt 3500ans [-8 à -4500]  
 cause: retour du Gulf Stream, Sahara = savane 'humide'...
- + Moyen-Age (chaud) avec Viking à la côte Sud 'Greenland'...
- + 'Petit âge glaciaire' entre la Renaissance et ère industrielle (cf Brueghel)

PREAT A. GEOL-F-103 Incept

**Variations de la T° depuis la fin de la dernière glaciation**

fortes variations climatiques autour de la T° moyenne du XXe siècle



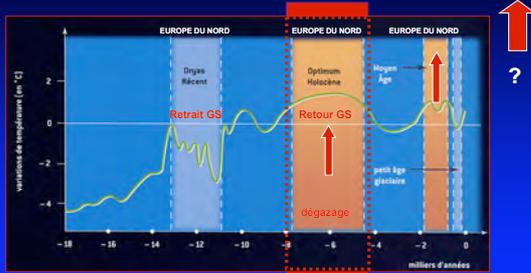
Depuis la fonte des glaciers et calottes polaires [-18 000 à -15 000ans], le NM est remonté (en trois phases) d'environ 120m

Le réchauffement général fut interrompu vers -12 500 ans, par un millénaire froid = 'événement du DRYAS RECENT' lié au retrait du Gulf Stream

PREAT A. GEOL-F-103 Incept

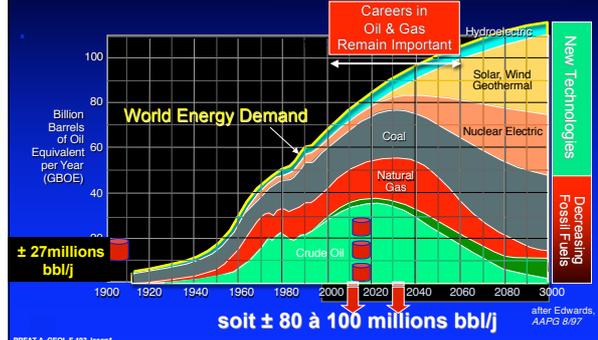
### Variations de la T° depuis la fin de la dernière glaciation

fortes variations climatiques autour de la T° moyenne du XX<sup>e</sup> siècle

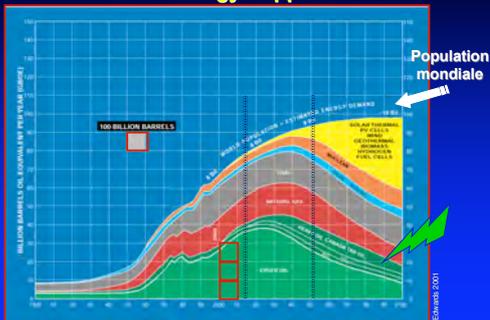


=? situation fin 21<sup>e</sup> siècle (pour la Planète)

### Projected World Energy Supplies = Production



### Estimates of 21st Century World Energy Supplies



### EMISSIONS DE CO<sub>2</sub>\* OU EQUIVALENT CO, EN g/kWh PAR SOURCE D'ENERGIE (2009)

NUCLEAIRE		6
HYDRAULIQUE		4 à 7
EOLIEN		3 à 22*
SOLAIRE photovoltaïque		50 à 150**
GAZ cycle combiné		400
PETROLE fioul lourd		850
CHARBON		750 à 1100*
BIOMASSE bois		0 à 1500***

\* suivant technologie \*\* suivant lieu de fabrication \*\*\* si replantation ou pas

plus un combustible contient de l'hydrogène dans sa molécule moins il rejette de gaz carbonique

plus un combustible contient de l'hydrogène dans sa molécule  
moins il rejette de gaz carbonique



**100-200 g/km**  
ou ... ou encore 1 kg/ 5 à 10 km!  
**1 à 2 g/10m**