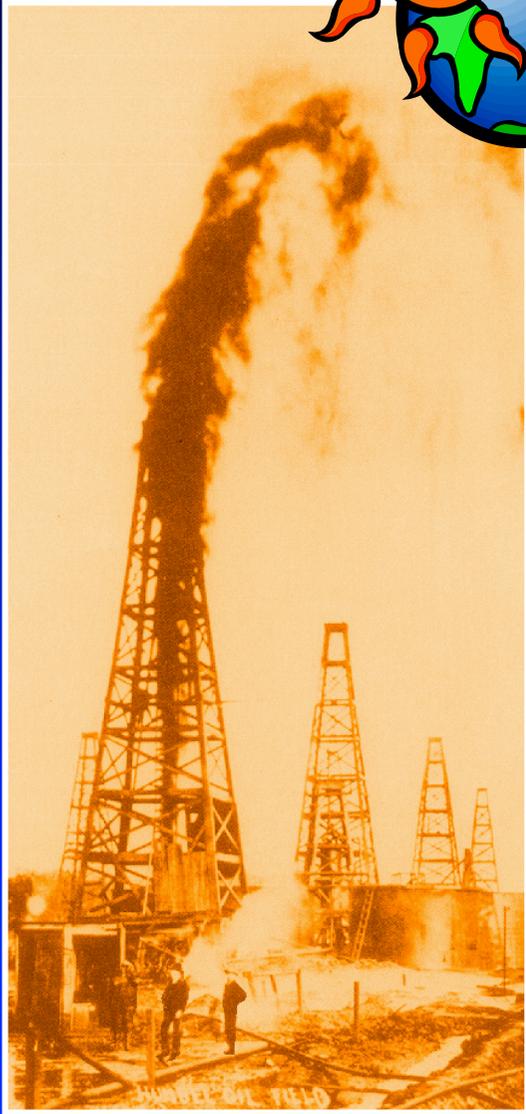


Gestion de l'énergie. La quadrature du cercle!



L'ERE DU PETROLE POUR COMBIEN DE TEMPS ENCORE?

*Académie royale de Belgique
le 26 novembre 2009
(partie 1/2)*

Alain PREAT
Professeur géologie ULB
apreat@ulb.ac.be



LES ENSEIGNEMENTS PRIS DE LA CRÉATION DES ÉNERGIES

- **ENERGIES FOSSILES** = énergies **concentrées** mais non renouvelables [*E solaire stockée au cours des temps géologiques*]

◇ **Charbon** ◇◇ **Pétrole** ◇◇◇ **Gaz naturel**

- **ENERGIES NUCLEAIRES** = énergies **très concentrées**

◇ **Fission** [*Centrales nucléaires actuelles*] ◇◇ **Fusion** [...]

un gramme U^{235} = autant d'E qu'une tonne de pétrole!, $1\text{cm}^3 = 19\text{g } U^{235} = 47,5 \text{ T charbon!}$

- **ENERGIES RENOUVELABLES** = énergies **diluées** ou diffuses mais renouvelables

◇ **Hydraulique** ◇◇ **Solaire** ◇◇◇ **Eolienne**

◇◇◇◇ **Biomasse** ◇◇◇◇◇ **Géothermie**

en 1h le Soleil déverse 'notre' Energie de 365 jours

ou il déverse 15000X notre consommation mondiale à chaque instant

● 1tep = 10^{10} cal = ± 42 GJ ou ± 11700 kWh

1 calorie = 4,18 J (1cal = quantité de chaleur pour élever de 14,5° à 15,5° la T° de 1g d'eau)

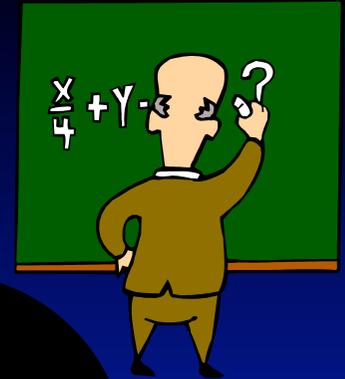
Le saut d'une puce = 10^{-7} J (soit environ 4 dix-millionième de cal),

L'homme a besoin de 10^7 J d'énergie/j [± 2500 Kcal] sf de nourriture, de chaleur ...

Une tep représente donc 11_{1/2} ans de ses besoins vitaux!

[1bbl = ± 1 _{1/2} an, 1l = 3,6j]

● Un cyclone dans les Caraïbes = $3,8 \times 10^{18}$ J soit 100. 10^6 tep



1t ^{235}U \implies 10 000 tep

1000m³ gaz p_{atm} \implies 0,9 tep

1t charbon \implies 0,7 tep

1 Réacteur Nucléaire de 1GW_e

= 100km² solaire pv, soit 5000km² pour toute l'électricité en France

= 2 500 éoliennes (de 2MW) et 500km²

= 50 000km² à partir géothermie

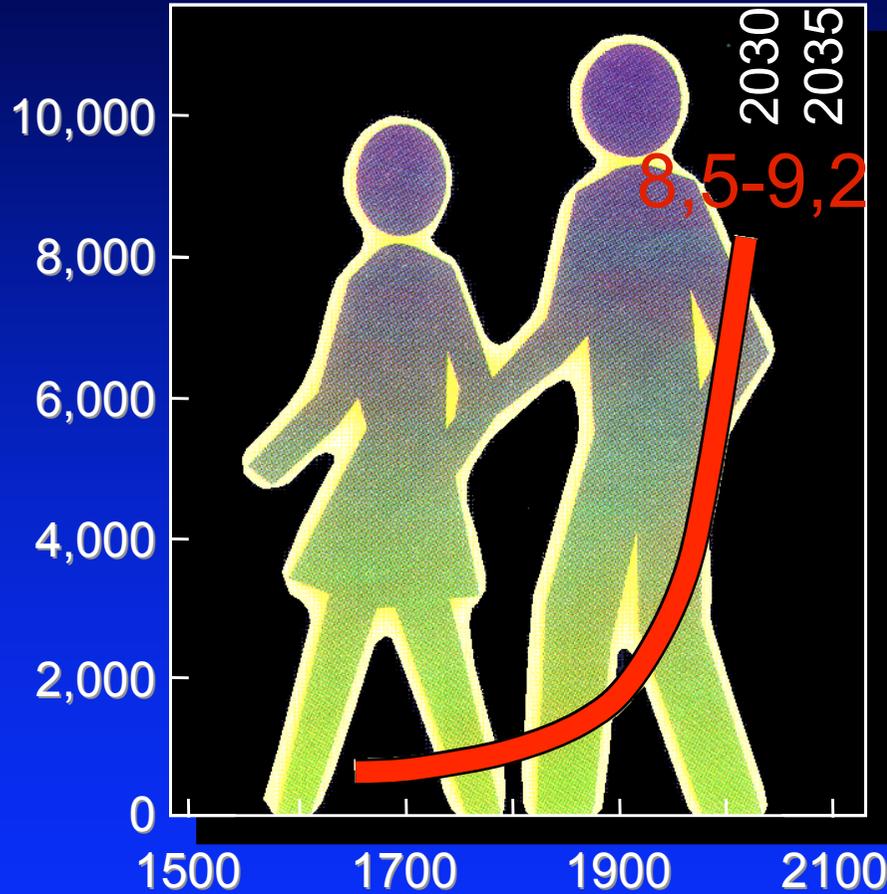
= 30 000km² à partir biodiesel (tournesol ou colza)

ou 43μg ^{235}U (0,0000043g) = 70g essence = 3,6t eau sur 100m = 1kWh

Population - Besoins en Energie

Augmentera 'en moyenne' de 1,5%/an jusqu'en 2030

Negawatt
:2



[12,2opt-53pes2100]

15-28 Gtep 2050

17Gtep-2030

12Gtep-2005

=9,7 Gtep

5,2opt-15,2pes
pour 2000

1983: colloque
Stanford



Club de Rome

60'-70'

25Gtep-2000

483Gtep-2050

En 2000-2005: pétrole, charbon, gaz = 90% des besoins
(Am et Eur consommaient 51% de l'énergie mondiale)
de 1850 la consommation d'énergie = X150 à ?X1000

Population - Besoins en Energie

En 2008: CRISE et BBL = 147\$!

Consommation mondiale PETROLE = -0,6%

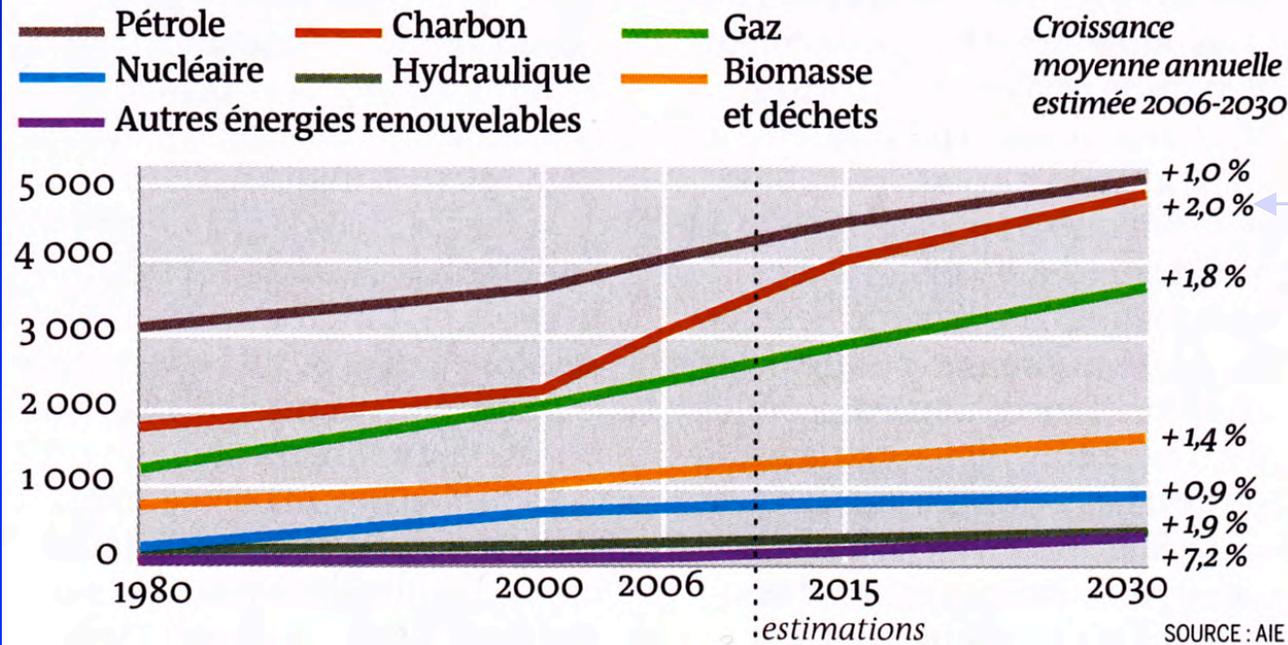
Consommation mondiale GAZ = +2,5%

Consommation mondiale CHARBON >2,5% (+4,9% entre 2000 et 2006)
(charbon, pour la 6^{ème} année consécutive)

TOTAL: la consommation mondiale d'énergie primaire
a augmenté de +1,4 % en 2008 (malgré la crise...)

Demande énergétique mondiale

En millions de tonnes équivalent pétrole (TEP)



soit +60% entre 2006-2030
Sequestration pas avant 2020?
et effets en 2030 (AIE, 2008)

Population - Besoins en Energie

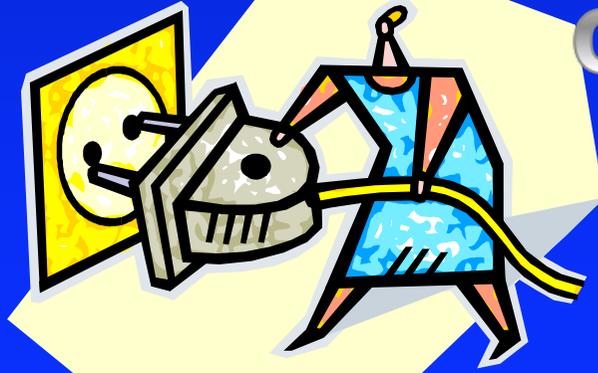
2005 (selon AIEA-2007)



ENERGIE PRIMAIRE
combustibles fossiles

80% ou +...

PRODUCTION ELECTRICITE
combustibles fossiles



65% [charbon 40%]

Hydraulique 16% Nucléaire 15%

Nb: en Chine, il se construit 2 centrales au charbon/semaine

Nb: aux USA, 640 centrales thermiques au charbon, 140 sont prévues d'ici peu

Population - Besoins en Energie

En 2004: 1Américain 25bbl/an, 1Japonais 18, 1Européen 12,
1Terrien moyen 5, 1Chinois1,5 et 1Indien 1bbl/j

Au cours de sa vie, chaque Américain né en 2008 consommera...

730,3 tonnes
de pierres, sable
et graviers

310 000 litres
de pétrole

266,4 t
de charbon

161 000 m³
de gaz naturel

30,7 t
d'autres minerais
et métaux

29,7 t
de ciment

13,4 t
de minerai
de fer

12,9 t
de sel

9 t
de phosphates

8,7 t
d'argile

2,6 t
de minerai
d'aluminium

594 kg
de cuivre

421 kg
de plomb

304 kg
de zinc

49 g
d'or

1950 bbl

soit 150 esclaves 24/24, 7/7



:50

39 bbl

Source : Mineral Information Institute

En 2006, la consommation moyenne primaire annuelle mondiale/habitant

1,7 tep

(valeur basse sans grande signification)

0,024 tep/hab/an ETHIOPIE à 8,6 tep/hab/an USA (ratio X358)

entre 4 et 4,5 Europe et Japon

Chine: 1,3

Inde: 0,4

...

La population mondiale devrait croître de 50% environ de 2000 à 2050

En 1800: E primaire mondiale = 0,2 Gtep avec 1 milliard d'habitants

En 2000': = environ 11 Gtep ...

En 2007: 12 Gtep dont 1,5 = ER (soit 12,4%)

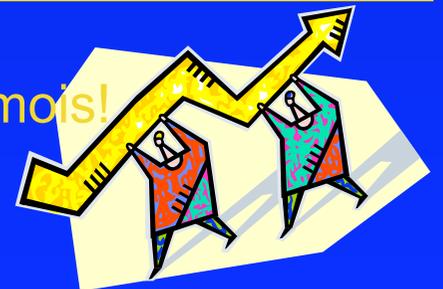
En 2030: 17,7 Gtep? cf 'BRIC' = +50%!

Il faudra donc trouver ±50% d'énergie en plus tout en réduisant nos émissions de GES

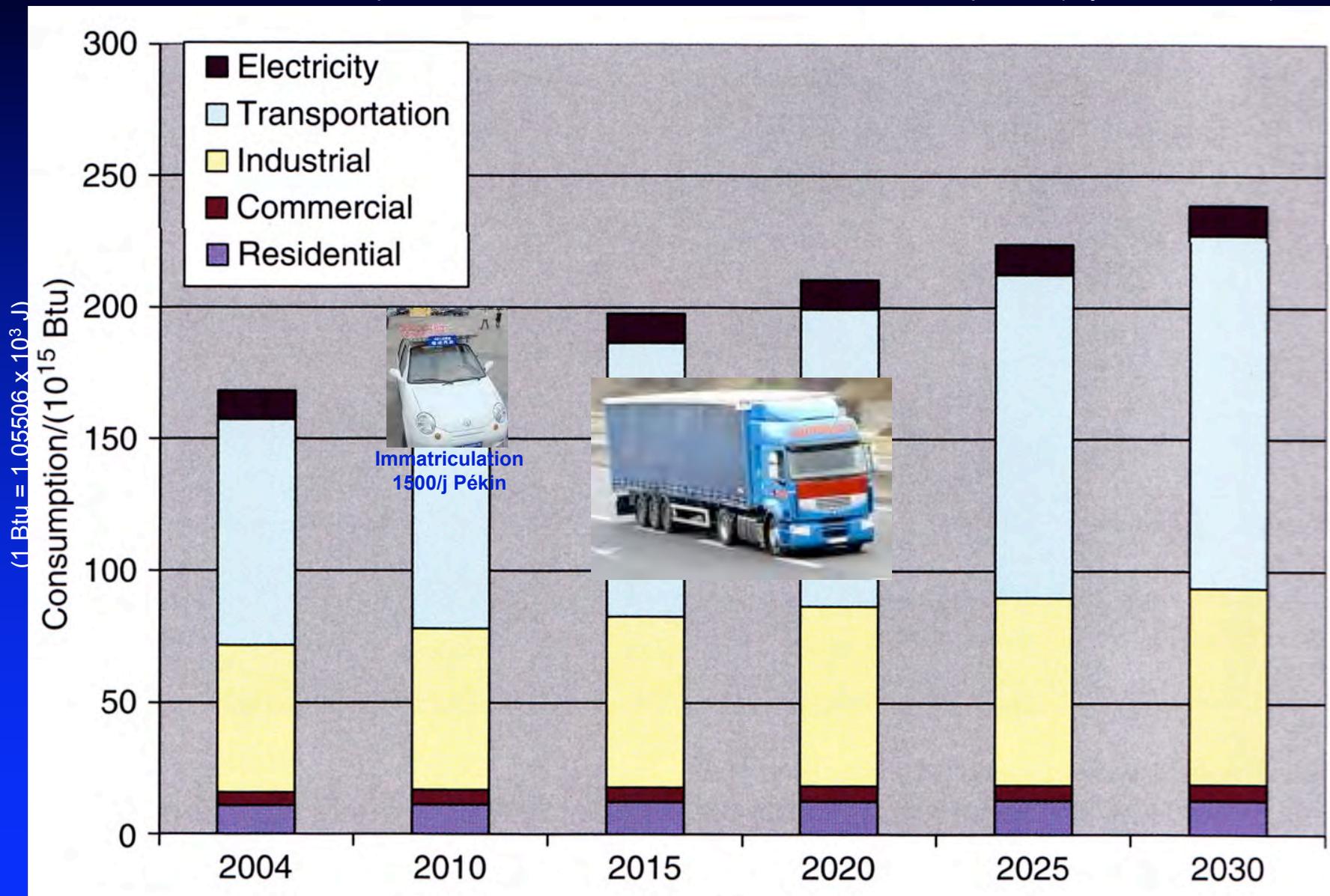
Chaque jour: 190 000 personnes en plus, donc ±6 millions/mois!

ou encore ± la Belgique tous les 2 mois...

En 2050?, En 2100 ... ?



En 2009: seuls 2% de Chinois possèdent une voiture => 3,5 M voitures à Pékin sont à prévoir (auj 1voiture/minute)



En 2009 : 97% du transport dépend du pétrole

Letcher 2009

...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...] [=prouvées]

Pétrole $1200\text{TW}/24 = 40$ à 50 ans, Gaz $1200\text{TW}/24 = 50$ à 70 ans
Charbon $4800\text{TW}/24 = 200$ ans

Nucléaire à neutrons lents (U^{235}) = $3000\text{TW}/24 = 125$ ans

Nucléaire à neutrons rapides (U^{238} , Th^{232}) = $30\ 000\text{TW}/24 = 1200$ ans

Fusion thermonucléaire deutérium-tritium: non maîtrisée, rentabilité?
quelques 10^3 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 10^9 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... = 10^9 ans
mais rendement énergétique ENCORE trop faible...



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
On pourrait diminuer jusqu'à 70% la consommation d'E
par rapport aux tendances actuelles, dans nos pays!**

?



?



en attendant = casse-tête énergétique
3 à 4 %

une alternative

RES SERIEUSE



= SOBRIETE

25 %

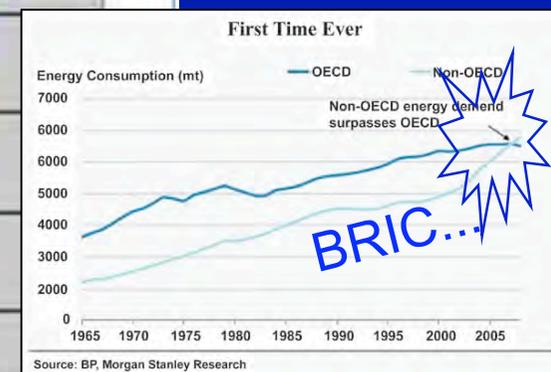
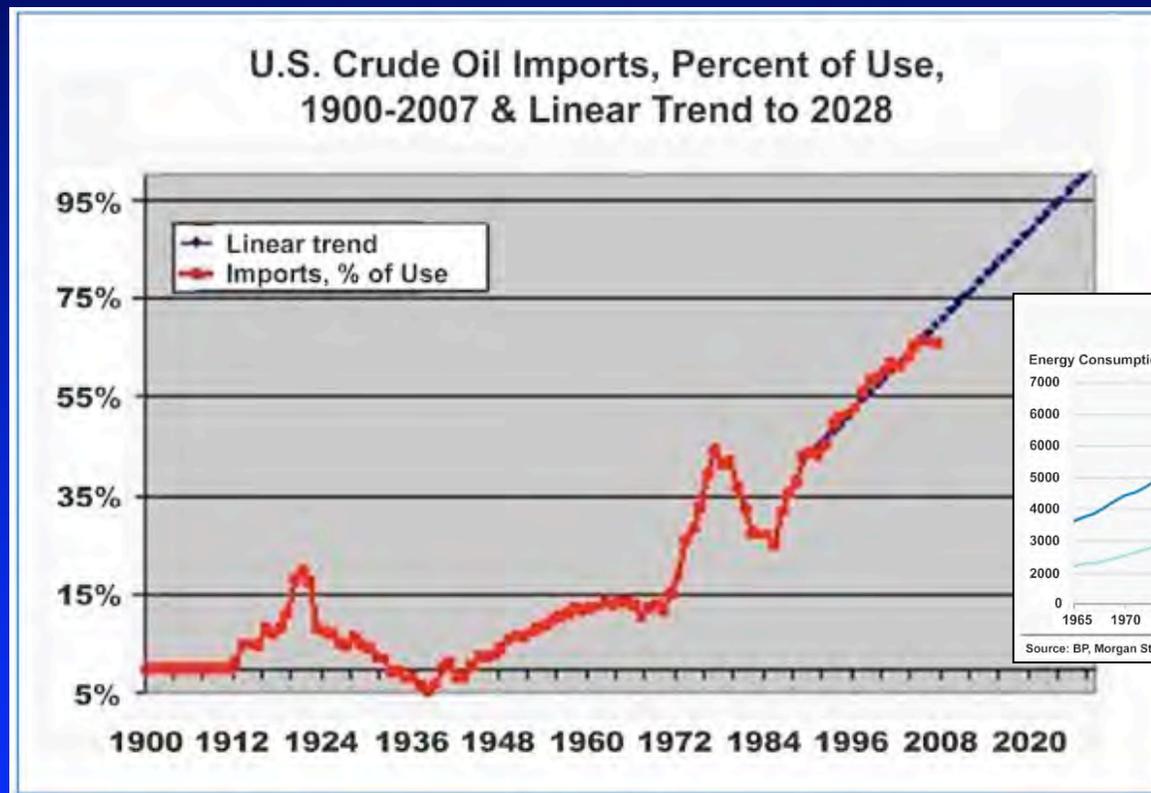
ou 1/4 production mondiale

En 2008, 2009 les USA importent 60% de leur pétrole....

Le TOP10 des consommateurs de pétrole en 2008

	Mbbl/d
USA	19,4
Chine+HK	8,3
Inde	4,8
Japon	4,8
Russie	2,7
Allemagne	2,5
Brésil	2,4
Corée Sud	2,3
Canada	2,3
Arabie S.	2,2
	49,7

$\Sigma \pm 85$



Même type de graphique pour la Chine depuis son décollage économique

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. 10⁶ hab] 22 millions.

En 2004: 1Américain 25bbl/an, 1Japonais 18, 1Européen 12, 1Terrien moyen 5, 1Chinois1,5 et 1Indien 1bbl/j

1 bbl = 1600 kWh

31 pays
16% Electr Mond



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

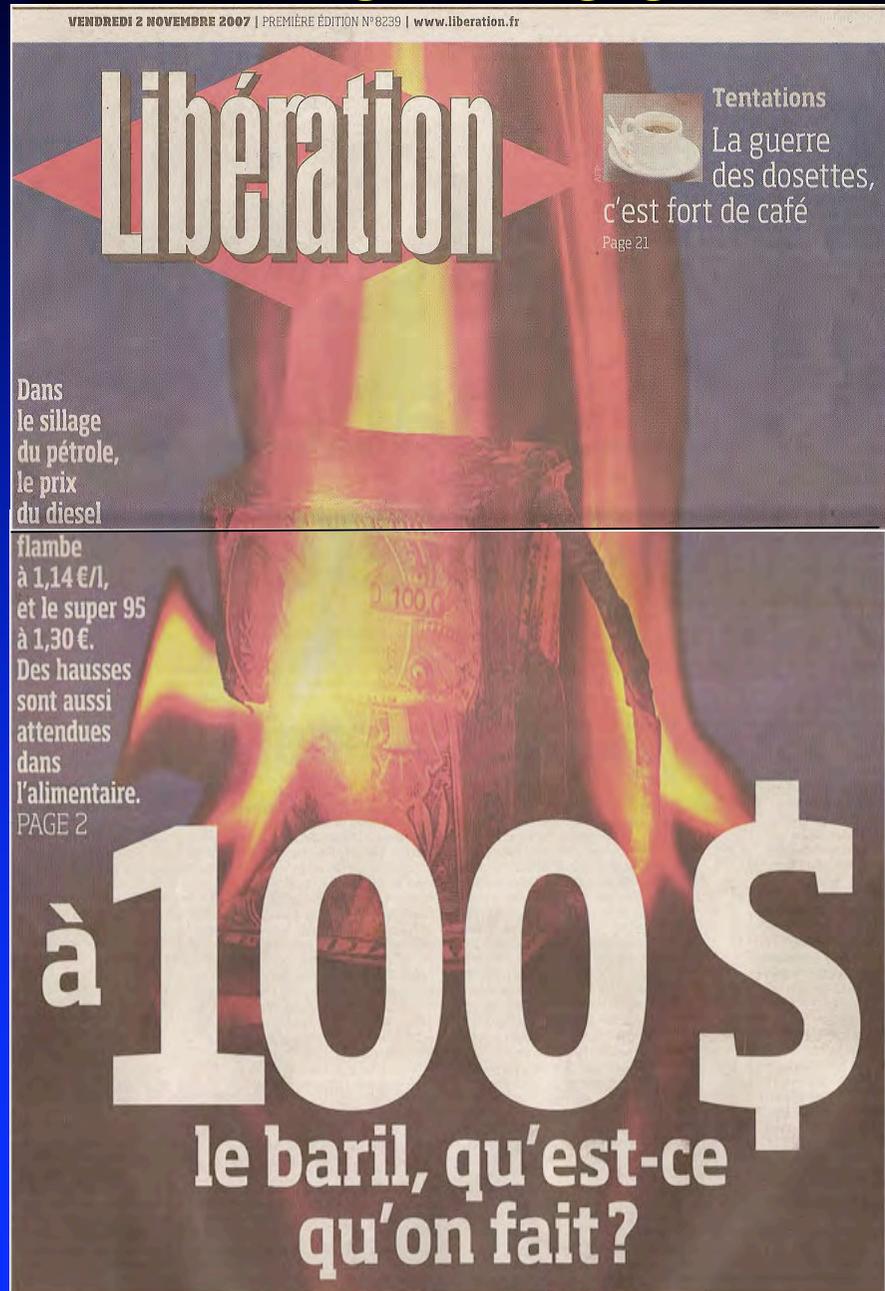
440 réacteurs dans le monde en 2005
Belgique :11 arrêtés et 7 en fonctionnement

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

En Chine2007: 15+5 ==> X2 en 2020

En 2009 (Monde): 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 \$

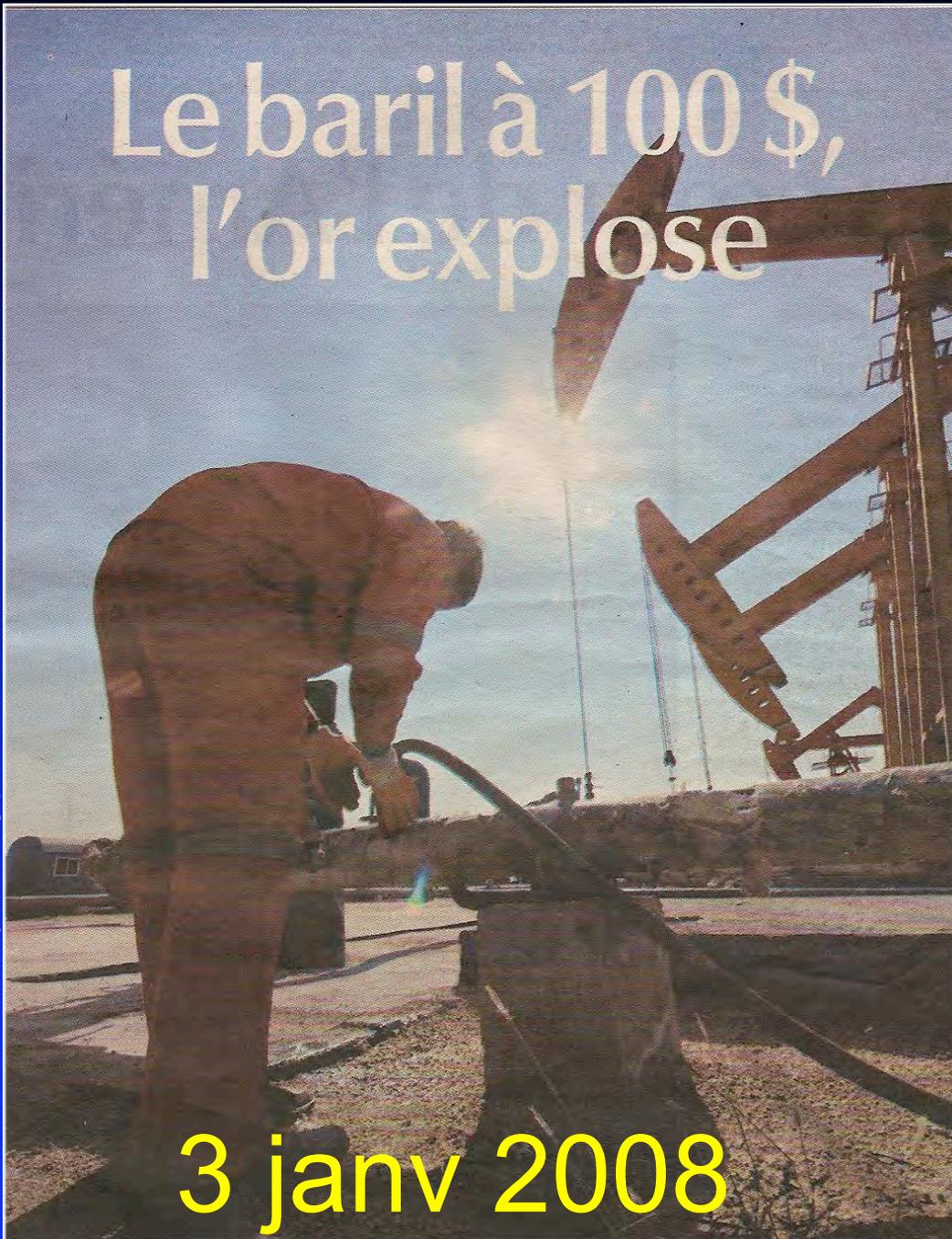
Que faire? ° sobriété ° transport....

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) empochant 30€/mois? »
Rép: « Ils mourront, monsieur, ils mourront ...»

Le baril à 100 \$, l'or explose



3 janv 2008

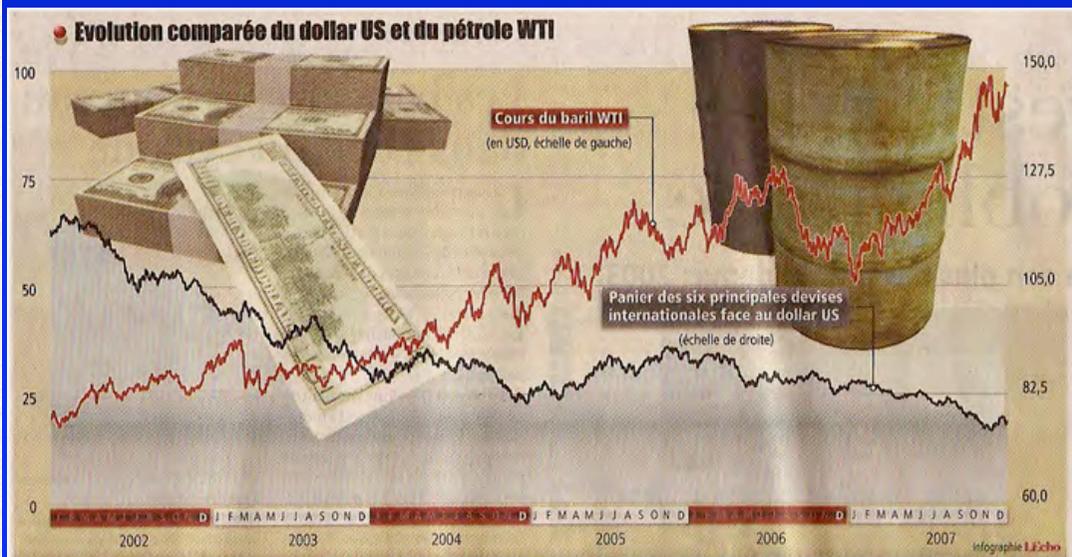
La Libre Belgique

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]

nb 21 fév 2008: 100,10 \$ 'durablement'?
26 fév 2008: 101,40 \$ 'durablement'?
28 fév 2008: 101,45 \$ 'durablement'?
7 mars 2008: 105,42 \$ 'durablement' ?

'rien de spécial'



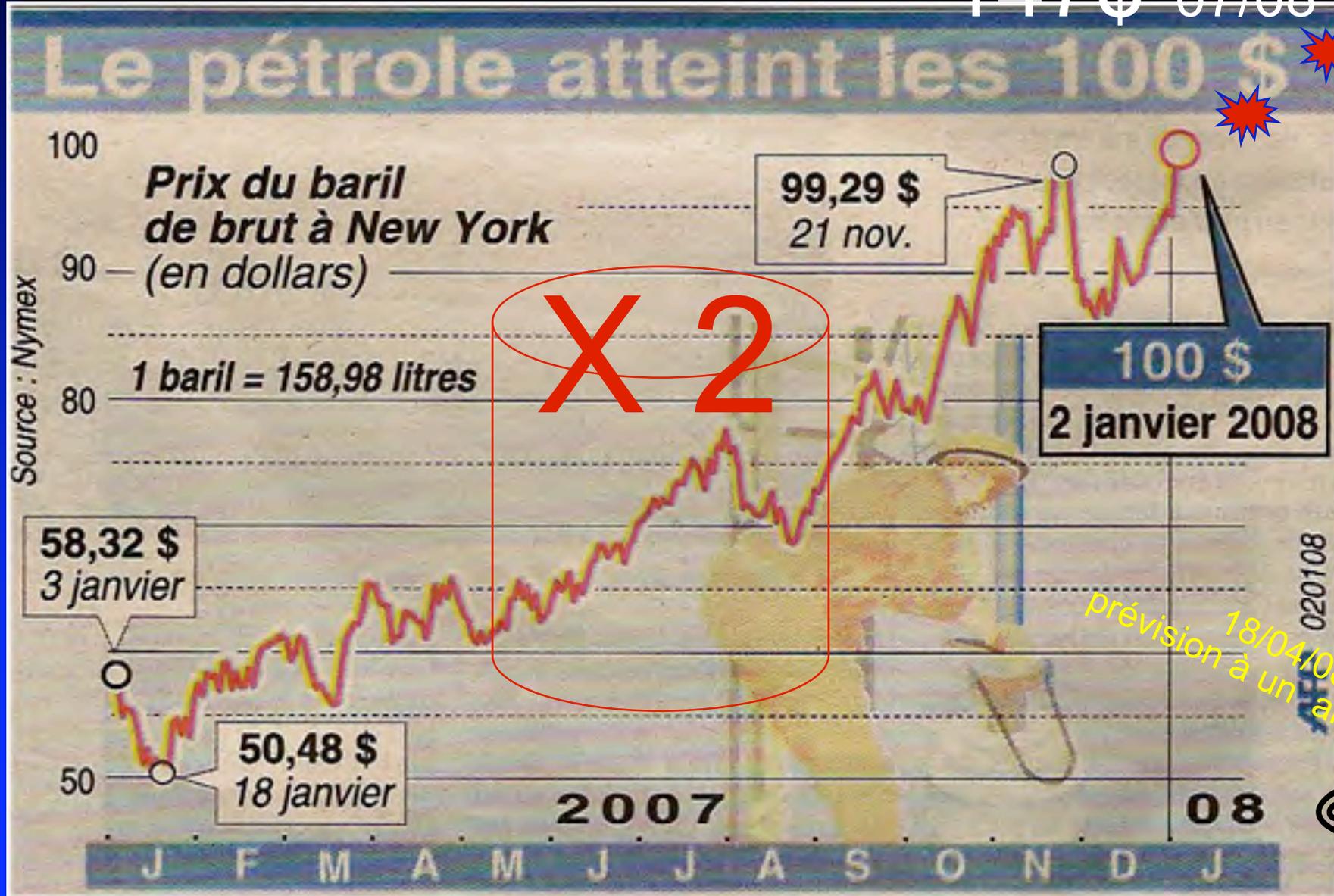
Les Echos 3.01.08

3 janv 2008

La Libre Belgique

147\$-07/08

prévision à un an: 132 \$
2/03/08



X2



±45\$

prévision à un an: 149 \$
18/04/08



±45\$

Les prévisions du 3 janvier 2008 ... se sont avérées ...

ERRONÉES



PREAT A Ulb, Académie royale de Belgique, nov 2009

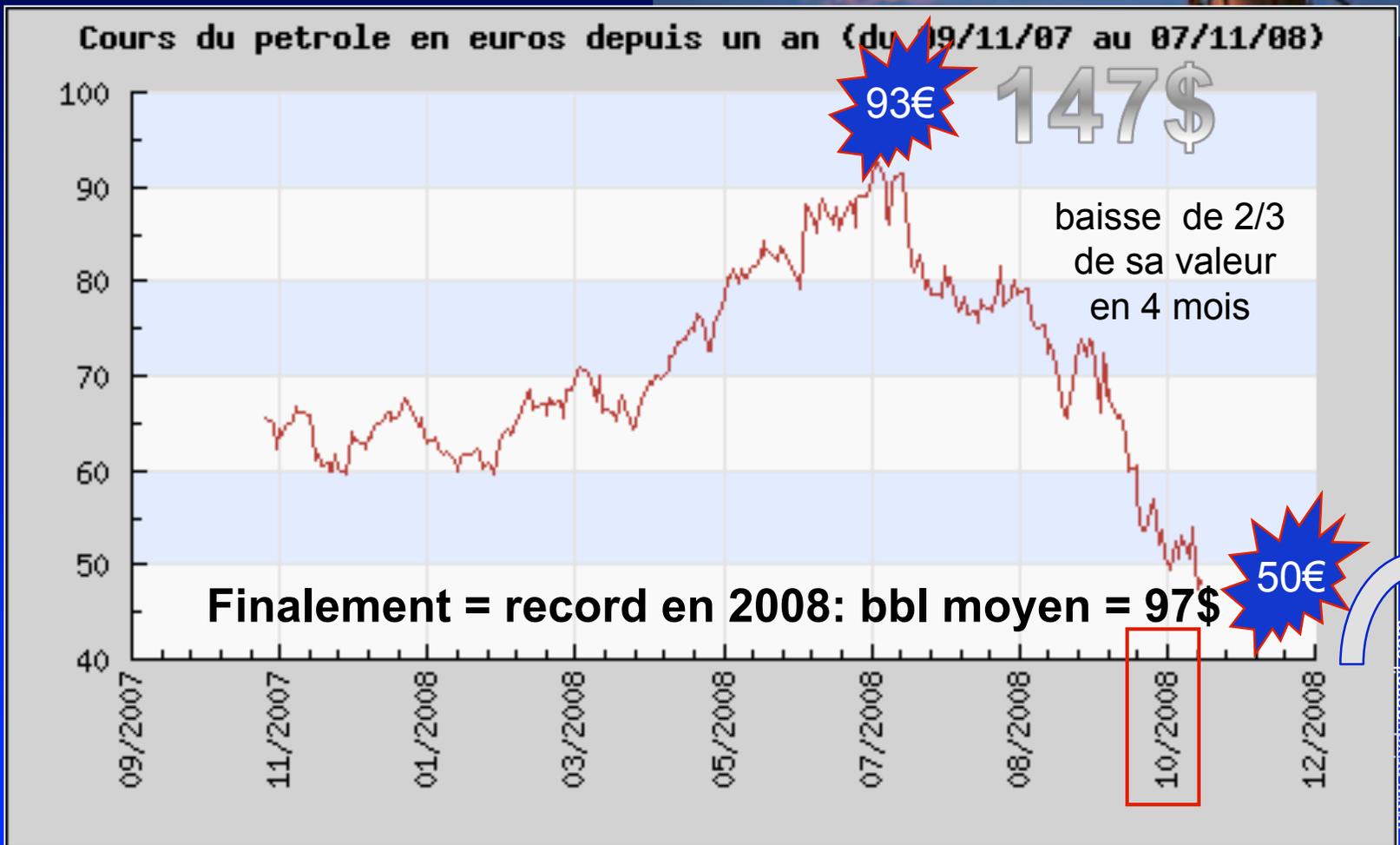
C Maund 2008

Ici **baisse** du prix **MALGRE** ouragan 'Gustav', conflit russo -géorgien
 Les marchés 'estiment' que le ralentissement économique (**CRISE FINANCIERE...FORTIS etc.**) va entraîner un tassement de la demande et que les prix du bbl ne peuvent que baisser à court terme

50

Les prévisions du 3 janvier 2008 ... se sont avérées ...

ERRONEES...



?

50\$

± 35\$ - 40\$ début 2009

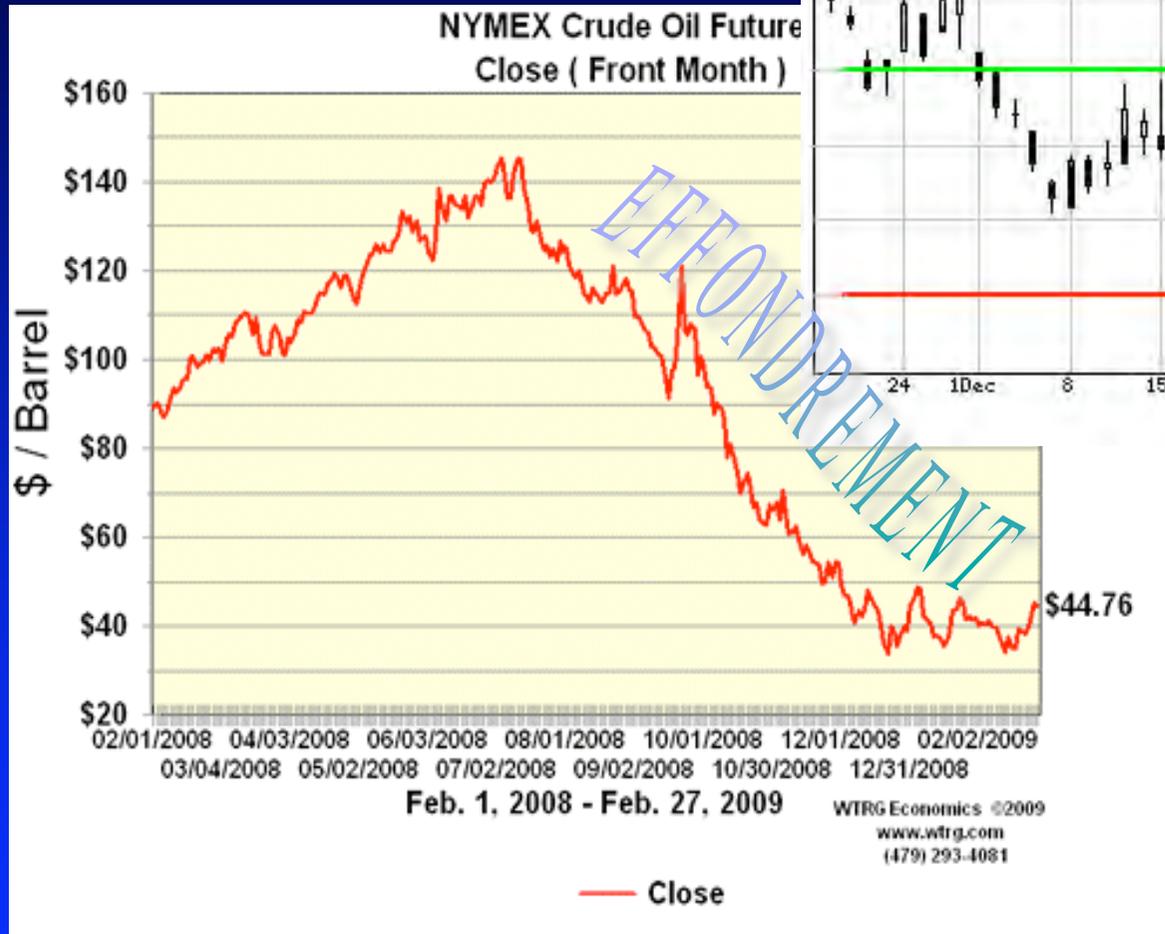
La demande de produits pétroliers a baissé de 7,1% aux Etats-Unis sur les quatre semaines (octobre) par rapport à l'année précédente

OPEP: diminuer rapidement les quotas.... ?



début 2009 = 'couloir' 35-50\$

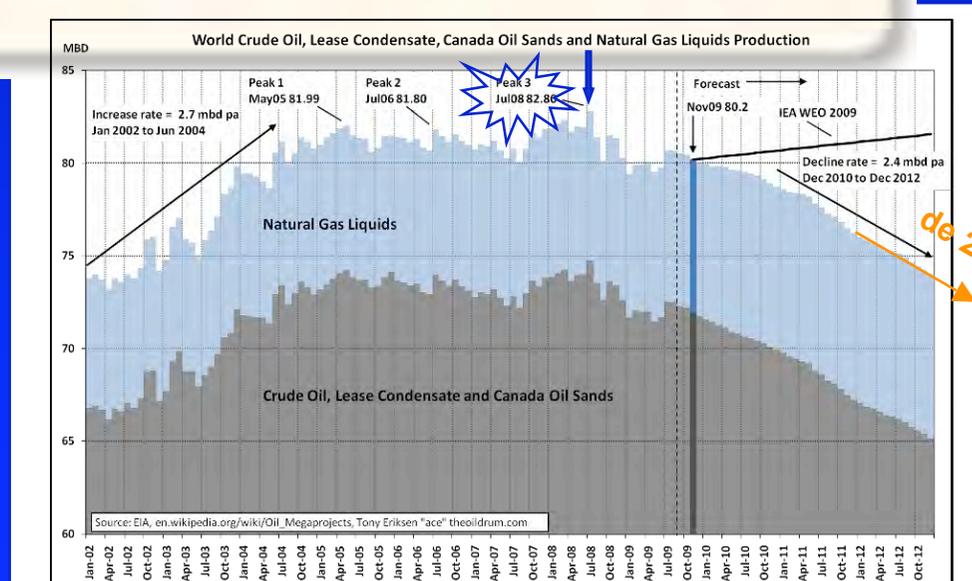
(court terme 1-3 mois)



The severance of \$ 35 is "possible" and not "probable."
This breakdown of \$ 35 would result in a decrease in the area of \$ 20 a barrel. Ultimately this would have a devastating effect on the long-term production.
(Thomas Chaize, 18 Feb 2009)

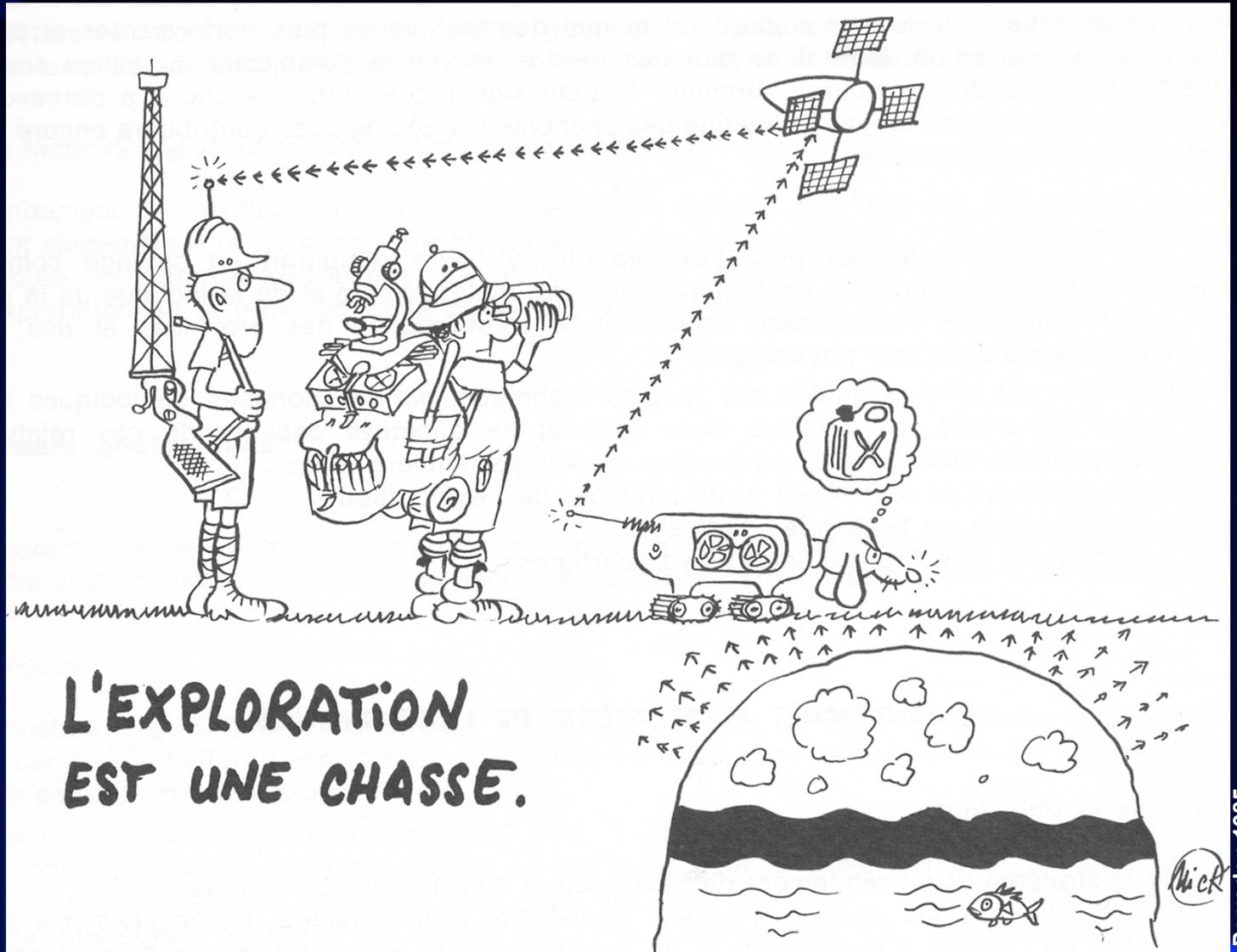
Cela n'est pas arrivé ==> nouveau couloir 80\$ à?100\$
(+ spéculation:: Déc 2008 1bbl = 33\$, Nov 2009 = x2)

fin 2009 = 'couloir' 80- ?100\$





La Recherche de l'Energie...

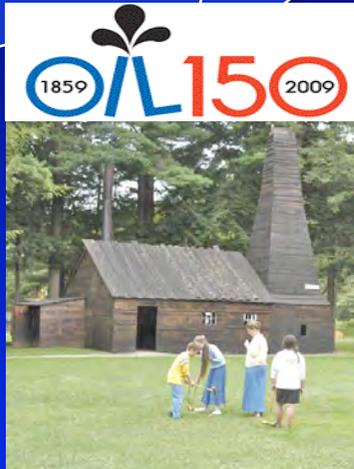


Réserves=Incertitudes Géologiques, Technologiques et Géopolitiques

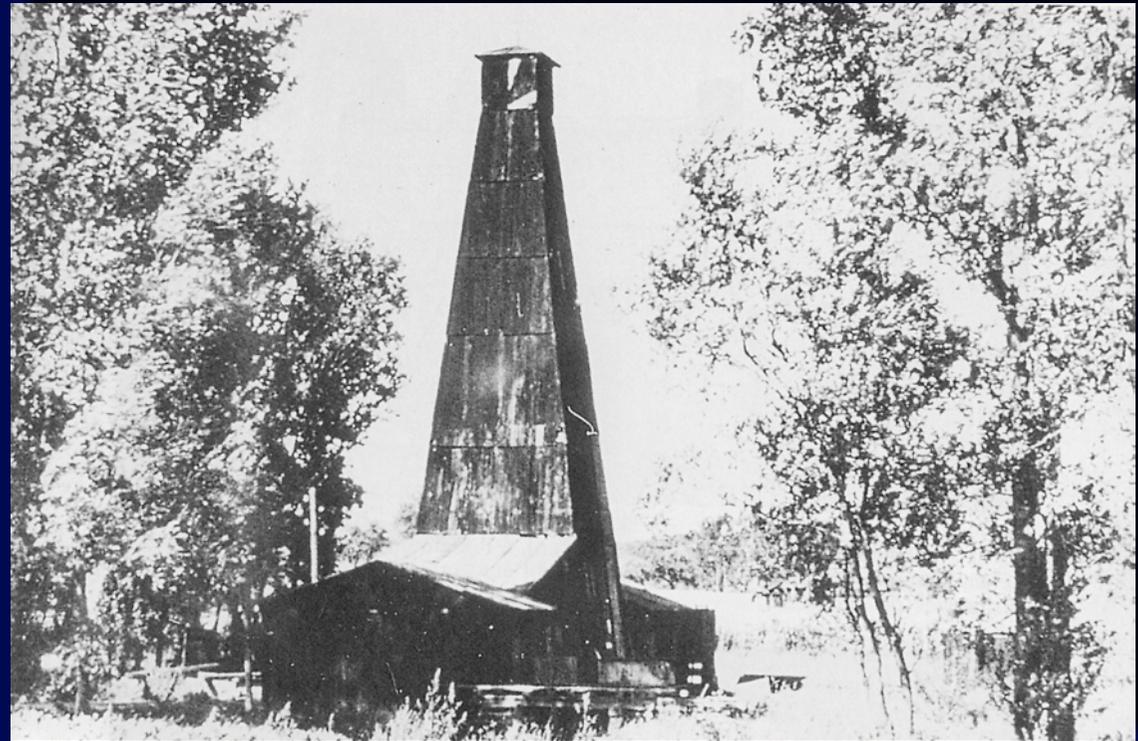
Réserves = Incertitudes Géologiques...

**Reproduction d'une gravure représentant le forage
du 'colonel' Drake à Oil Creek, 28/08/1859**

28-08-1859



*mort pauvre en 1880 après
avoir spéculé sur le marché pétrolier...*



**Venue d'huile de très bonne qualité à 70 pieds avec un
débit variant de 10 à 25 barils/jour (1,6 à 6,5 m³/j) et 300t en 1859**

...le 1er juin 1860: 19 puits sur Oil Creek + 8 sur deux autres sites et 25 000t en 1860

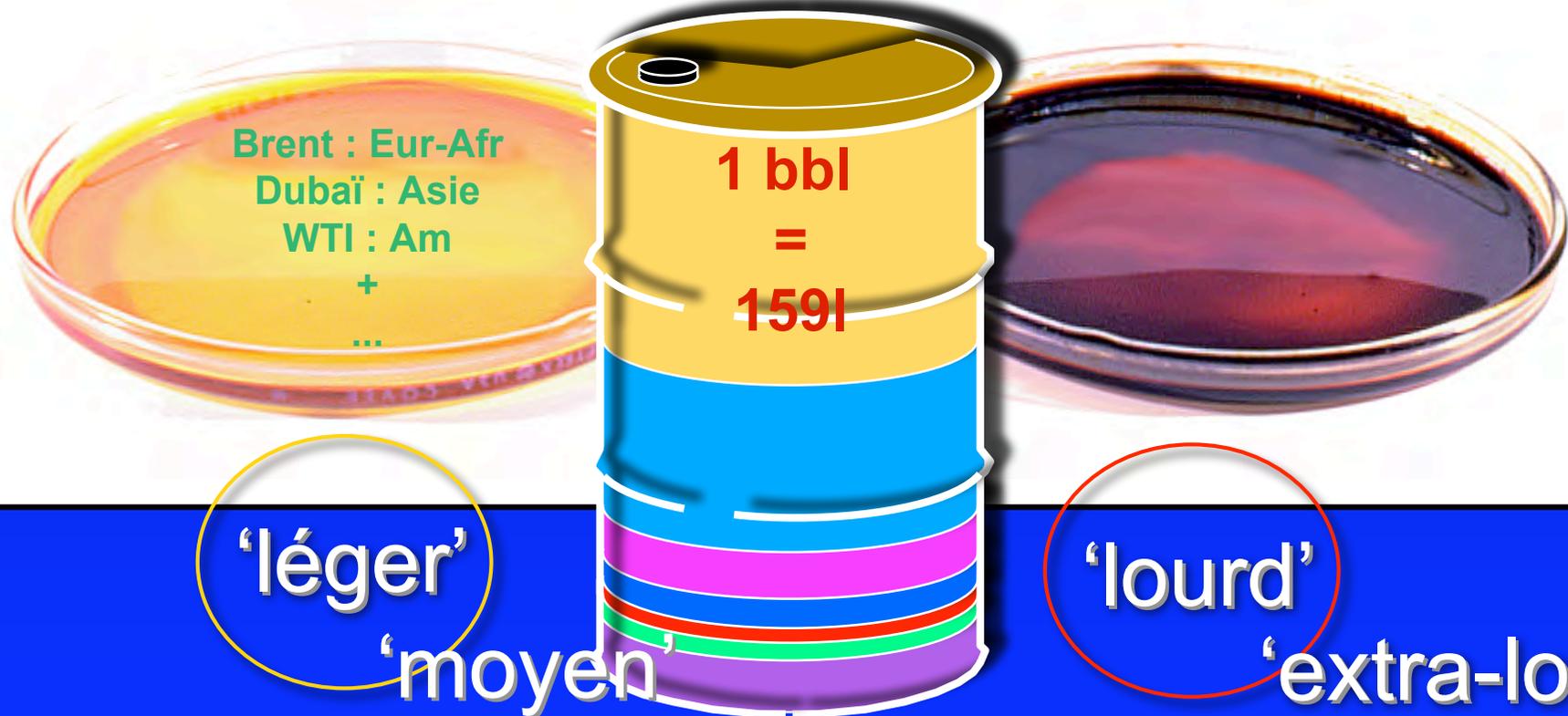
Le Brut - "L'Or Noir"

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



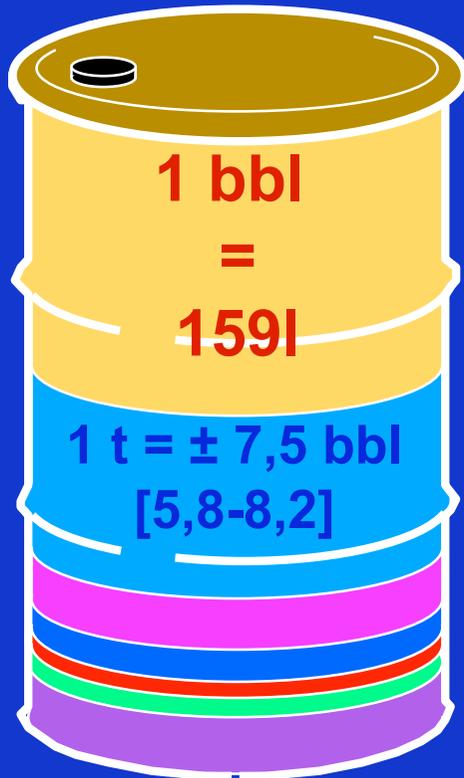
Light Texas Crude
Palo Pinto Field
North Texas

Heavy Texas Crude
Humble Oil Field
Southwest Texas



depuis
2006 - ±85 M bbl/j
(75 c + 10 GL et Tar sands)

= travail 22 G esclaves pdt 24h



2007 : 85,8 soit 1M bbl/j en PLUS
dont 0.7Asie (avec 0.3Chine)

2008: 87,8 M bbl/j jusque juillet 2008
(finalement 82,7)

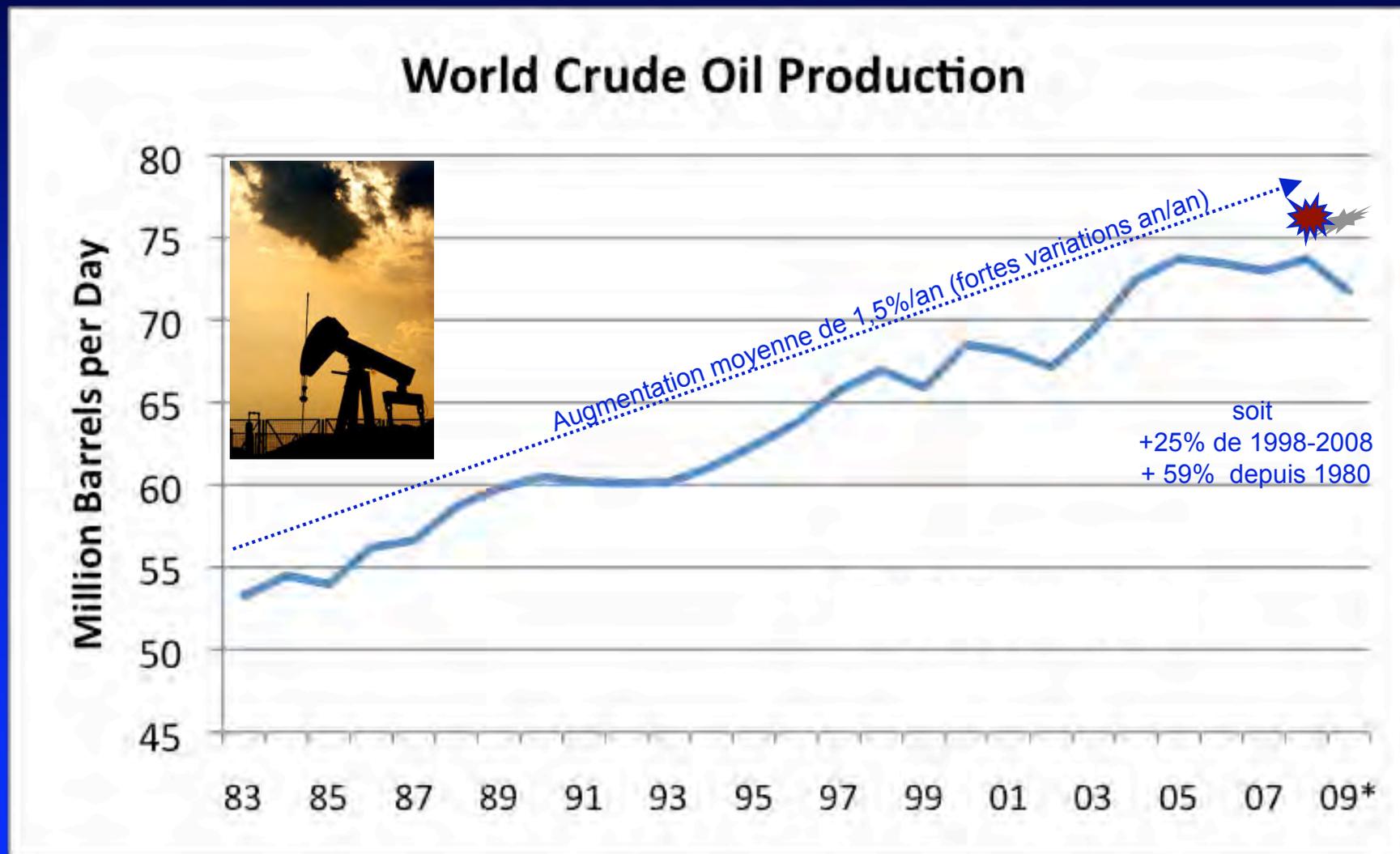


= 1000 bbl/sec



soit 5500/j
ou 550/conf

Sept-Oct 2009 : après une stagnation (crise 2008/09), la production augmente de 630 000 bbl/j donnant 85,6 Mbbbl/j (données IAE 2009) [72,5 crude oil ou brut + 8,2 NGLs +4,9 tar sands, oil shales , CTLs, biofuels....]. La production de brut n'a toujours pas atteint le record de Juillet 2008 [74,7 Mbbbl/d +NGLs + oil nc]



Z O X X E M C Q M E H O H C R B



M R T C O S +

> 1% sour crude
< 1% sweet

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

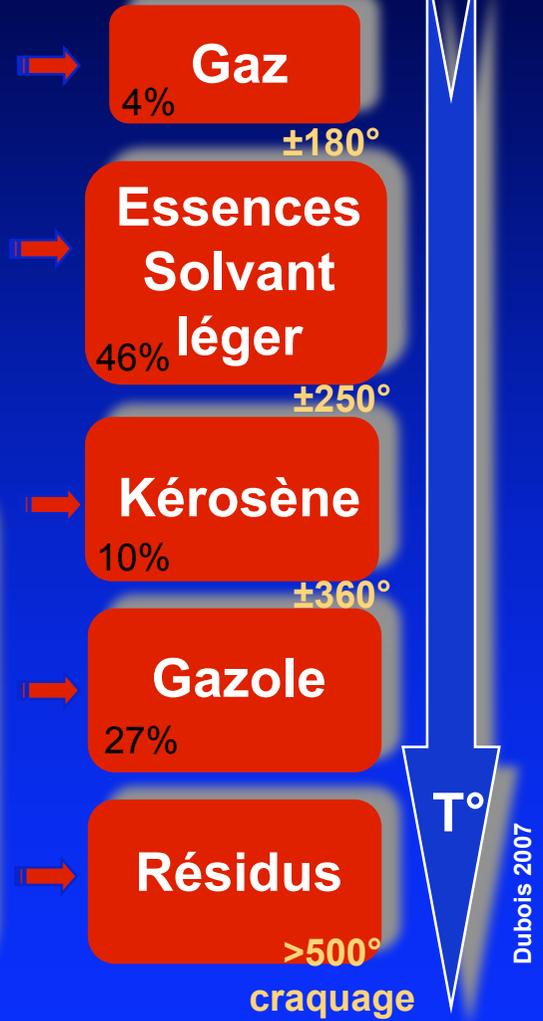


Pétrole brut

épuration

distillation

Sels (qq g à qq kg/tonne)
Soufre...
...



nb pétrochimie: 900 à 2000°C

Les Etats producteurs exportateurs ne raffinent que très peu

1. USA 20,1% mondial soit ±850 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: 0,8% >< 4,4%
 ==> ouragan Katrina ...

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

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 G\$(+ prix du Fe)
- goulets d'étranglements transport maritime ('accident', crises...) = détroit Ormuz etc.

Incertitudes Géopolitiques

RAFFINAGE

Usa96%, Monde92% [2006]

TRANSPORT MARITIME

- 7200 supertankers sous pavillons de complaisance



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

Incertitudes

SARAH...ATIONA

HYDROCARBURES

Bitumes

du latin bitus

ou Confusions

= bois résineux

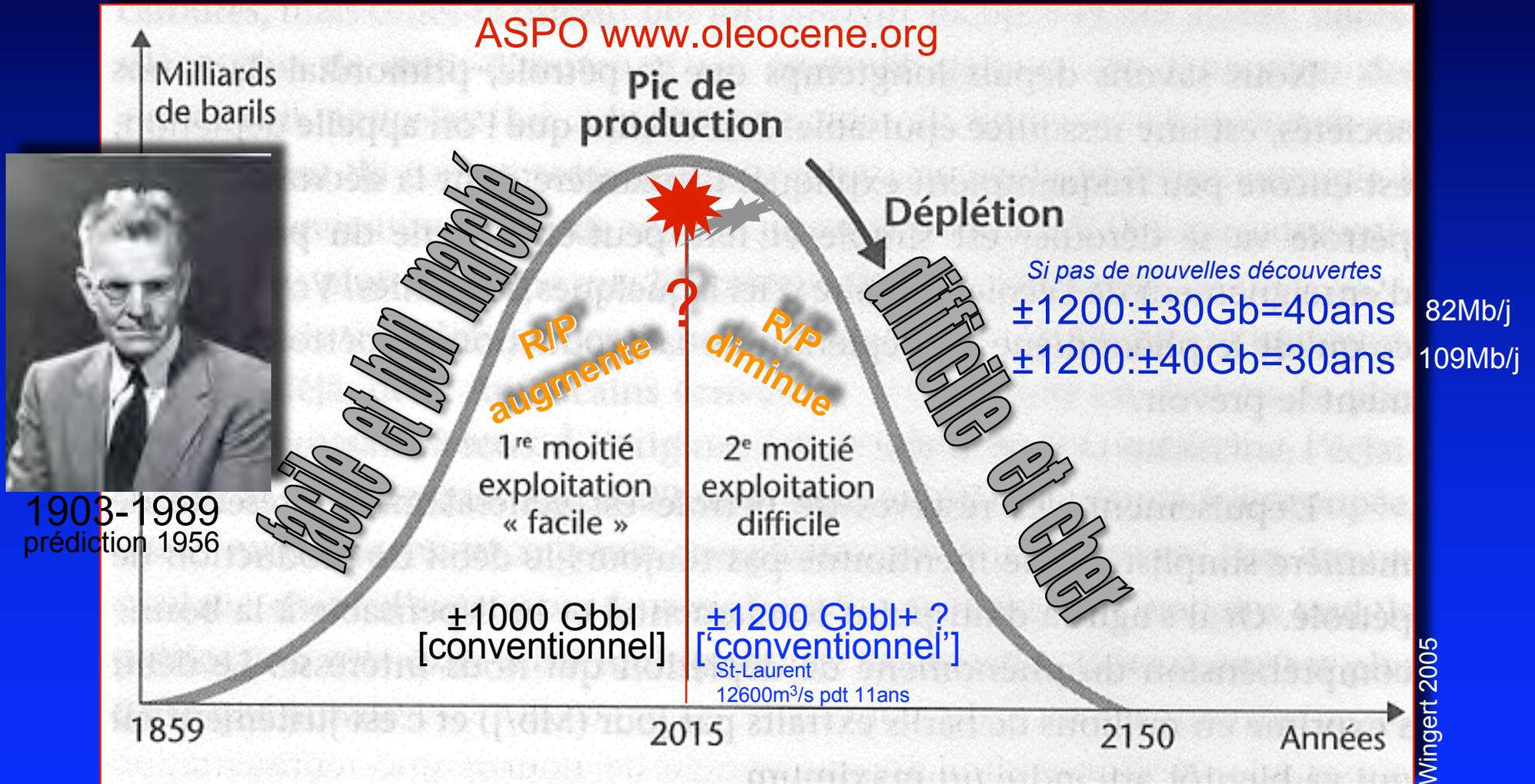
Les bitumes ne sont pas des 'sables bitumineux'!

Les bitumes sont produits par raffinage du pétrole, ce sont donc des **RESIDUS** du **RAFFINAGE**

... ne pas confondre avec

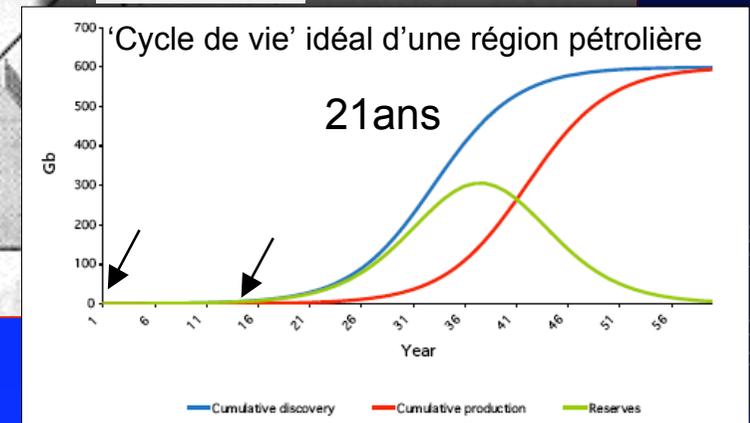
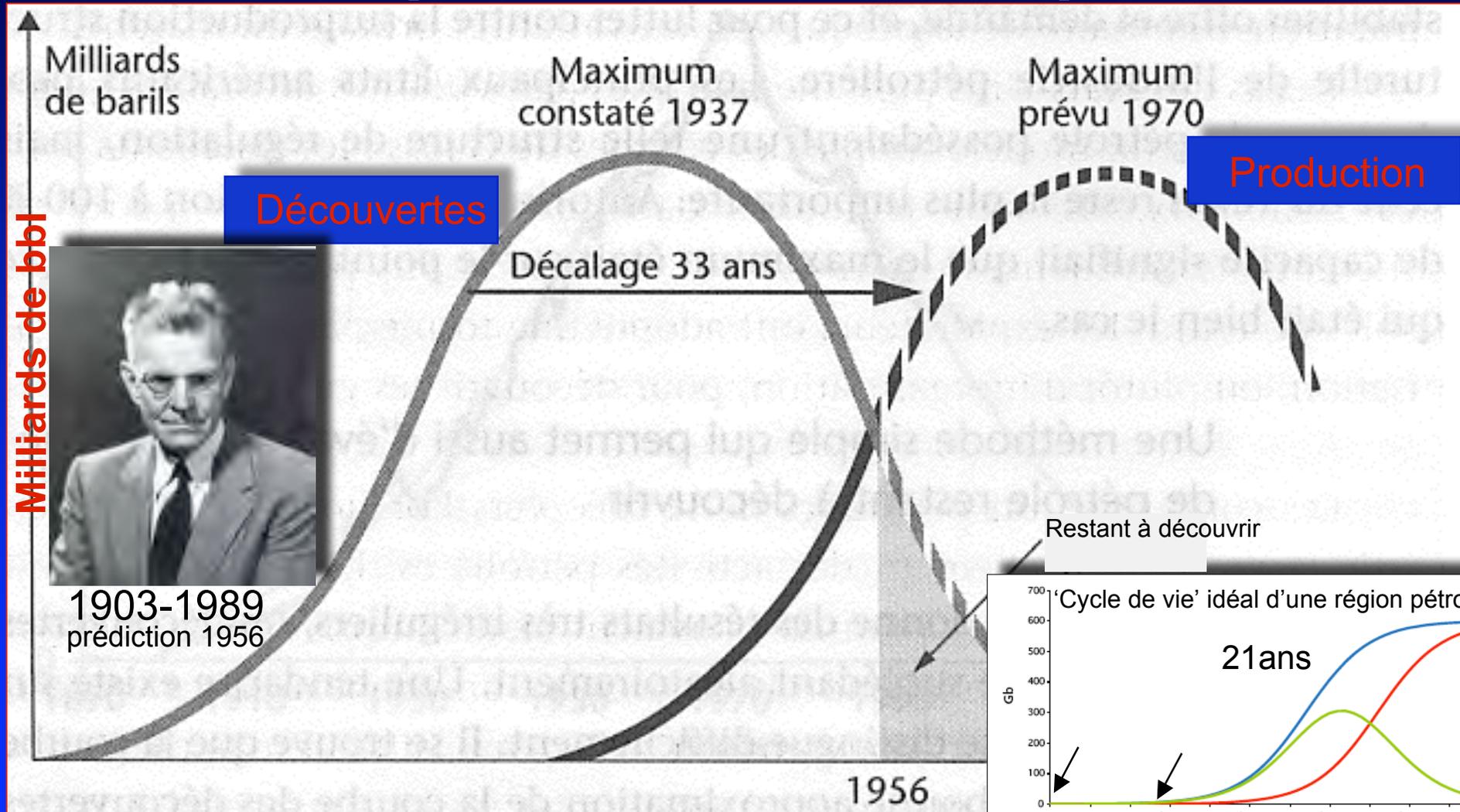
- **les schistes bitumineux ou 'oil shales, bituminous shales'**
[Wyoming, Colorado -USA, Orénoque -Brésil]
[= pétrole 'jeune' -il n'y a pas de bitume!, ni tjrs de schiste!!]
- **les sables asphaltiques ou huiles extra-lourdes [Venezuela] et les sables bitumineux ou 'tar sands' [rivière Athabasca, Canada]
[= oxydation bactérienne] et consistance 'Nutella!'...**

COURBE DE HUBBERT: CAS SIMPLIFIE DE LA COURBE DE PRODUCTION MONDIALE DE PETROLE c

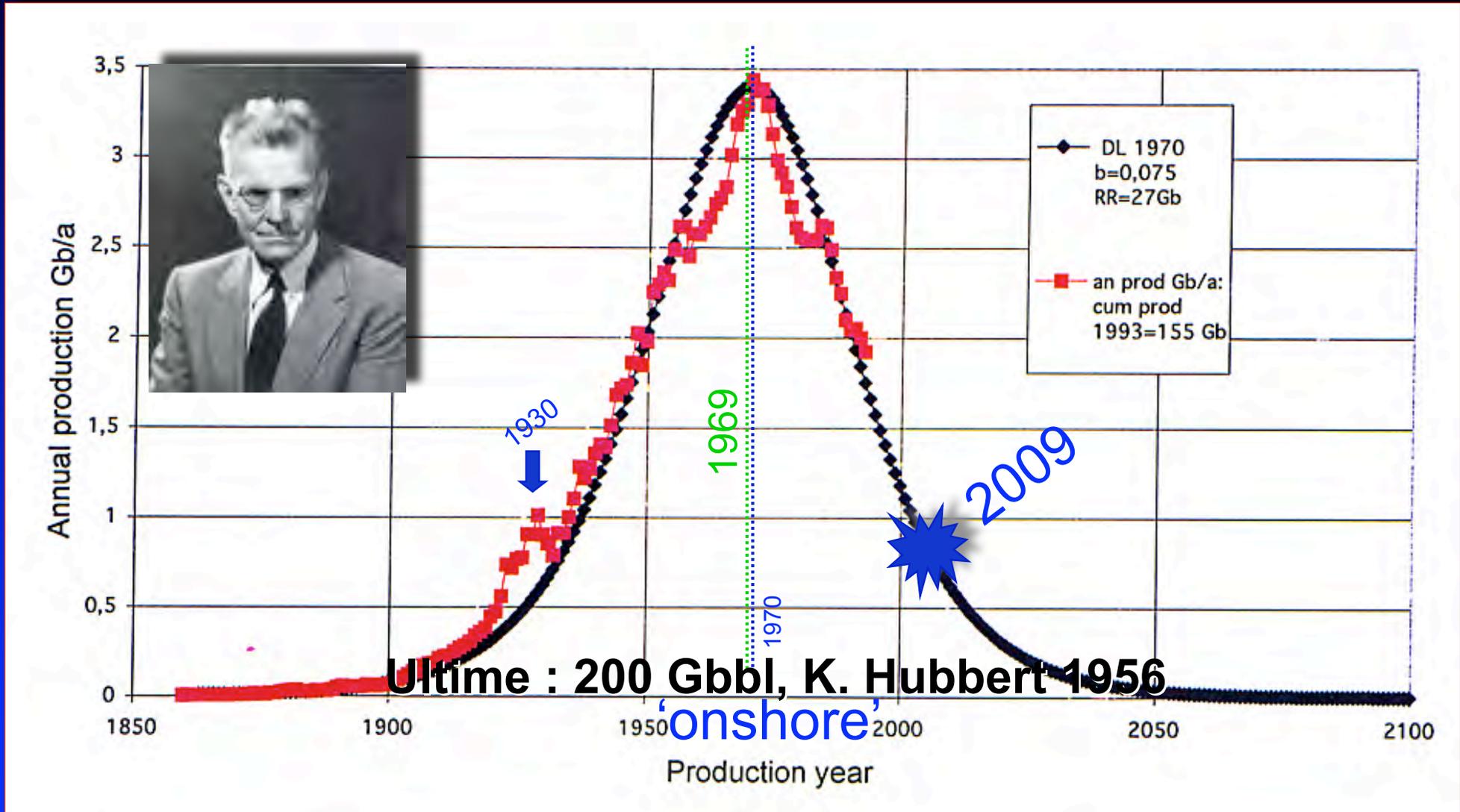


Réserves disponibles au terme d'une année (Gt, Gbbl...)
Production au cours de cette année (même unité)

PRINCIPE DE LA THEORIE DES COURBES DE HUBBERT POUR LES ETATS-UNIS [48 ETATS] [Données simplifiées à l'extrême]

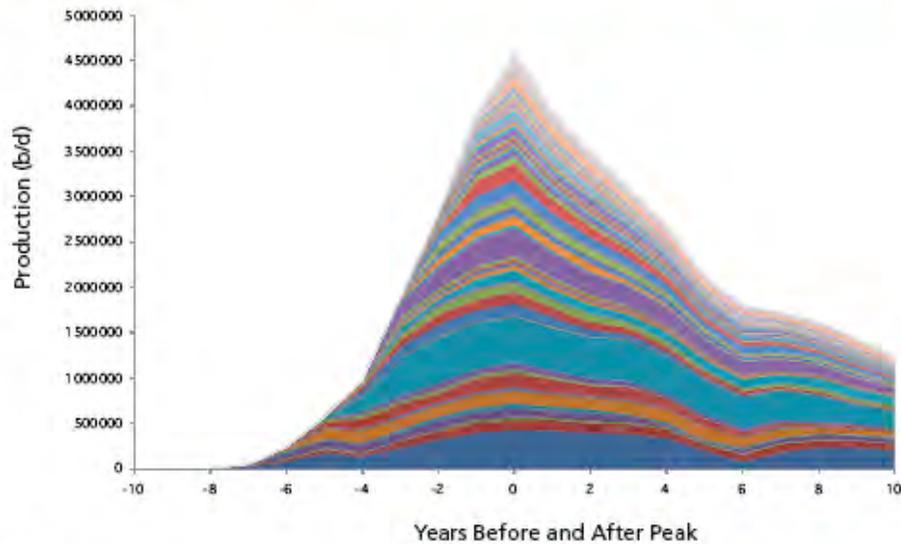


48 Etats US: Courbe de Hubbert (en 'cloche'), modèle de déplétion

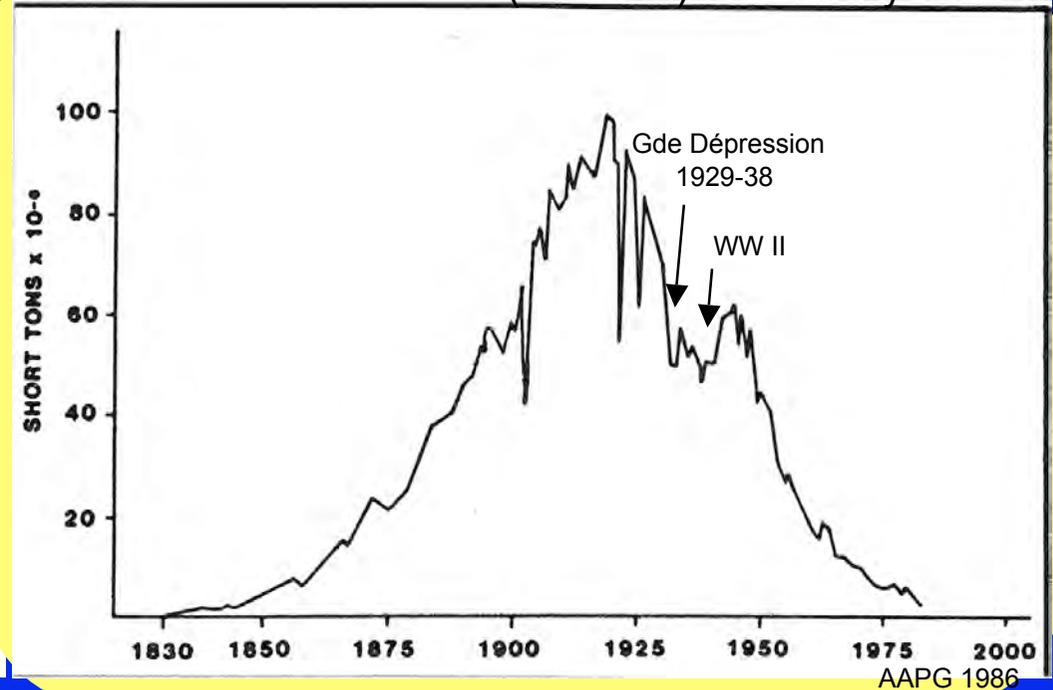


Nb pic des découvertes USA: 1930' => bbl = 4 cents < eau potable

Production des champs UK, offshore, pic = 1997



Production d'antracite (charbon) en Pennsylvanie



Déclin global des champs (échelle mondiale): $\pm 4\%$ par an (récupération primaire) = perte de 3Mb/j

Récupération primaire moyenne: 34% + 5% (II, III) ==> 50% en 2030?

En période post-pic, le déclin est de 6,5% par an et sera de 8,5% à partir de 2030 (IEA 2008)

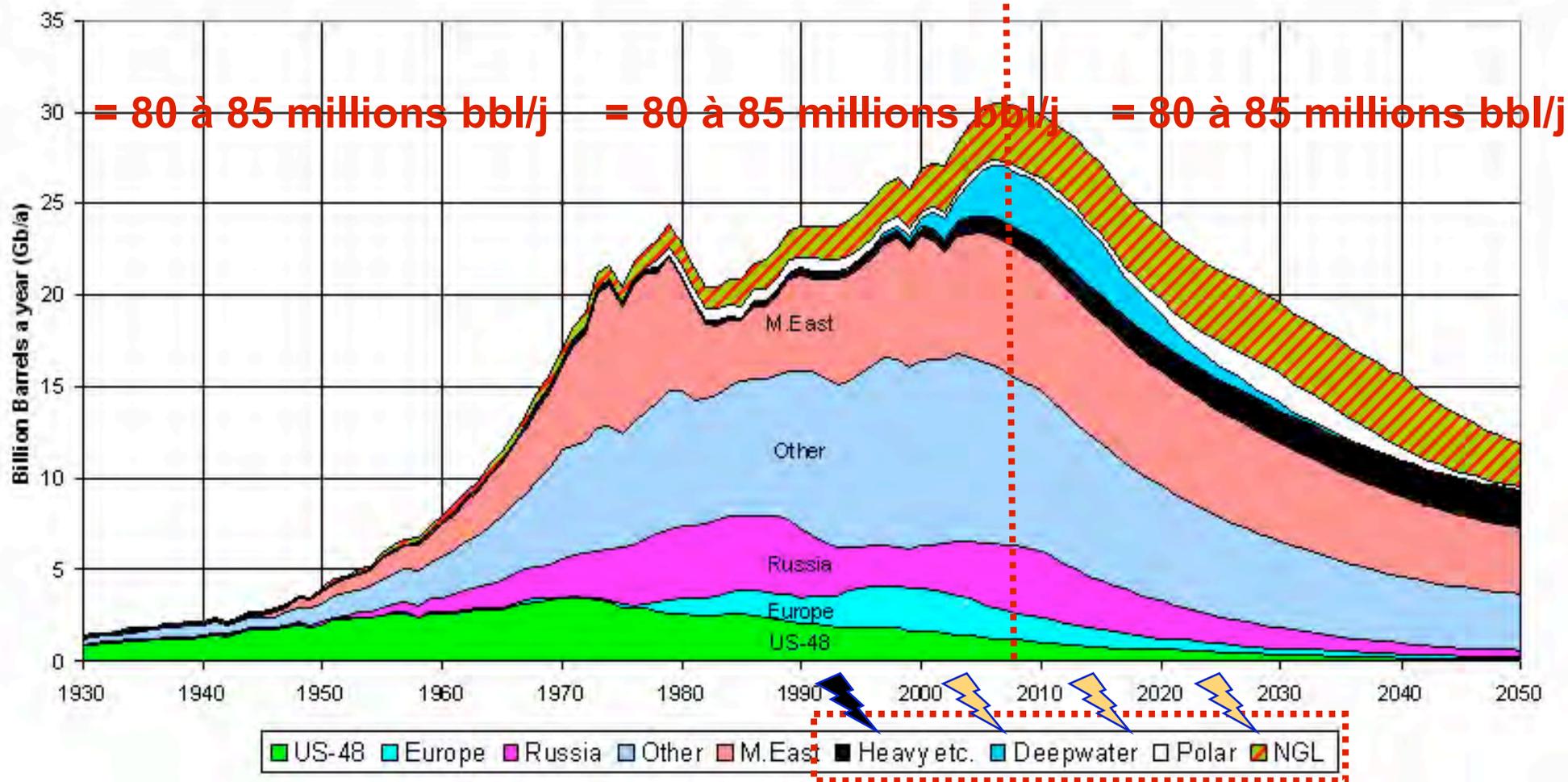
ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc

<http://www.peakoil.net/>
OIL AND GAS LIQUIDS

2004 Scenario

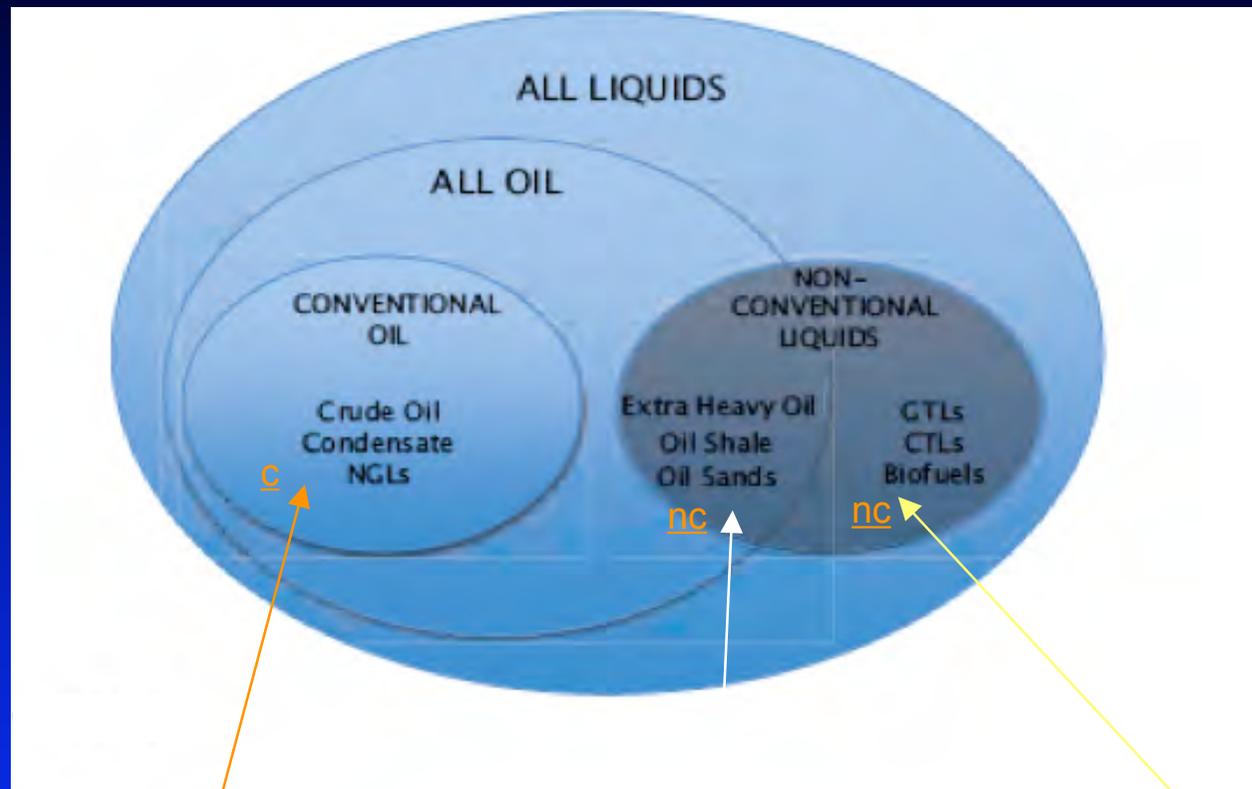
IEA 2008 prévoit 104 Mb/J en 2030...

38Gb



Nb NGL = Gaz Naturel Liquéfié [-160°C pour le méthane] 'Revaporisation': 1m³ = 600 m³

ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc



IAE 2008

Crude Oil : brut (mélanges HC)

Condensate : huile très légère (C_5) se condensant à partir de gaz naturels (p, T surface)

NGLs : HC légers liquides associés au gaz naturel (méthane-éthane, propane, butane)

Extra Heavy Oil : brut avec un $d^\circ \text{API} < 10^\circ$ (gravité): très visqueux, injection vapeur

Oil Shales : schistes bitumineux (kérogène), doivent être pyrolysés ($>400^\circ\text{C}$)

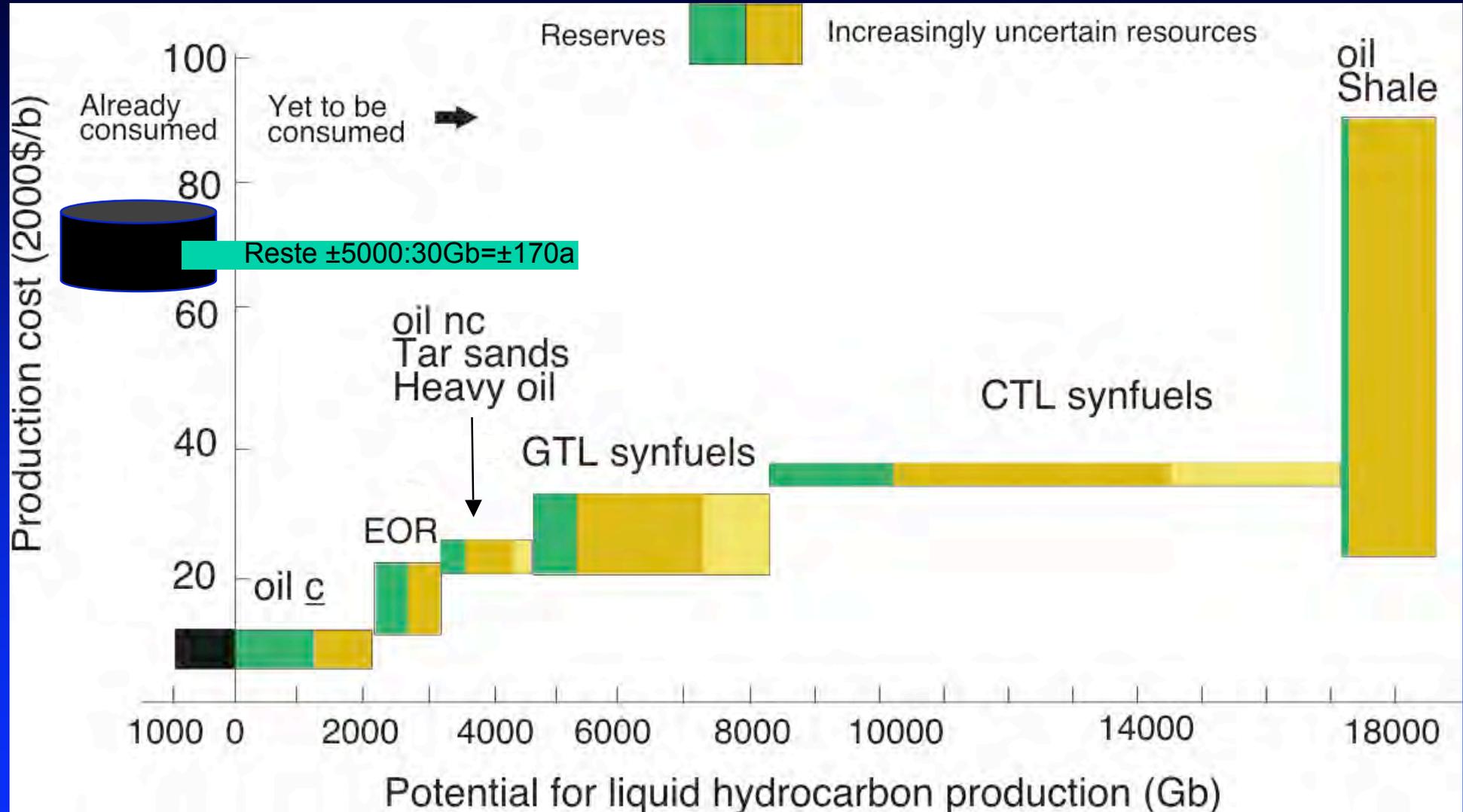
Oil Sands: grès imprégnés d'huile extra-lourde ou lourde, 'mining' et procédés = syncrude

CTLs : fuel synthétique liquide obtenu par gazéification du charbon suivi par procédé Fischer-Tropsch

GTLs : fuel synthétique liquide obtenu par liquéfaction du méthane (Fischer-Tropsch, 1923)

Biofuels : fuels synthétiques obtenus par la biomasse (bio-éthanol, bio-diesel)

ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc

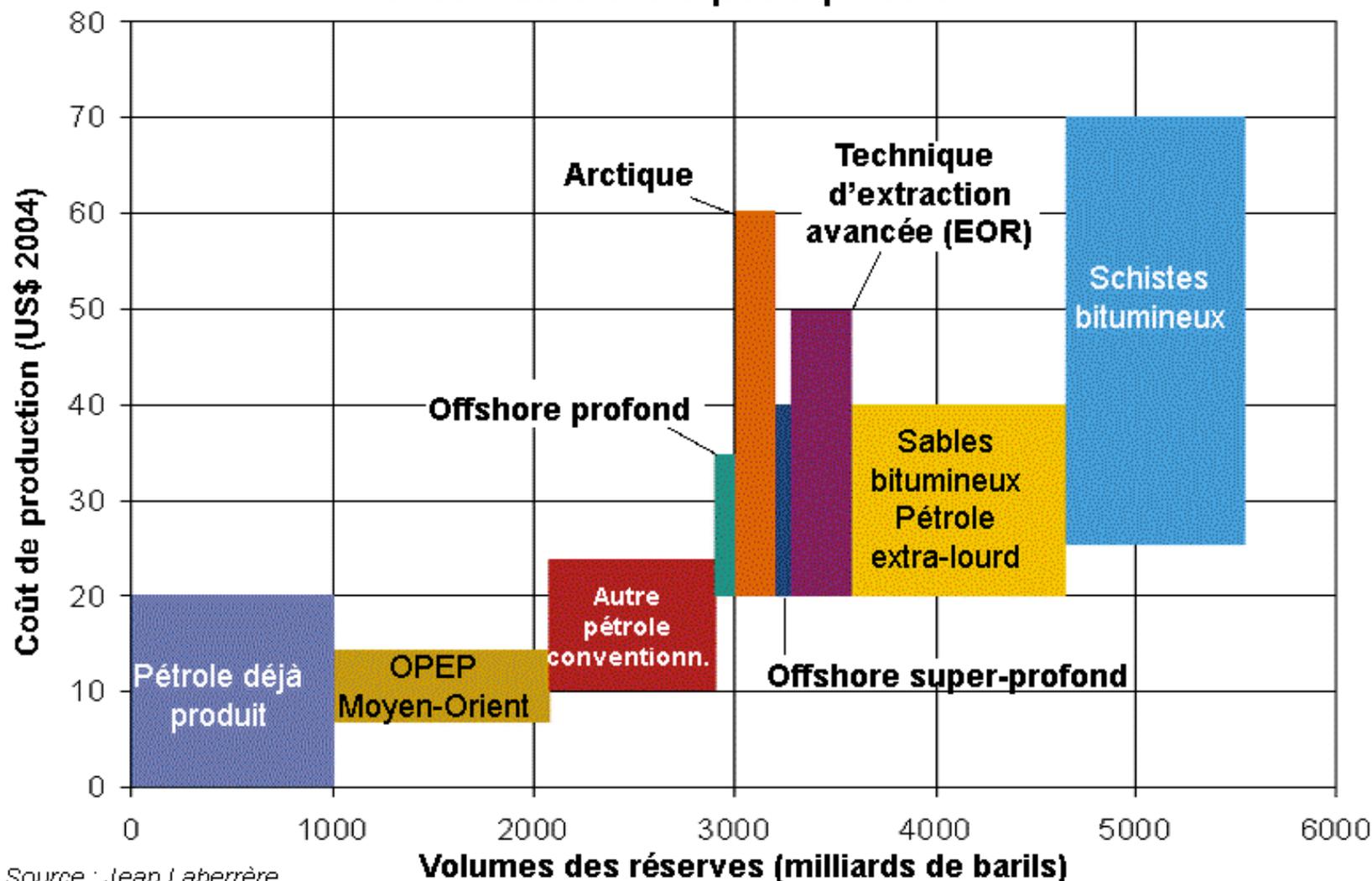


Farell and Brandt 2006

- . No clathrates (no reliable data)
- . GTL and CTL = maxima (no other purposes for gas and coal)

ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc

EIA (2005) : d'énormes réserves de pétrole sont disponibles à des coûts économiques supérieurs



Source : Jean Laherrère

différent de ressources!
Ici = ± ultimate recoverable resources

ex:

pétrole
lourd ou
sables
bitumineux
du Canada
= 1750 Gbbl
dont aujourd'hui
10% = réserves

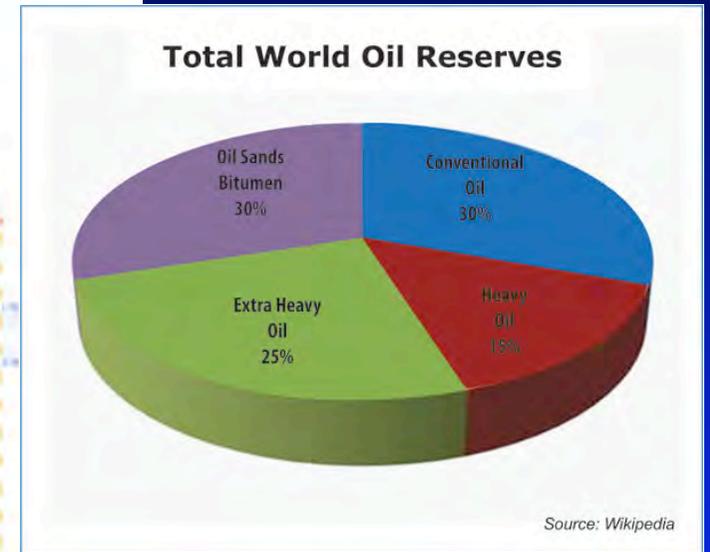
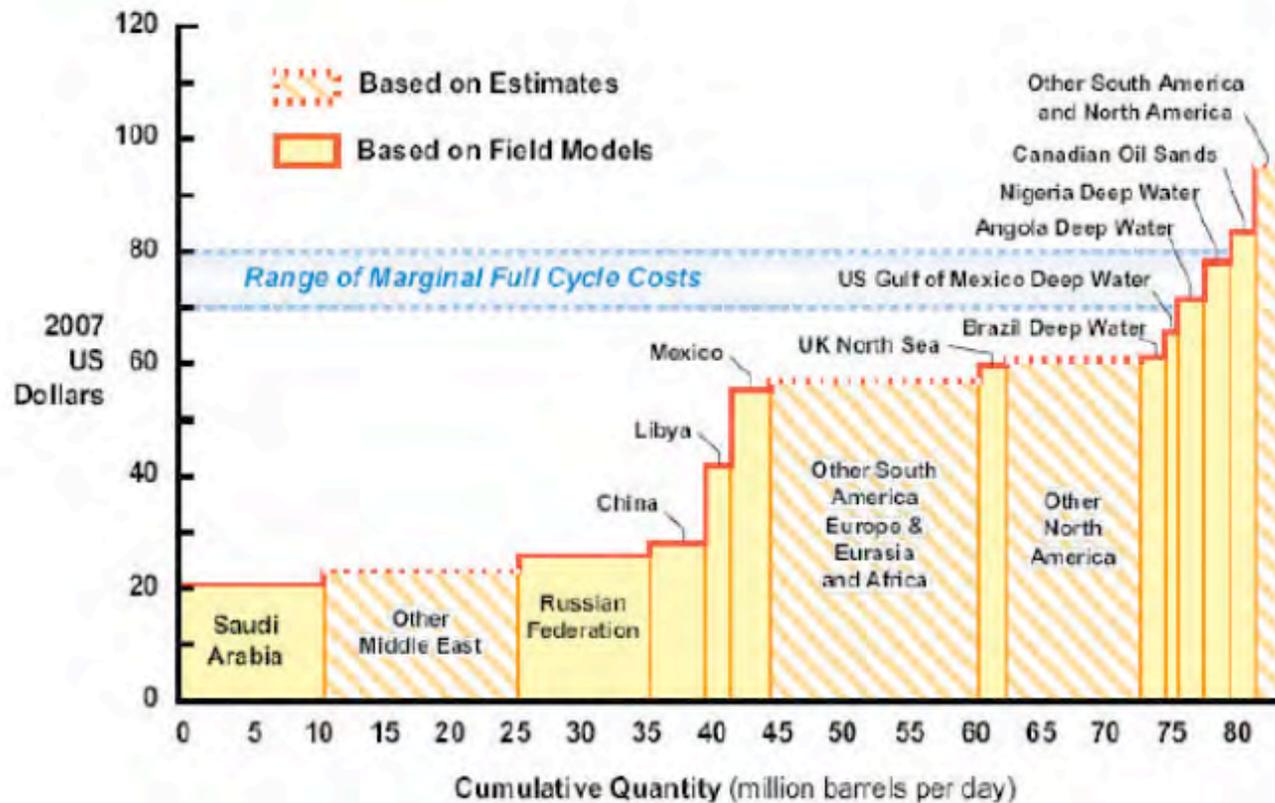
1,8 Gb déjà
produits en 2007

déjà exploités
en 1930'

ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc

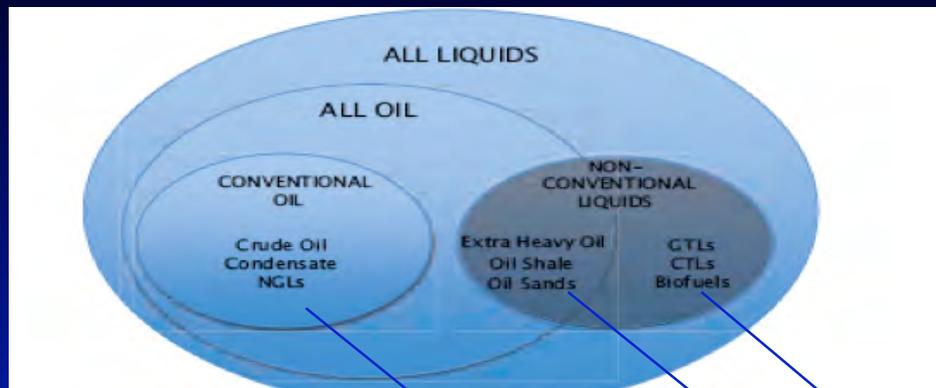
Oil Supply Costs

Horizon Oil



Source: Cambridge Economic Research Associates "Ratcheting Down: Oil and the Global Credit Crisis" October 2008

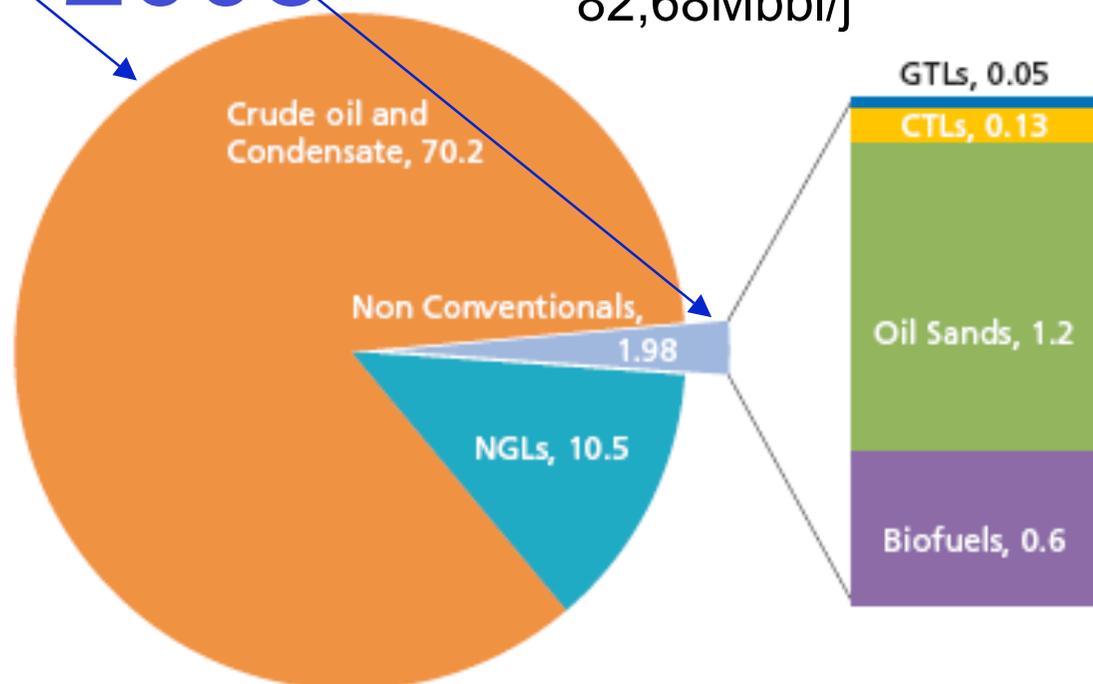
ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc



SC
nc
C

2008

82,68Mbbbl/j

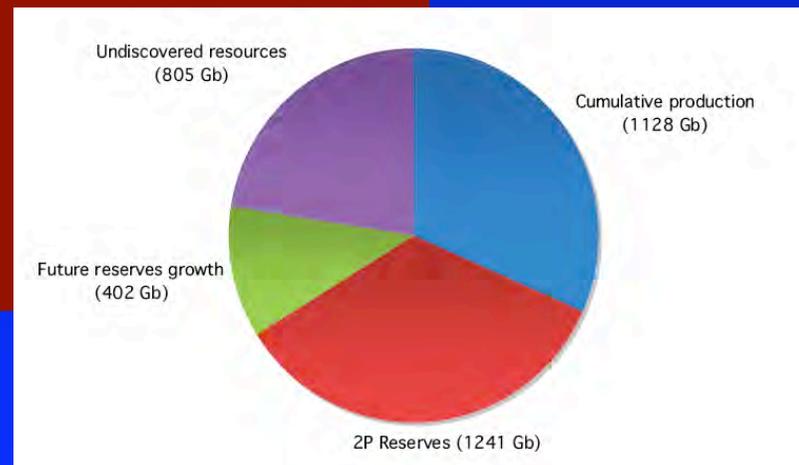
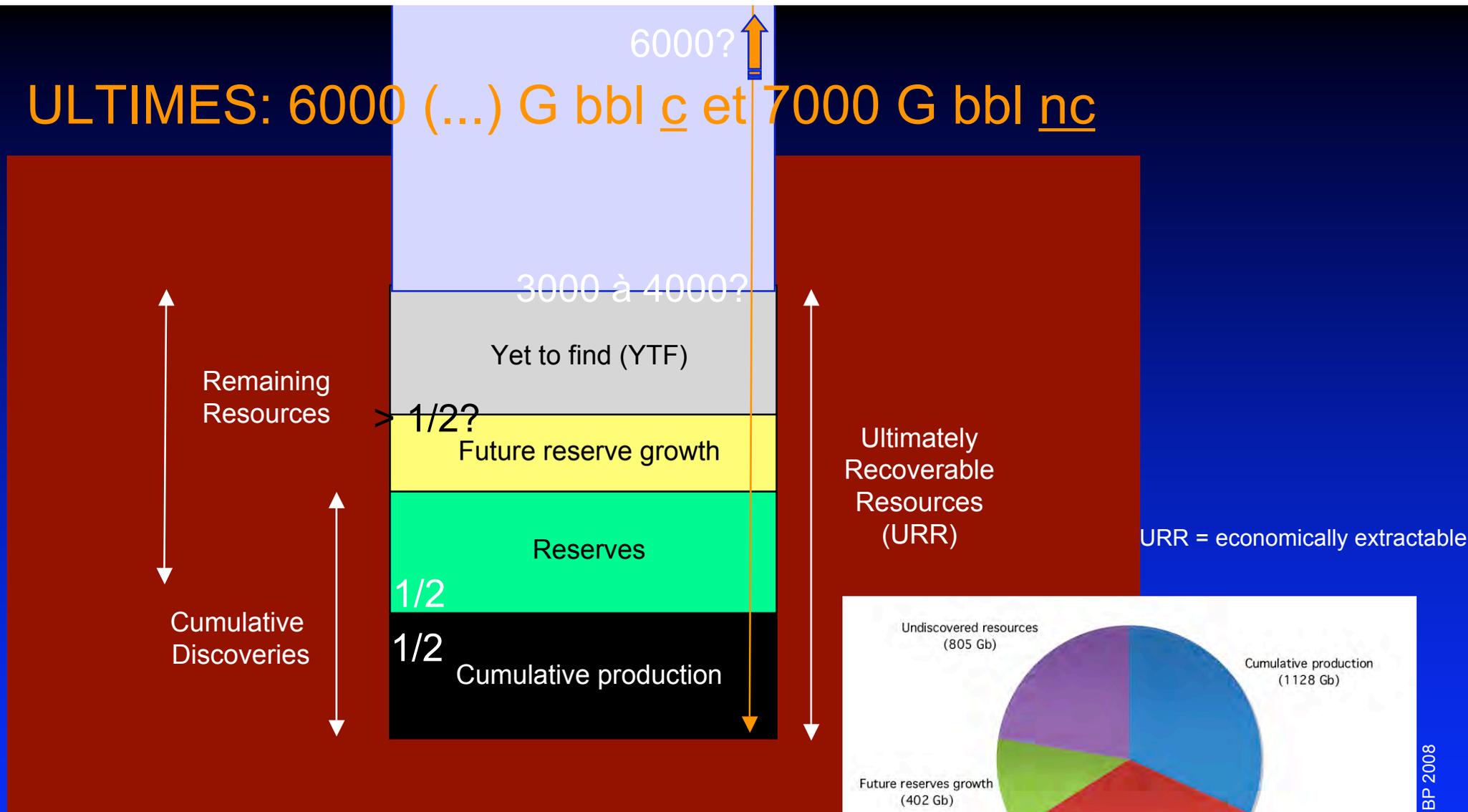


IAE 2008

Source: IEA (2008)

Production 'fuels liquides' 2008: une année de rupture
(nb -3% CO₂! au lieu de +3% en 'temps normal')

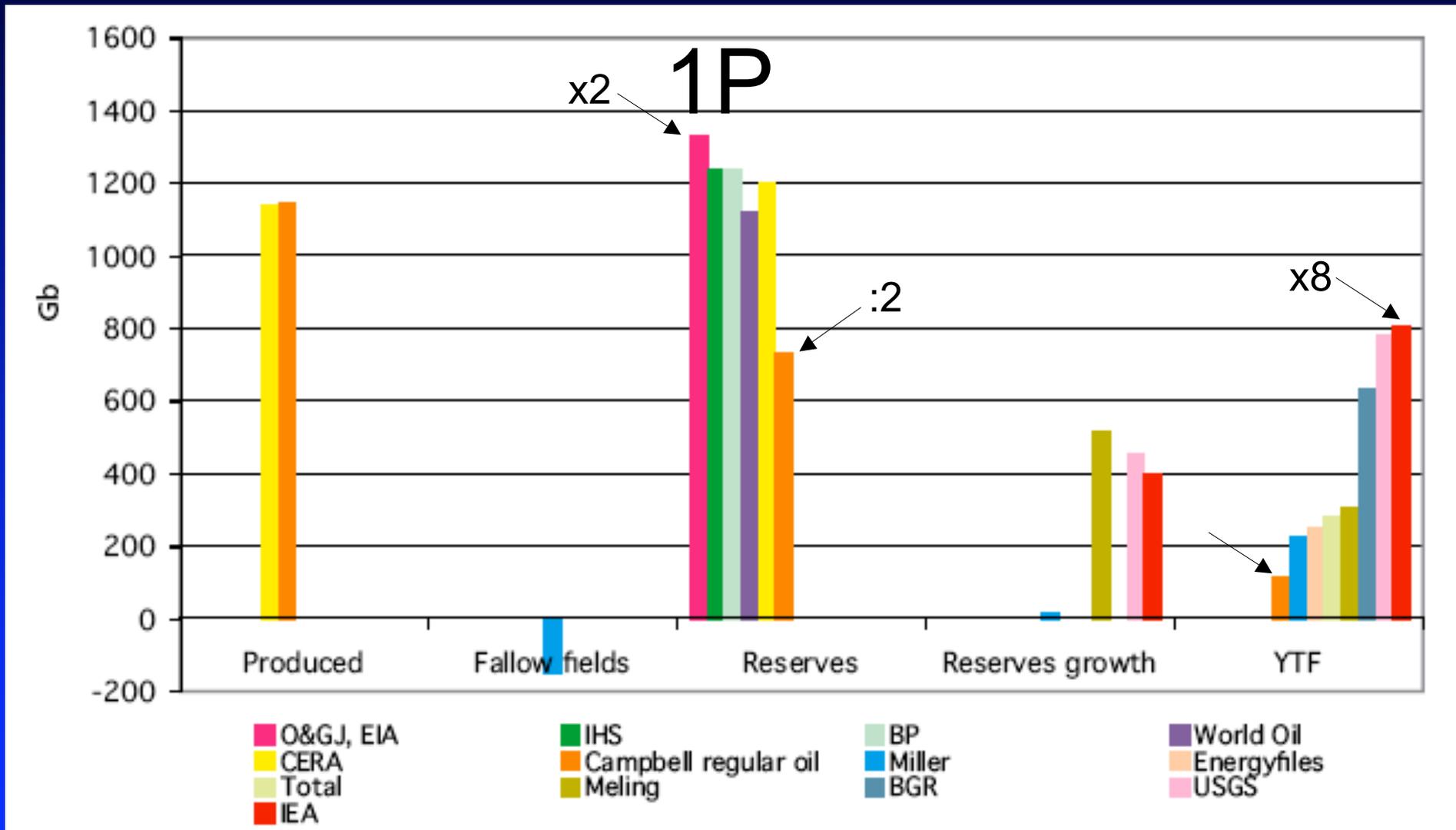
ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc

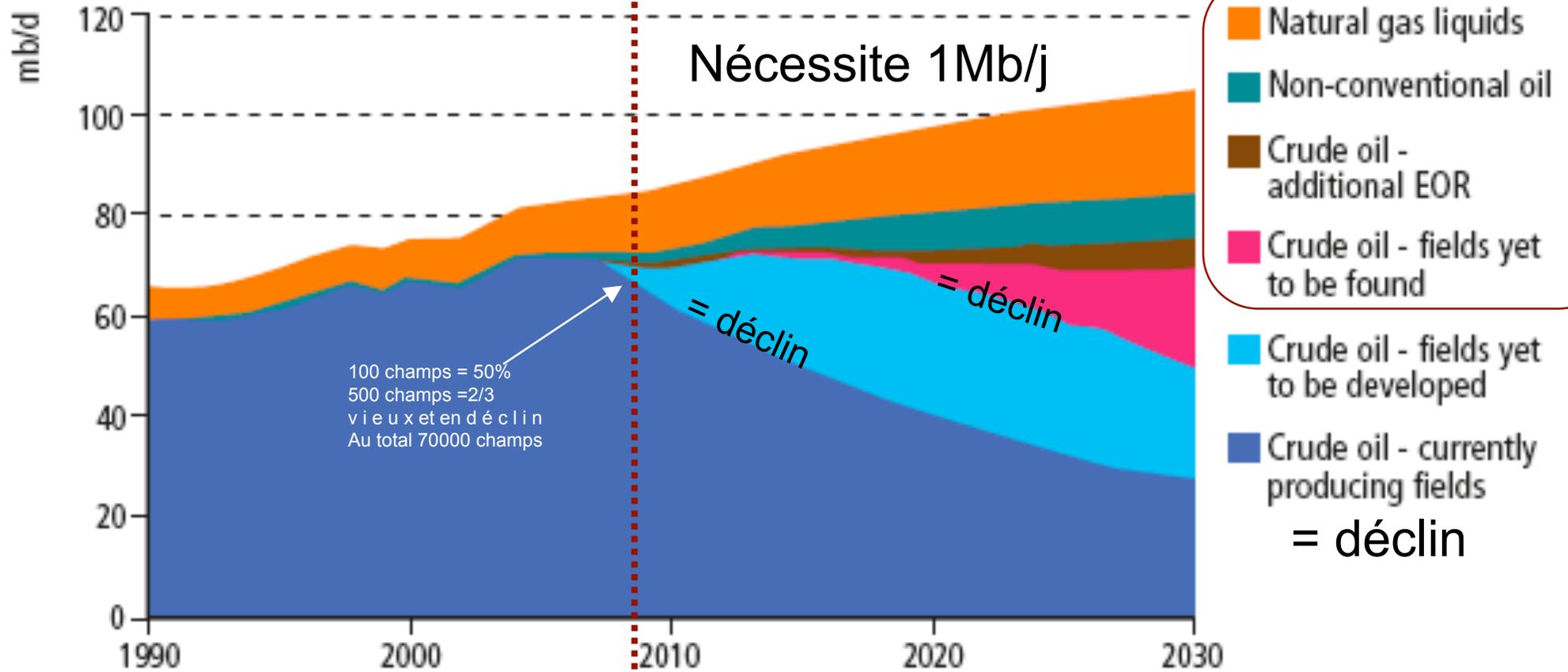


2009 : URR oil c 2000-4300 Gb (2-4X cumulated prod up to 2007)
 Remaining recoverable resources oil c : 870-3170 Gb
 (Max = 4Xmin)

RECOVERABLE OIL c

(IEA, 2008, UK Energy Centre 2009)





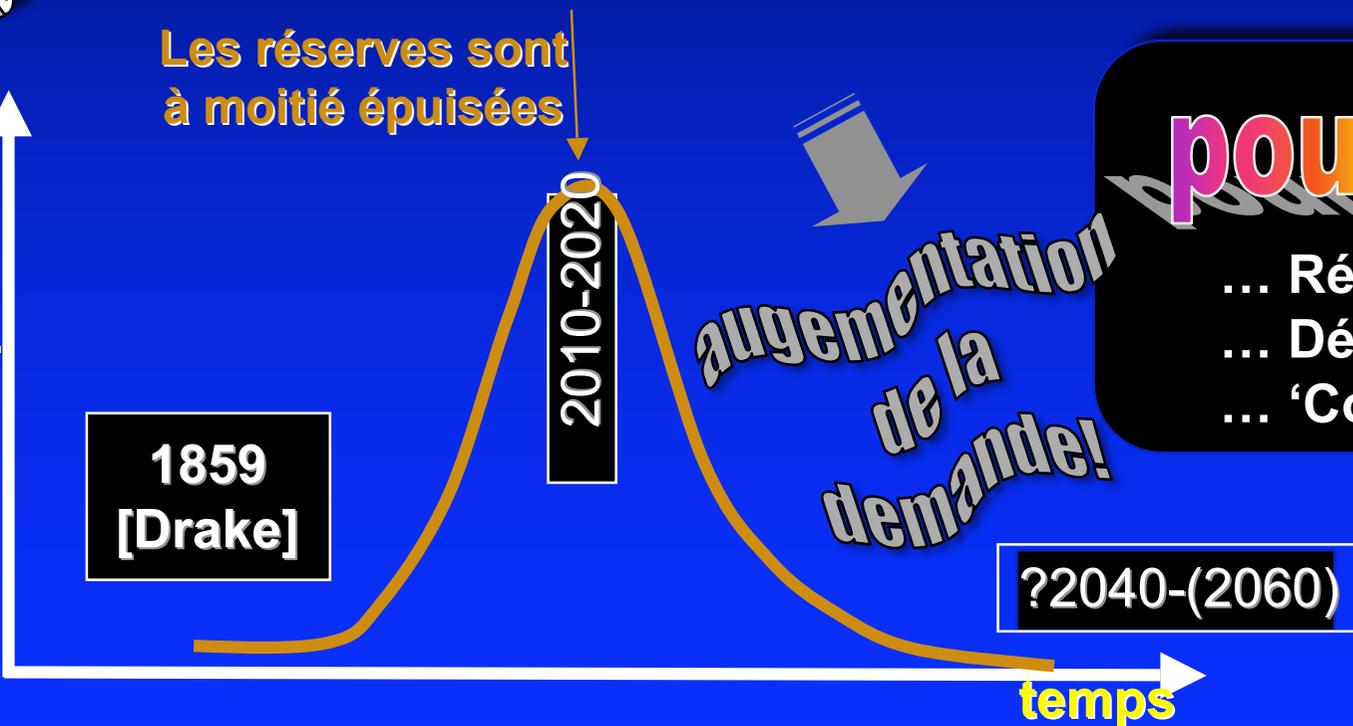
ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc

avec ?280 Gt ou ± 2100 Gbbl [Rés P] LE MAXIMUM DE PRODUCTION SERAIT ATTEINT VERS 2010-2020...?



Le pétrole 'bon marché' est fini
Le monde sera **ENCORE** plus dépendant
des pays producteurs du Moyen-Orient

Production par année



Les réserves sont à moitié épuisées

pourquoi?

- ... Réserves
- ... Débits
- ... 'Cost Oil'



Fin
de l'exploitation ?

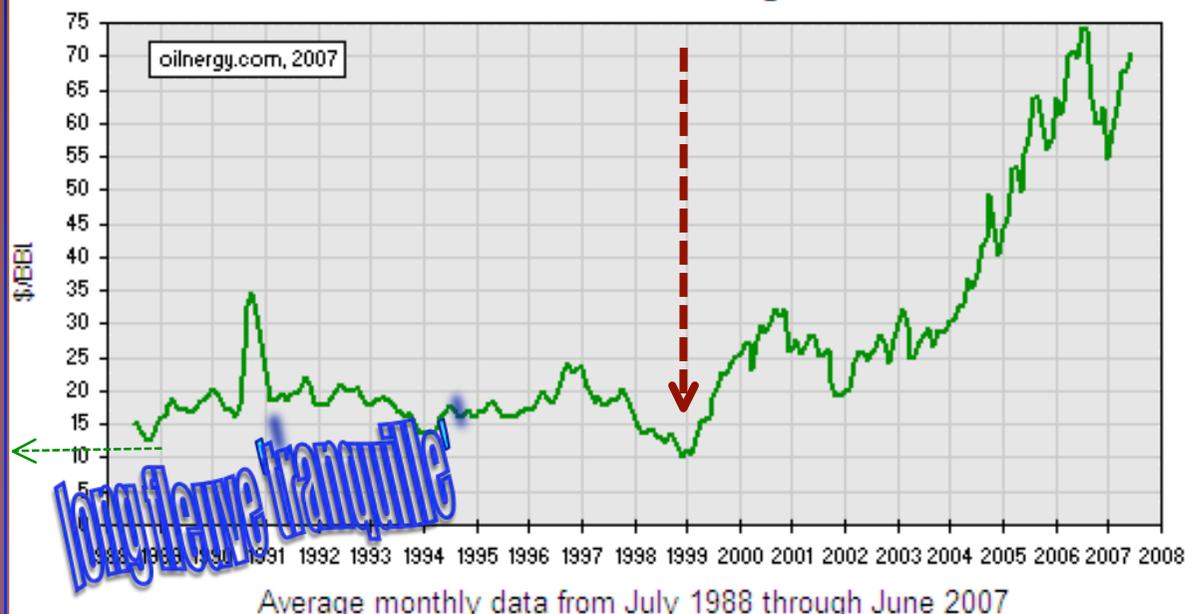
'dernière goutte' 2150...

ULTIMES: 6000 (...) G bbl c et 7000 G bbl nc

avec ?280 Gt ou ± 2100 Gbbl [Rés 1-2-3P] LE MAXIMUM DE PRODUCTION SERAIT ATTEINT VERS 2010-2020...?

Le pétrole 'bon marché' est fini
Le monde sera **ENCORE** plus dépendant
des pays producteurs du Moyen-Orient

ICE Brent Crude Oil Closing Price (begin July 1988)



Nb de 1859 à fin XX^e s. : hausse de production moyenne annuelle = 2%
Nb Coût du bbl en 1930 (pic découvertes onshore USA = 4 cents < eau potable)

Mais d'où VIENT LE PETROLE?

MATIERE ORGANIQUE

Protéines

Carbo-hydrates

Lipides

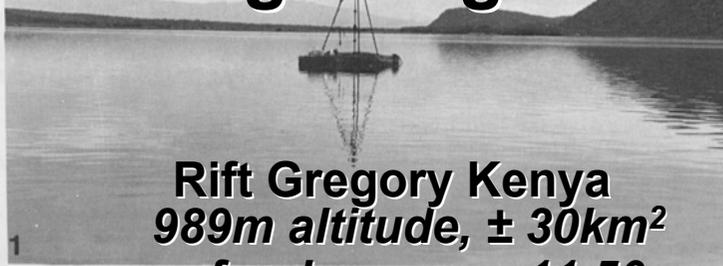
....

- 
- + membranes
 - + cuticules
 - + pigments
 - + graisse
 - + sucres
 - + ...

**C'est la majeure partie des constituants organiques [jusqu'à 70%]
susceptibles de se transformer en pétrole
Ils sont abondants dans les ALGUES, et spécialement les
BOTRYOCOCCACEES et les DIATOMEES [phytoplancton, 2µ-1mm]**

*Certaines diatomées excrètent des gouttelettes d'huile pour
augmenter leur flottabilité! Elles contiennent jusqu'à 70% de lipides (poids sec)*

L'hémi-graben de Baringo-Bogoria



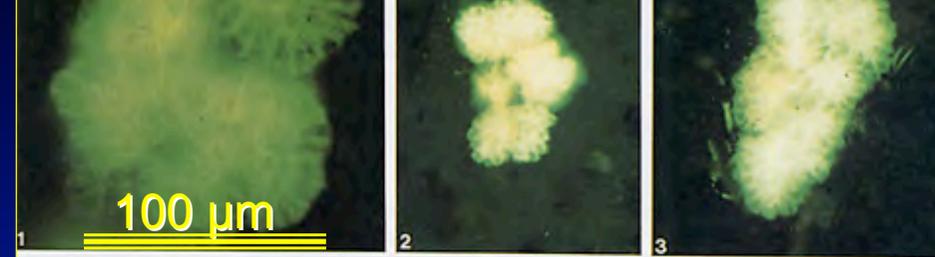
Rift Gregory Kenya
989m altitude, ± 30km²
profondeur max: 11,50m



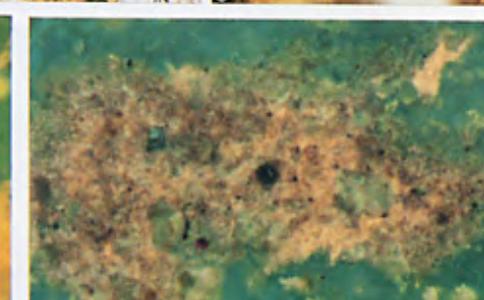
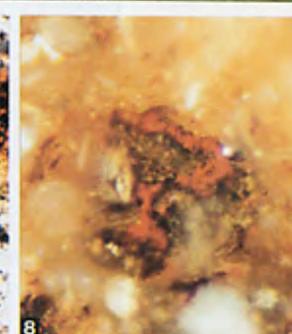
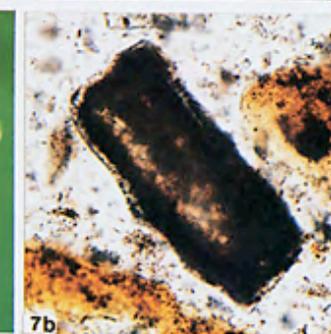
430 000 d'histoire sédimentaire
Carottages de 0 à 16 m
[entamés en 1977...]



1-3 Algues *Botryococcus* (fluorescence)
= Chlorophycées



4-6 Algues Zygnématales (fluorescence)
= Algue verte?



Tiercein et al., 1987

+ Diatomées

Finalelement la biomasse est composée d'un petit nombre de grands groupes d'organismes

Les planctons marin et lacustre = Algues microscopiques avec 50% protéines, 25% carbohydrates, 5% lipides

[les Diatomées sont beaucoup plus riches en lipides]

Les bactéries = surtout 'eau' + protéines, et jusqu'à 10% de lipides formant les HC C_{10} à C_{30}

Les plantes supérieures terrestres = 30 à 50% cellulose, et 15 à 25% de lignine avec pour certaines de très abondants lipides

La matière organique issue du plancton, des algues et des bactéries, sédimente sur place ou sur la même verticale = AUTOCHTONE

La matière organique issue des plantes est amenée dans les bassins de sédimentation (vent, fleuves..) = ALLOCHTONE

**D
E
V
E
N
I
R**

C-H-O-N

C-H

de la MO?

C

100%

<
0,1%

MATIERE ORGANIQUE

préservation = milieux de dépôt

KEROGENE

macromolécules carbonées résultant de la transformation MO par microbes anaérobies

transformation = 'cuisson'

HYDROCARBURES

enfouissement excessif = 'carbonisation'

...METAMORPHISME

'Oil / Window' 'Oil / Window'



Les combustibles fossiles sont le résultat d'une minuscule 'épargne' de MO à partir d'immenses cycles (...)



HC

= 10.000 milliards de tonnes de carbone fossile

accumulée en ± 500 Ma, soit 20.000 t/an
qui échapperaient aux cycles de la Vie

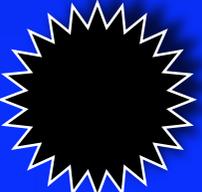
[sur les 5.500 milliards disponibles, soit $0,5 \cdot 10^{-6}$ /an]



O₂

POURQUOI SI PEU?

car l'oxygène est presque partout et les micro-organismes aérobies biodégradent la matière organique morte [si pas d'O₂ libre, les bactéries 'anaérobies' vont le chercher dans les SO₄, NO₃....]



**quand l'oxygène libre et combiné sont épuisés,
LA CONSERVATION DE LA M.O. DEVIENT INFINIE!**

pour former une roche-mère il faut conserver la matière organique

PAS EVIDENT ...

à la mort des organismes **99,9%** du C est recyclé dans la chaîne alimentaire

il reste **0,1%** qui s'échappe
et est piégé dans les sols et les sédiments

...et pour qu'une roche (ancien sédiment) devienne une roche-mère
elle doit contenir au minimum **2%** de matière organique

**en moyenne
sédiments << 0.5% M.O.**

**roches-mères
2-10% ou >**

POUR CELA IL Y A TROIS POSSIBILITES... 1, 2, 3



OU CELA A T'IL LIEU? = dans des milieux très confinés
où l'oxygène de l'air n'a pas accès...
sédiments fins et compacts des fonds de mer ou de lacs

1. Embouchure fleuve tropical, delta....

Deltas du Niger, du Mississippi, du Gange, de Mahakam...



2. Zones d'upwelling

Pérou (cf pêche vs EU), SO Afrique (Angola), Baie de Walvis, Côtes du Chili et de Californie...

Il se forme un sédiment très riche contenant 4 à 7% de matière organique.



3. Anaérobioses

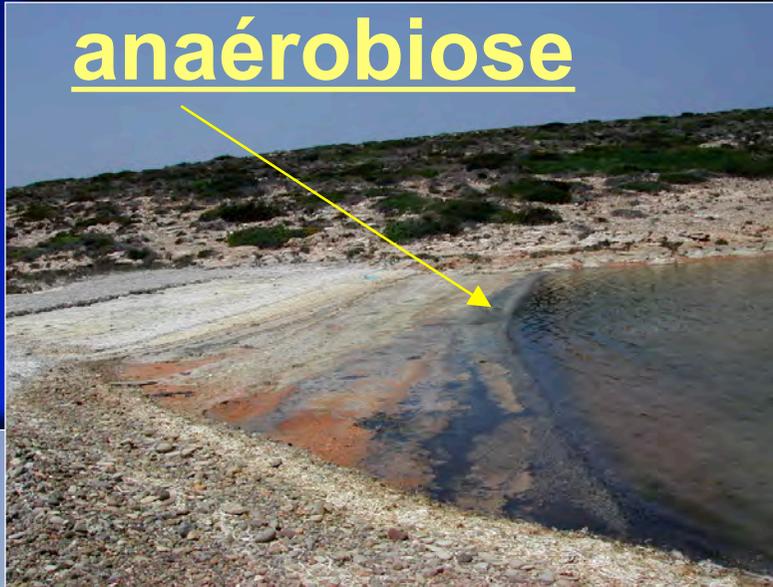
Mer Noire, Mer Baltique, Caspienne, Golfe de Californie, Lagune de Maracaibo...

Ex: Mer Noire >3% MO et >0,2g C/m²/j

HERBIERS à POSIDONIES

Cyclades, Grèce, 2003

anaérobiose



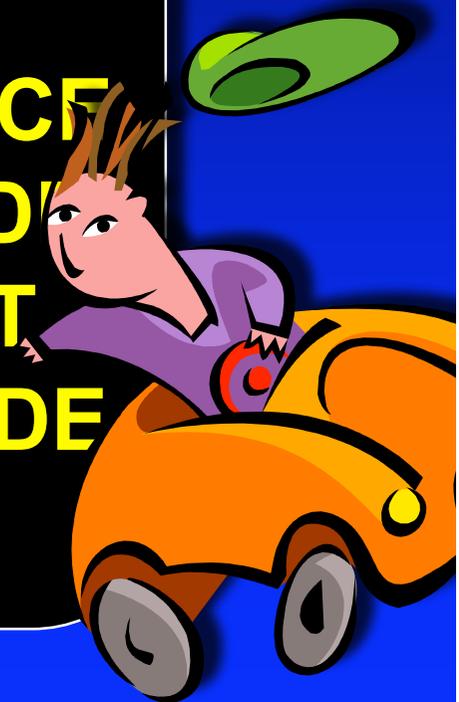
Il faut à la nature un min. de 1 à 2 Ma pour former 1 l de pétrole et au minimum 10 Ma pour constituer un GISEMENT

sédiment réduit

RENDEMENT

un chiffre méconnu ...

**POUR OBTENIR UN LITRE D'ESSENCE
IL AURA FALLU QUE 23 TONNES DE
MATIERES ORGANIQUES SOIENT
TRANSFORMEES SUR UNE PERIODE
D'AU MOINS 1 MA**



MASON B Oct. 2003, Nature, Plant-to-oil Equation Point Up Unsustainable Profligacy