

L'ERE DU PETROLE POUR COMBIEN DE TEMPS ENCORE?

Jette
le 27 novembre 2008

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



LES ENJEUX D'ÉNERGIE

- **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!, $1\text{cm}^3 = 19\text{g } U^{235} = 47,5 \text{ T charbon!}$

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

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

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

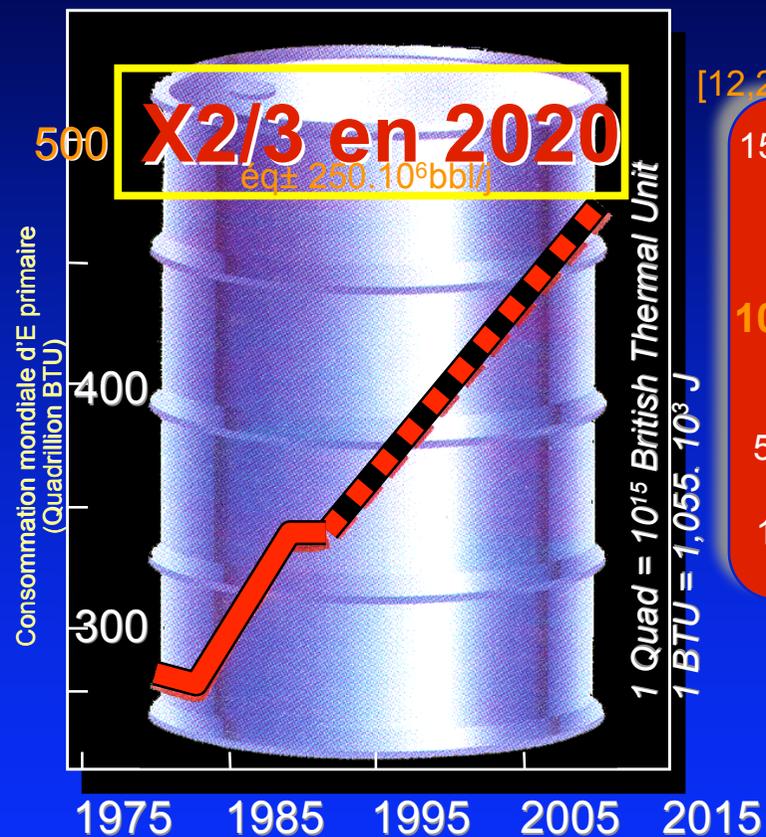
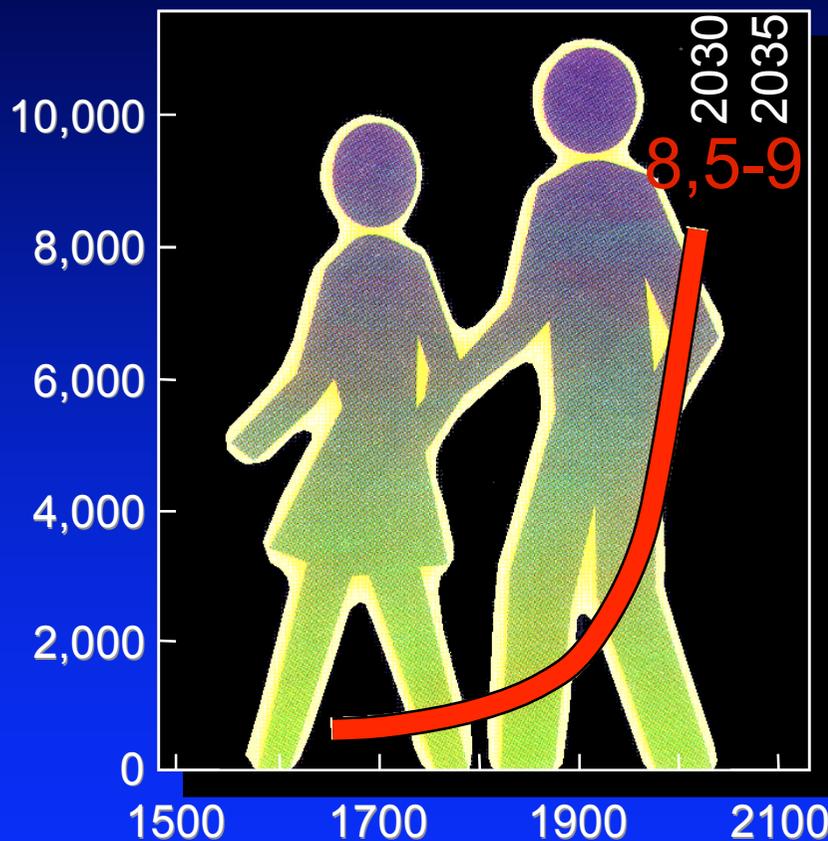
◇◇◇◇ **Biomasse** ◇◇◇◇◇ **Géothermie**

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

ou il déverse 15000X notre consommation mondiale à chaque instant

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

10,5Gtep-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

2005 (selon AIEA-2007)



ENERGIE PRIMAIRE
combustibles fossiles

80%

PRODUCTION ELECTRICITE
combustibles fossiles

65% [charbon 40%]

Hydraulique 16% Nucléaire 15%



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

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
1950 bbl

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

39 bbl



Source : Mineral Information Institute

...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 1200TW/24 = 50 ans, Gaz 1200TW/24 = 50 ans

Charbon 4800TW/24 = 200 ans

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

Nucléaire à neutrons rapides (U^{238} , Th^{232}) = 30 000TW/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...

Reeves, 2003



**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!**

?



?



PREAT A Uib, Jette-St-Pierre 11.2008



3à4 %

une alternative

RES SERIEUSE



= SOBRIETE

25 %

ou 1/4 production mondiale

En attendant = casse-tête énergétique

Population = Besoins en Energie

- Auj: nous consommons 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**

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*

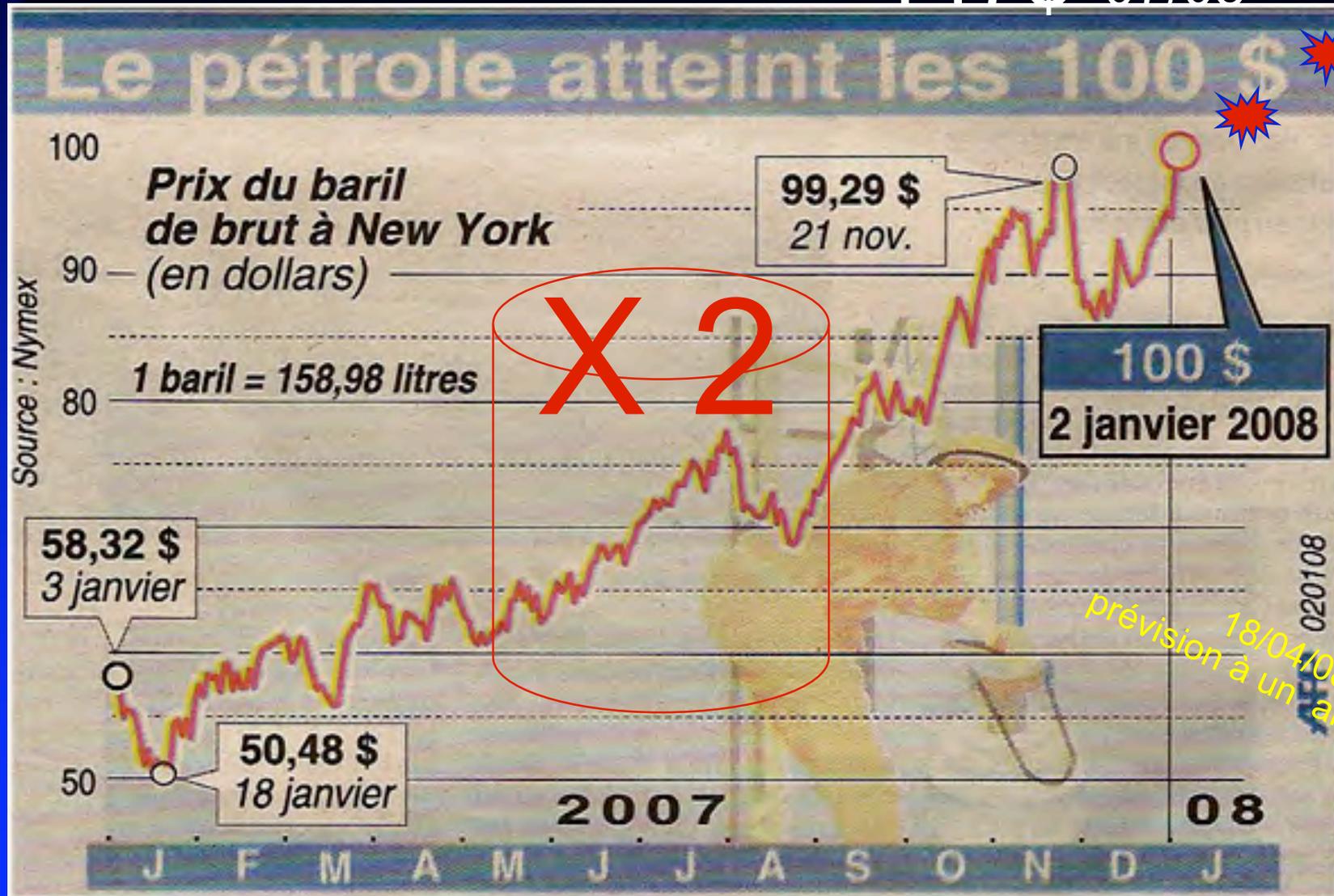
Ex: en 2001, question à V Poutine
« avec abolition des subventions sociales que deviendront
tous les misérables (sic) empochant 30€/mois? »
Rép: « Ils mourront, monsieur, ils mourront ...»

3 janv 2008

La Libre Belgique

147\$-07/08

prévision à un an: 132 \$
2/03/08



prévision à un an: 149 \$
18/04/08

Le baril à 100 \$, l'or explose



3 janv 2008

La Libre Belgique

PREAT A Uib, Jette-St-Pierre 11.2008

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'

Evolution comparée du dollar US et du pétrole WTI



Les Echos 3.01.08

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

ERRONEES



PREAT A Ulb, Jette-St-Pierre 11.2008

C Maund 2008

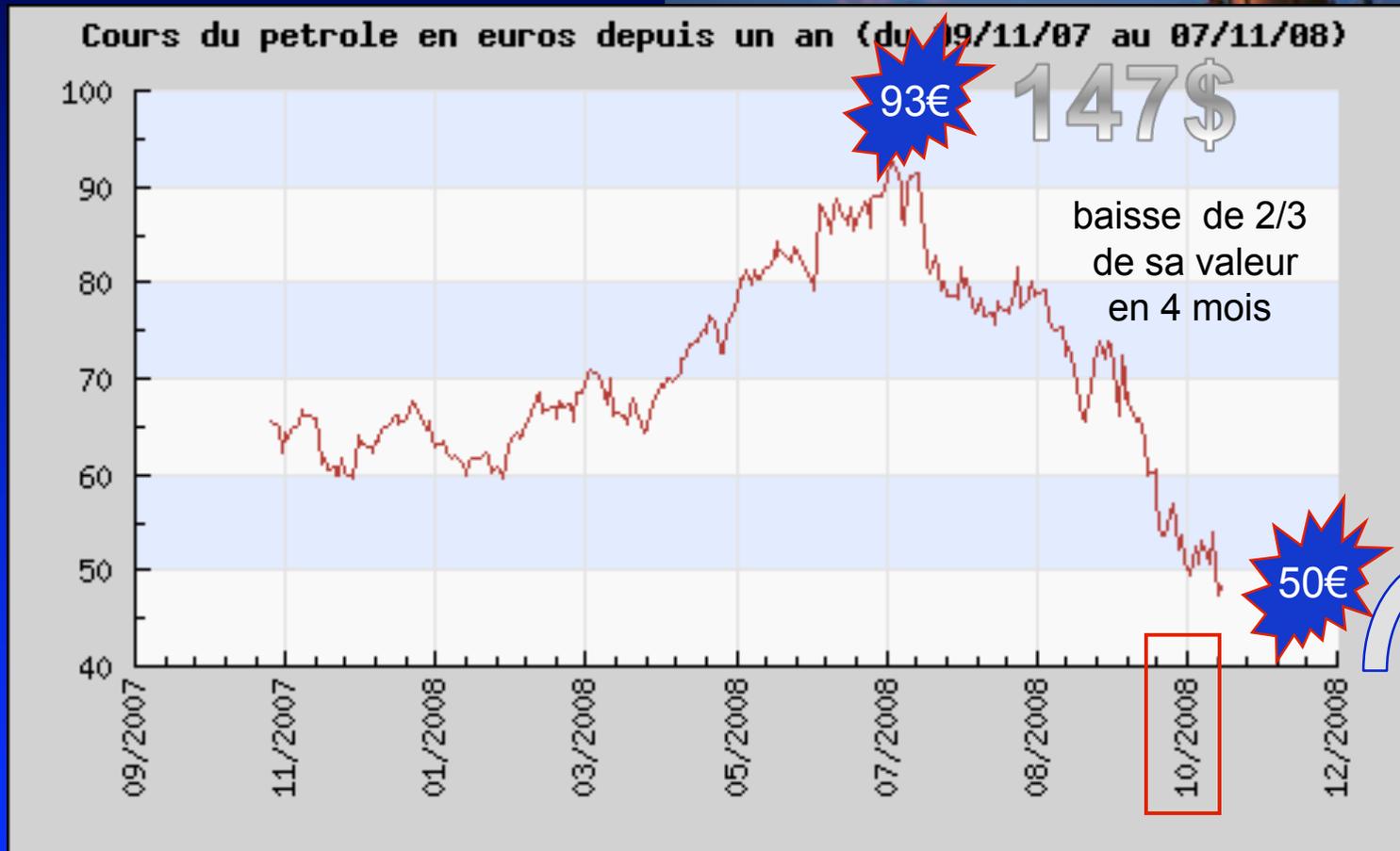
Ici **baisse** du prix **MALGRE** ouragan 'Gustav', conflit russo -géorgien

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 ...

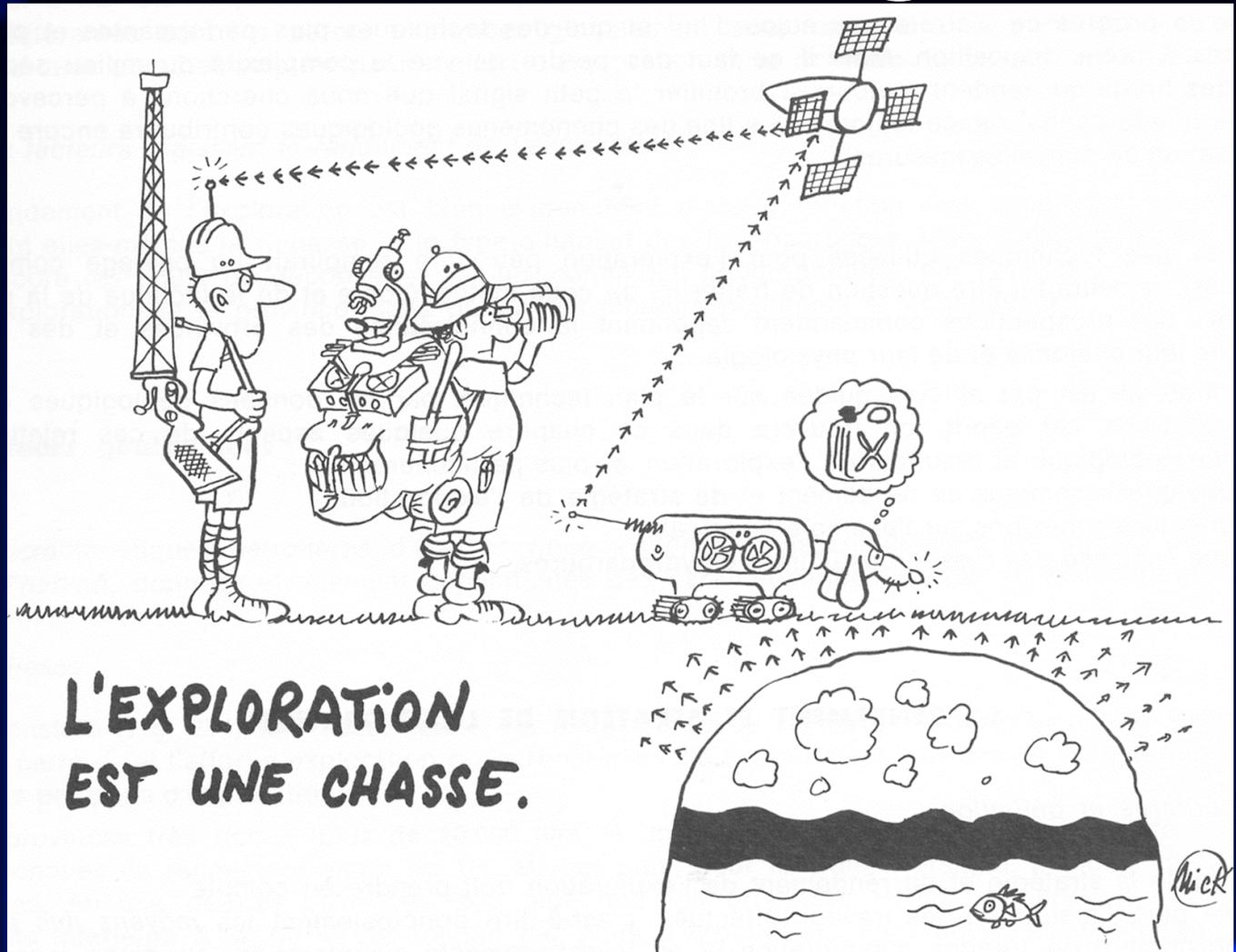
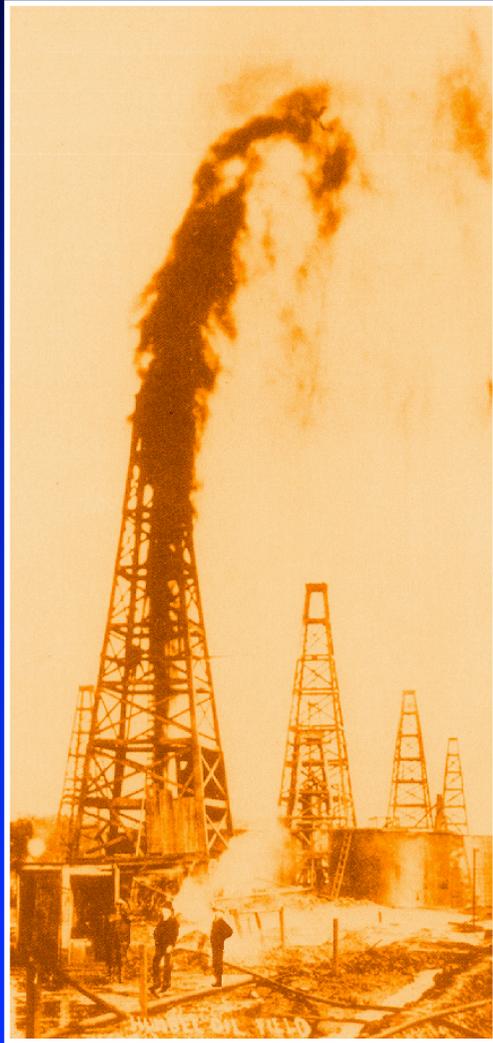
ERRONEES...



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.... ?

La Recherche de l'Energie...

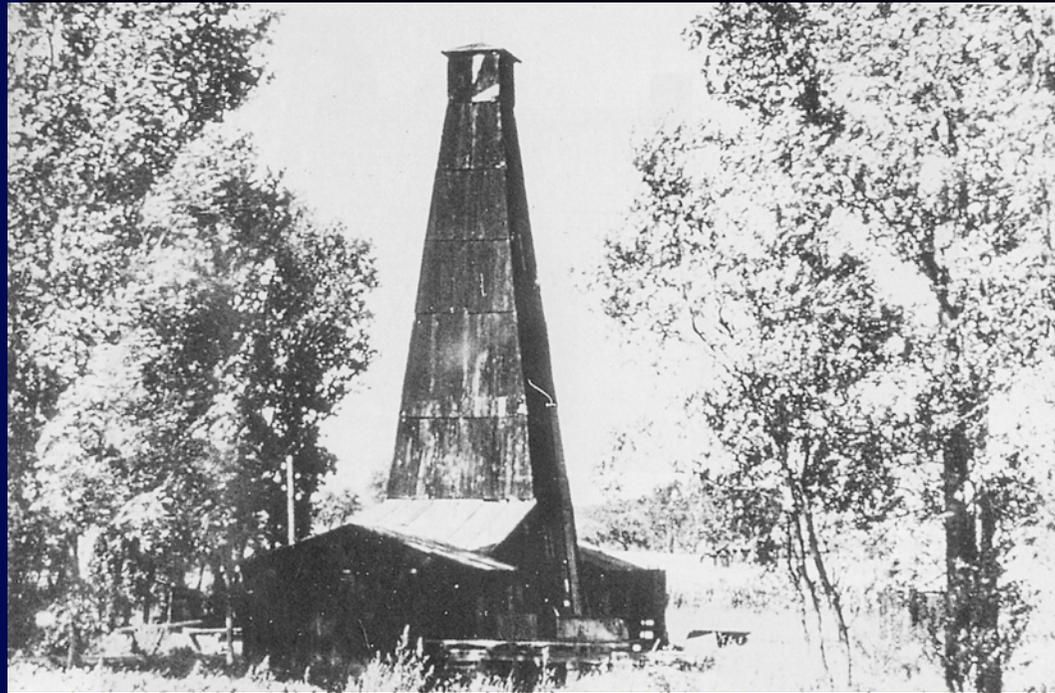


Réserves=Incertitudes Géologiques, Technologiques et Géopolitiques

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 de plus de 50 000 gisements majeurs d'hydrocarbures

Light Texas Crude
Palo Pinto Field
North Texas

Heavy Texas Crude
Humble Oil Field
Southwest Texas



American Petroleum Institute, 1999

'léger'

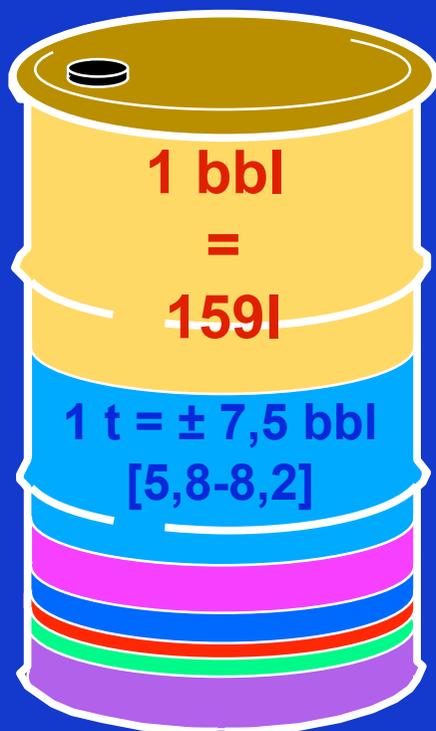
'moyen'

'lourd'

'extra-lourd'

2006 - 85 M bbl/j

= 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 octobre 2008

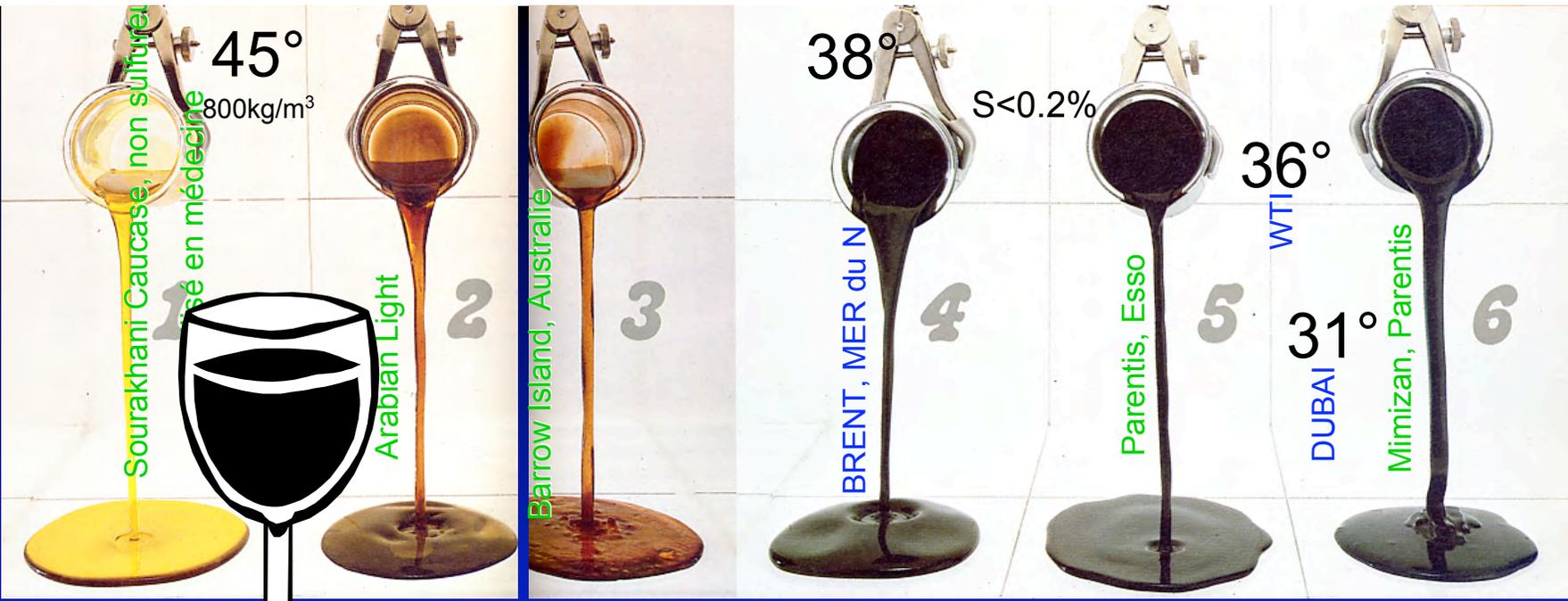


= 1000 bbl/sec



soit 5500/j

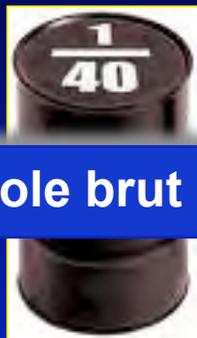
NOXEMEQHOURB



MRTCOS+

>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...
...

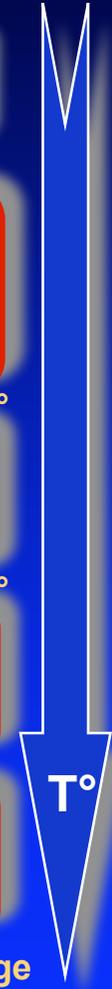
→ **Gaz**
4%
±180°

→ **Essences Solvant léger**
46%
±250°

→ **Kérosène**
10%
±360°

→ **Gazole**
27%

→ **Résidus**
>500°
craquage



Dubois 2007

→ 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



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

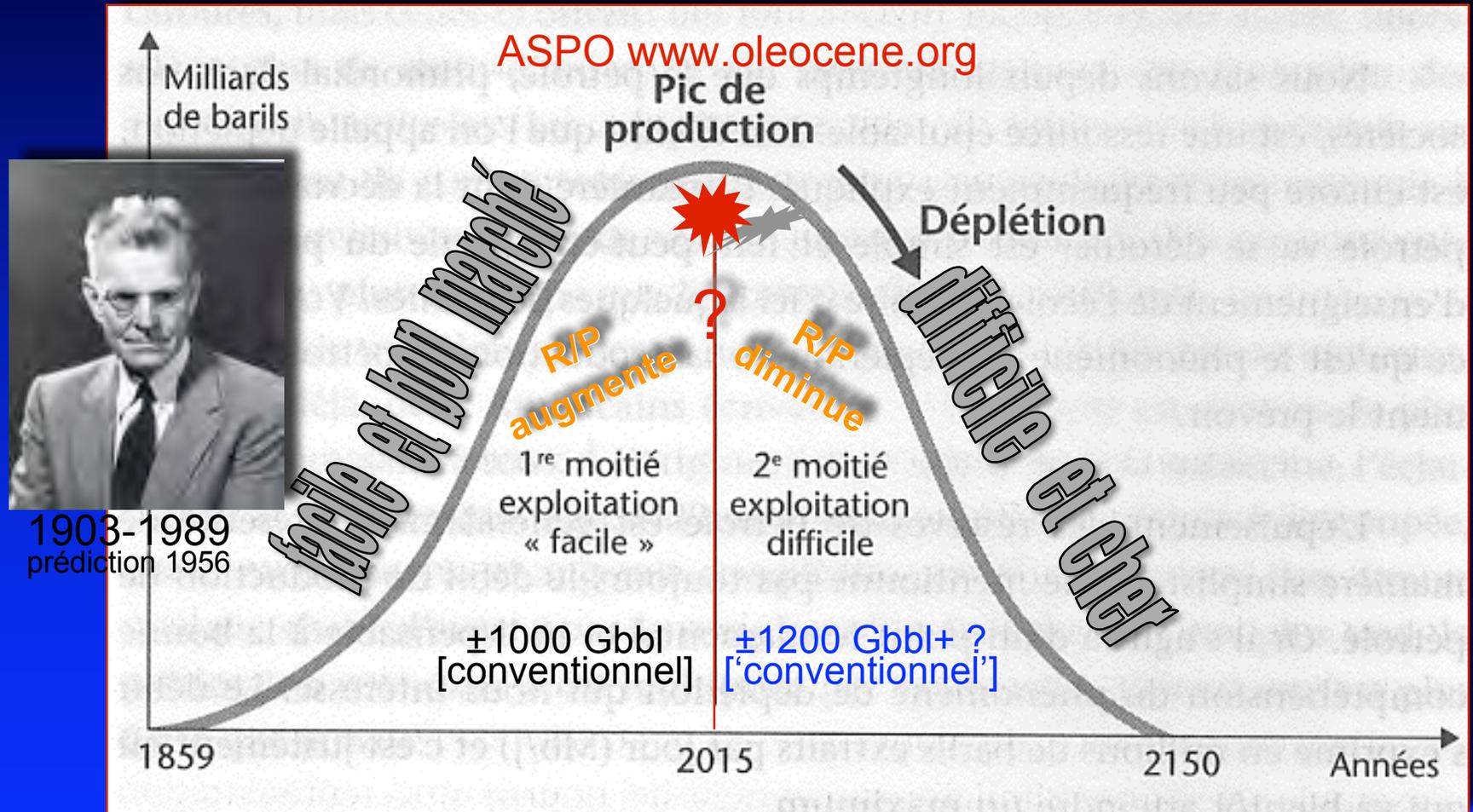
= bois résineux

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

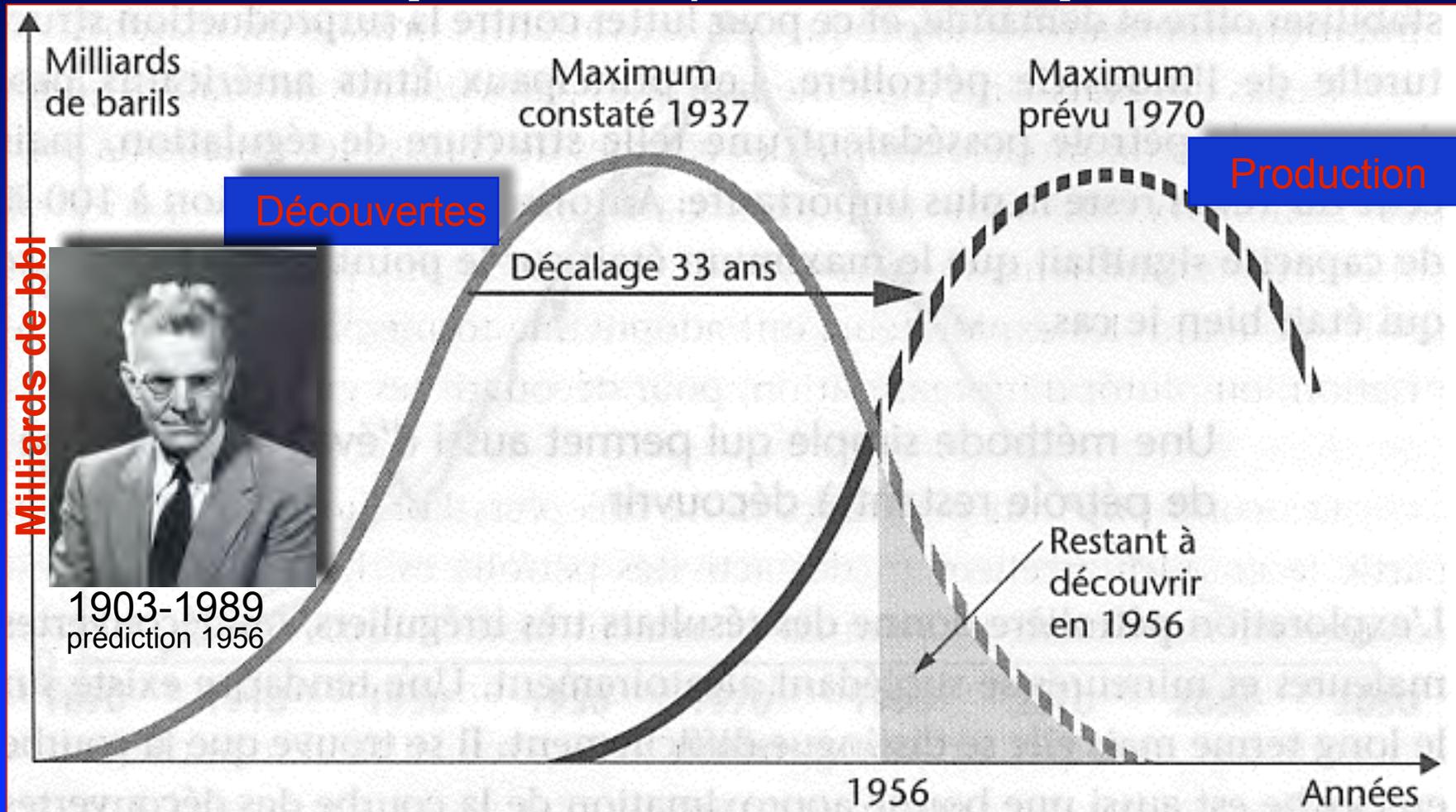
- *les schistes bitumineux ou 'oil shales, bituminous shales'*
[Wyoming, Colorado -USA, Orénoque -Brésil]
[= pétrole 'jeune' -il n'y a pas de bitume!, ni tjrs de schiste!]
- *les sables asphaltiques ou huiles extra-lourdes [Venezuela] et*
les sables bitumineux ou 'tar sands' [rivière Athabasca, Canada]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

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

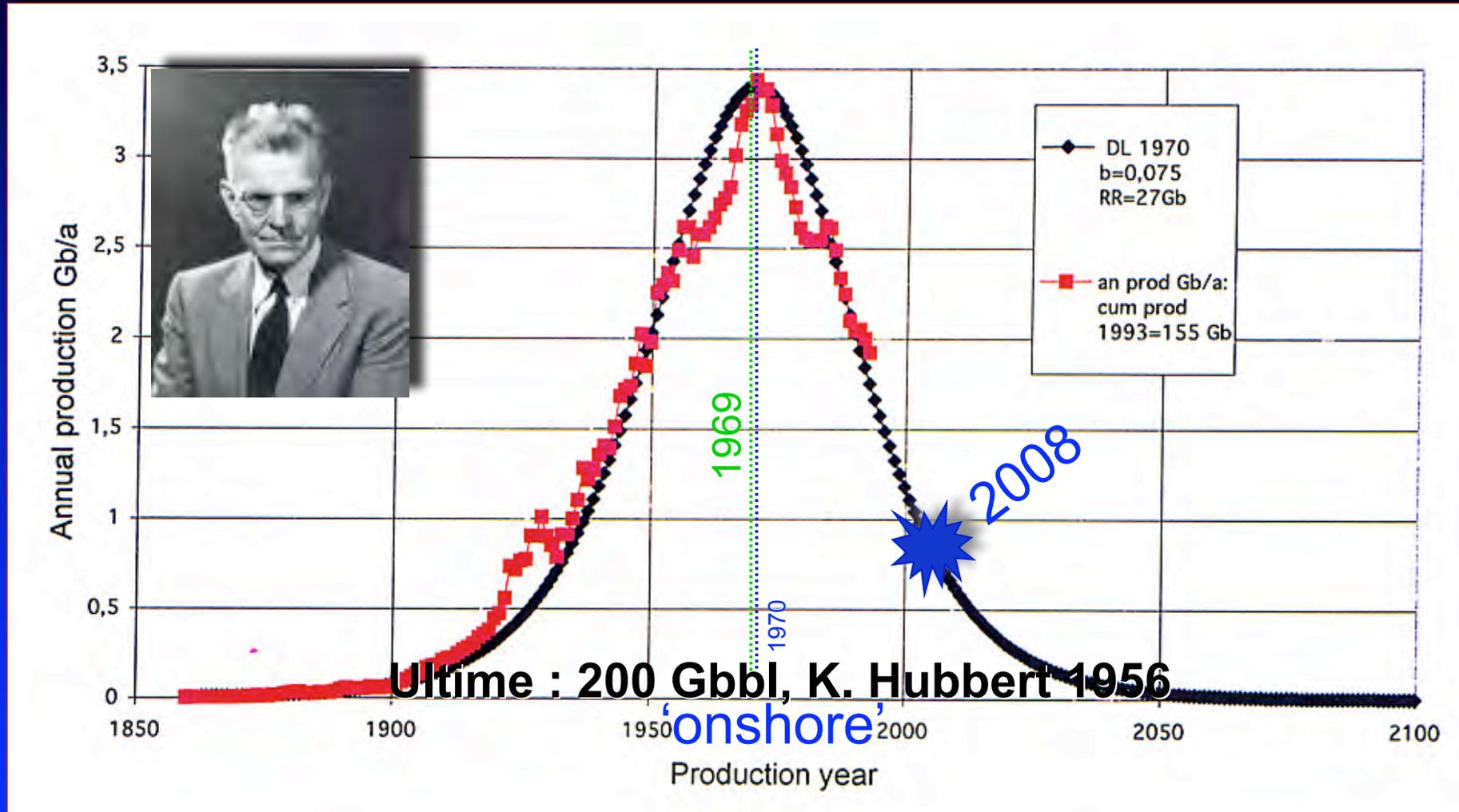


Réserves disponibles au terme d'une année (Gt, Gbbl...)
Production au cours de cette année (même unité)

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



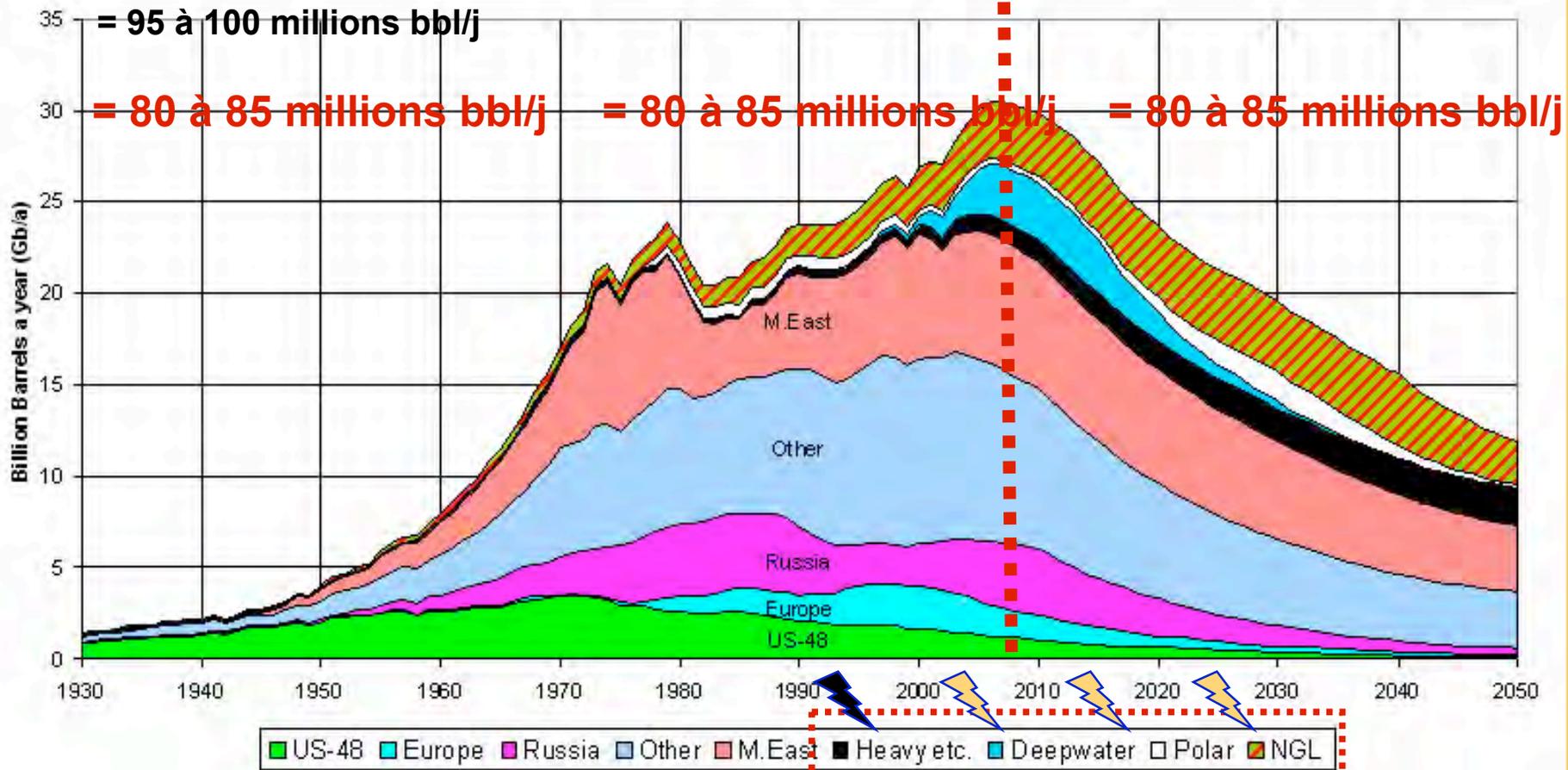
48 Etats US: Courbe de Hubbert (en 'cloche'), modèle de déplétion



Campbell & Laherrère, 1994

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

<http://www.peakoil.net/>
OIL AND GAS LIQUIDS
2004 Scenario

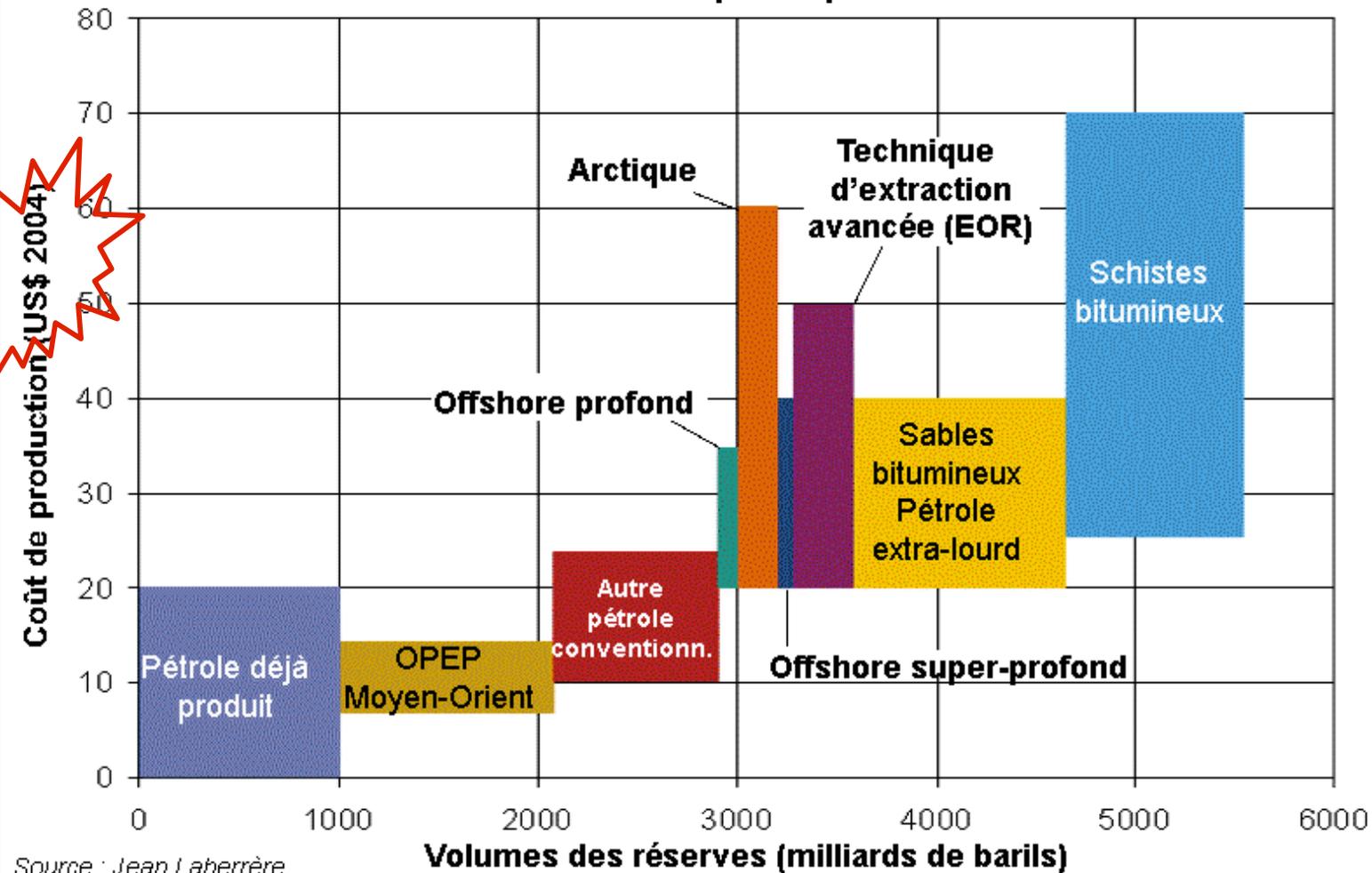


SC
 nc
 C

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

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

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



ex:

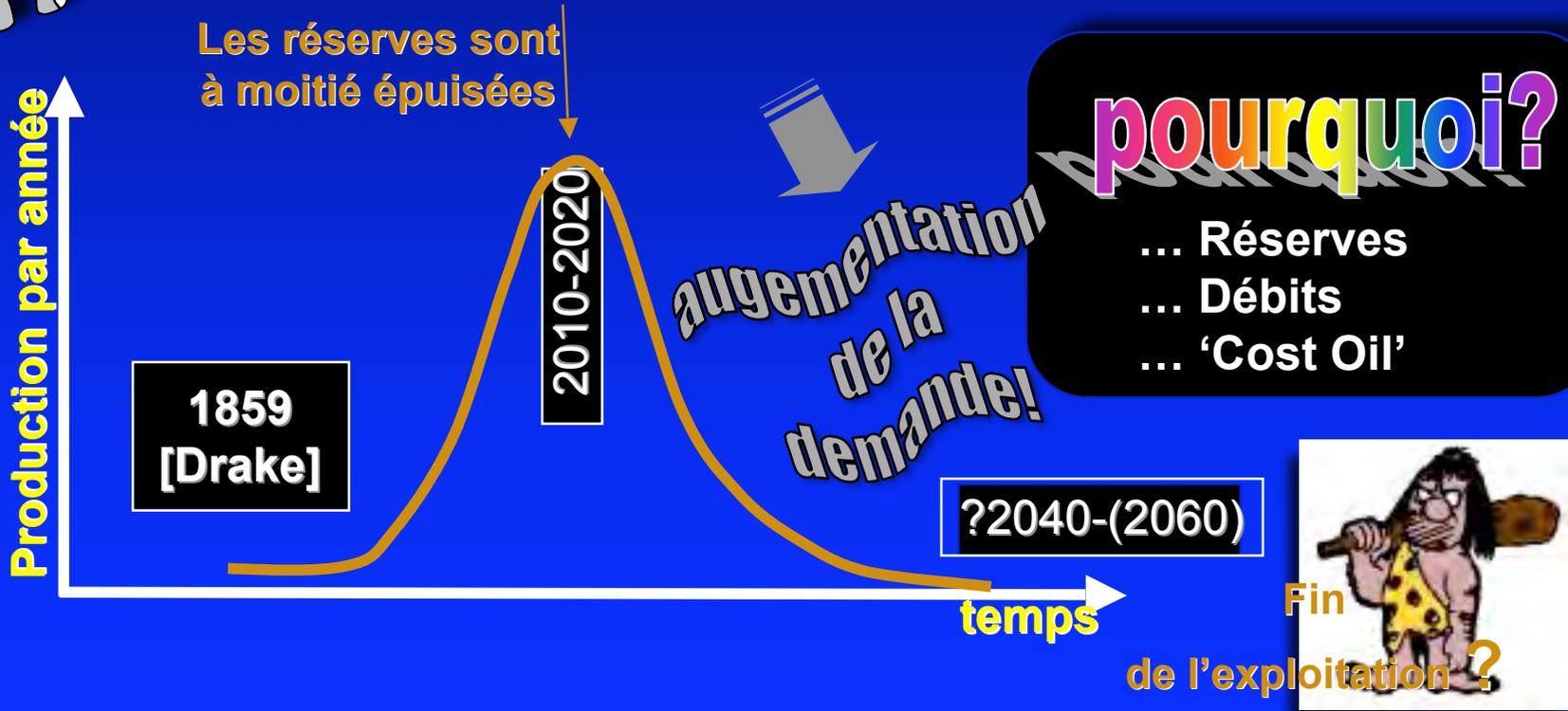
pétrole
lourd ou
sables
bitumineux
du Canada
=1750 Gbbl
dont aujourd'hui
10% = réserves

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...?

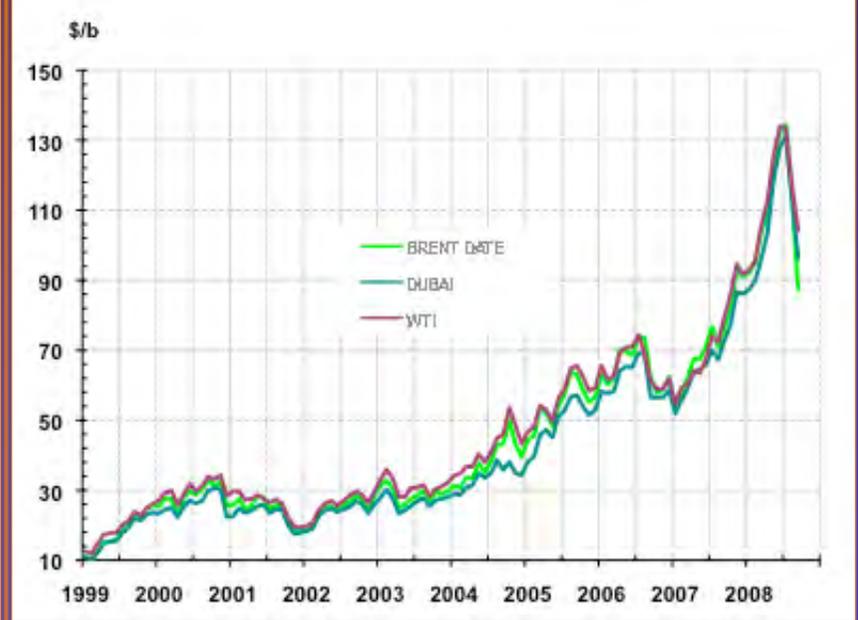
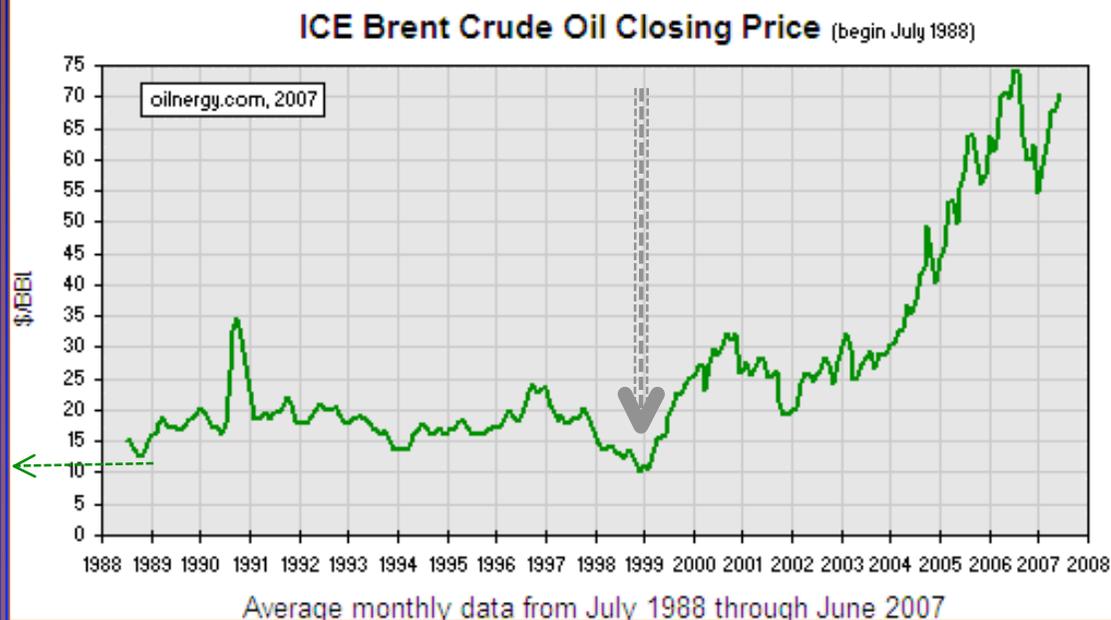


Le pétrole 'bon marché' est fini
Le monde sera **ENCORE** plus dépendant
des pays producteurs du Moyen-Orient



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



Mais d'où VIENT LE PETROLE?



MATIERE ORGANIQUE

Protéines

Carbo-hydrates

Lipides

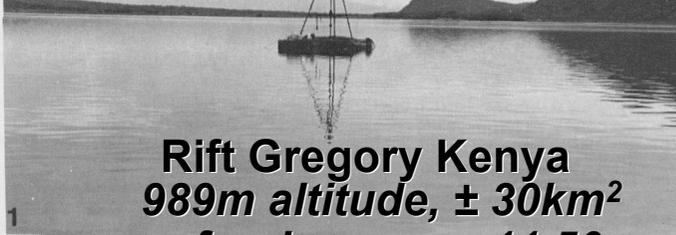
....



**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)*

Le demi-graben de Baringo-Bogoria



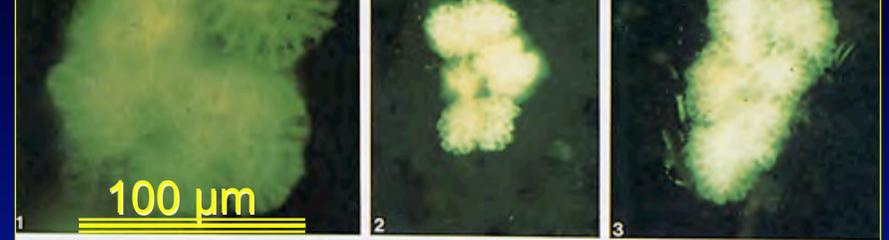
Rift Gregory Kenya
989m altitude, $\pm 30\text{km}^2$
profondeur max: 11,50m



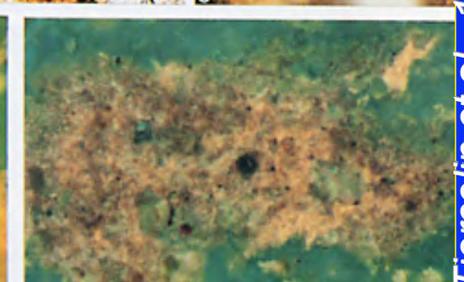
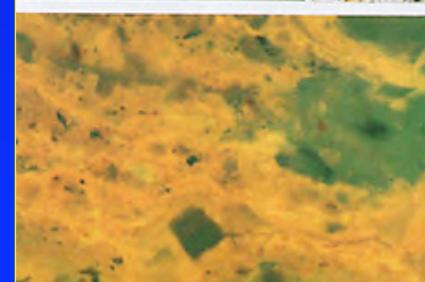
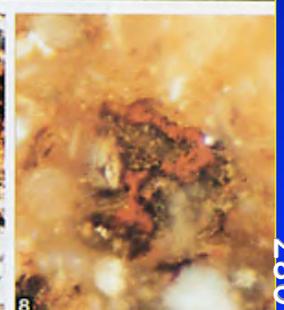
430 000 d'histoire sédimentaire
Carottages de 0 à 16 m
[entamés en 1977...]



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



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



Tiercelin 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 C₁₀ à C₃₀

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

100%

MATIERE ORGANIQUE

préservation = milieux de dépôt

<
0,1%

KEROGENE

macromolécules carbonées résultant de la transformation MO par microbes anaérobies

transformation = 'cuisson'

HYDROCARBURES

'O/W'

'Oil / Window'

enfouissement excessif = 'carbonisation'

de la MO?

C

...METAMORPHISME

Les combustibles fossiles sont le résultat d'une minuscule 'épargne' de MO à partir des immenses cycles précédents



HC

= 10.000 milliards de tonnes de carbone fossile

accumulée en ± 500 Ma, soit 20.000 t/an

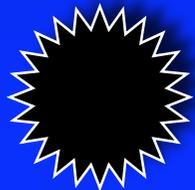
qui échapperaient aux cycles de la Vie

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



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

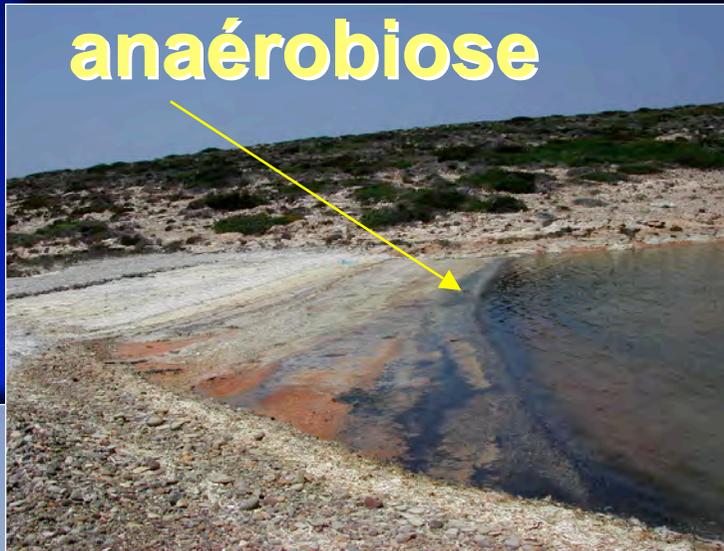
Mer Noire, Mer Baltique, Caspienne, Golfe de Californie, Lagune de Maracaibo...

Ex: Mer Noire >3% MO et >0,2g C/m²/j



HERBIERS à POSIDONIES

Cyclades, Grèce, 2003



sédiment réduit

RENDEMENT

un chiffre méconnu ...

**POUR OBTENIR UN LITRE D'ESSENCE
IL AURA FALLU QUE 23 TONNES D'
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

PREAT A Uib, Jette-St-Pierre 11.2008

CONCLUSION

ROCHE MERE = CONDITION NECESSAIRE

le kérogène est le précurseur des HC

= DEGRADATION

POLYCONDENSATION

INSOLUBILISATION

de la MO attaquée par les micro-organismes

[bactéries et fungi]

dès les premiers cm d'enfouissement

ensuite...

DEGRADATION THERMIQUE du KEROGENE

PREAT A Uib, Jette-St-Pierre 11.2008

PÉTROLE



Restlé, 1986

GENESE DU PETROLE = DIAGENESE + CATAGENESE

D
I
A
G
E
N
E
S
E

le kérogène n'est pas le pétrole
POUR CELA IL FAUT

de la chaleur ($T^\circ = 10' - 100''^\circ$)
du temps (géologique = 10' Ma)

ensuite seulement
-si tout va bien-
un piège

cela fonctionne grâce à la
subsidence

(pression+gradient géothermique)

C
A
T
A
G
E
N
E
S
E

Roche Source
riche en Matière Organique



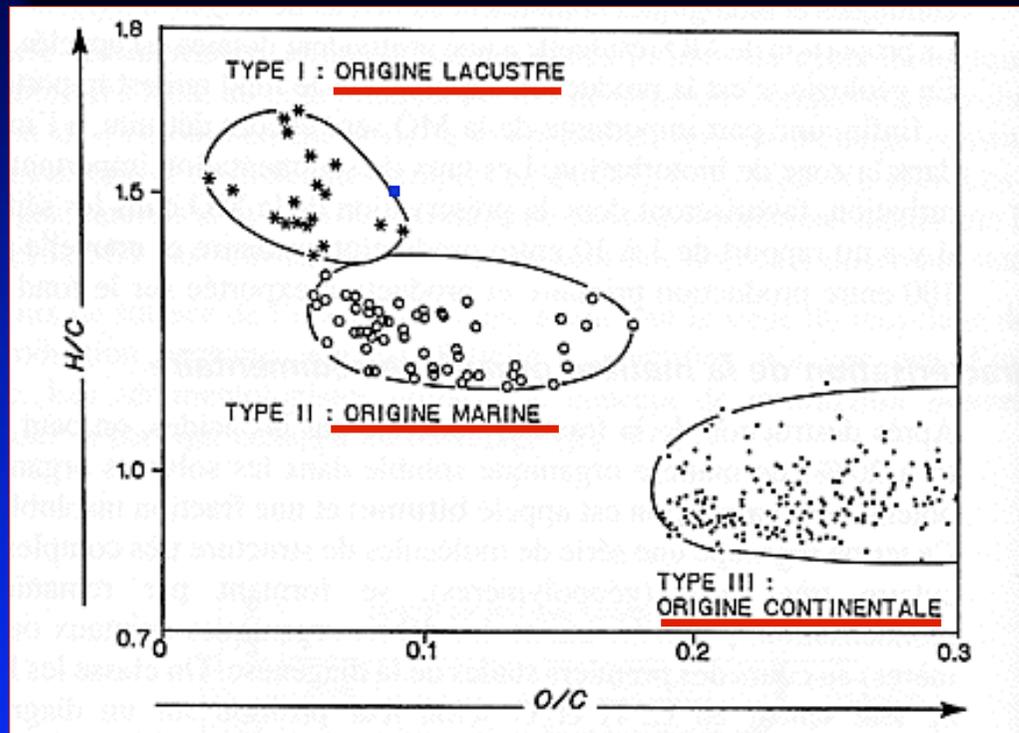
Maturation Thermique
de la Matière Organique



HUILE

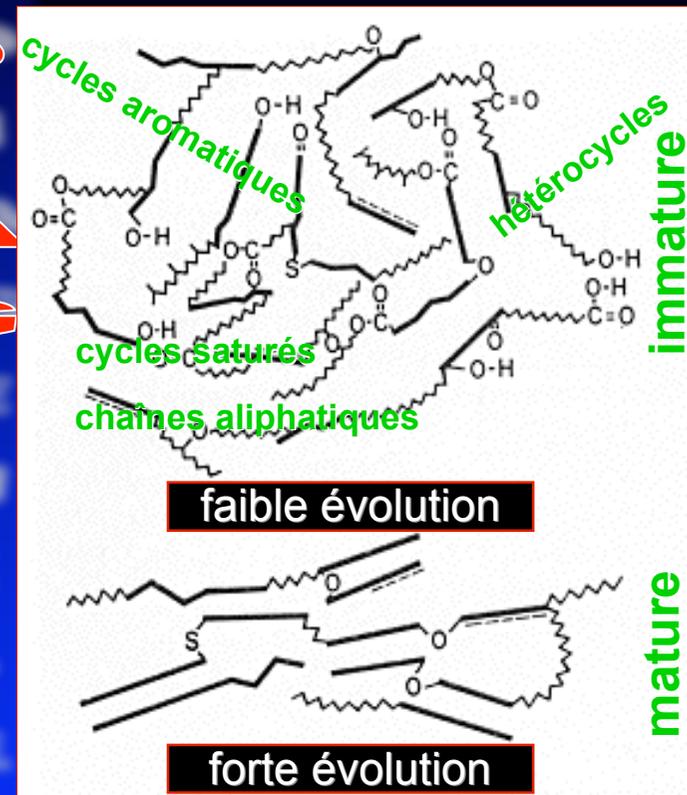
pour simplifier ...

les radicaux séparés donnent du CO₂, de l'H₂S et de l'eau



**A L'ORIGINE DANS LES SEDIMENTS
QUEL DEVENIR?**

**D
I
A
G
N
O
S
T
I
C**



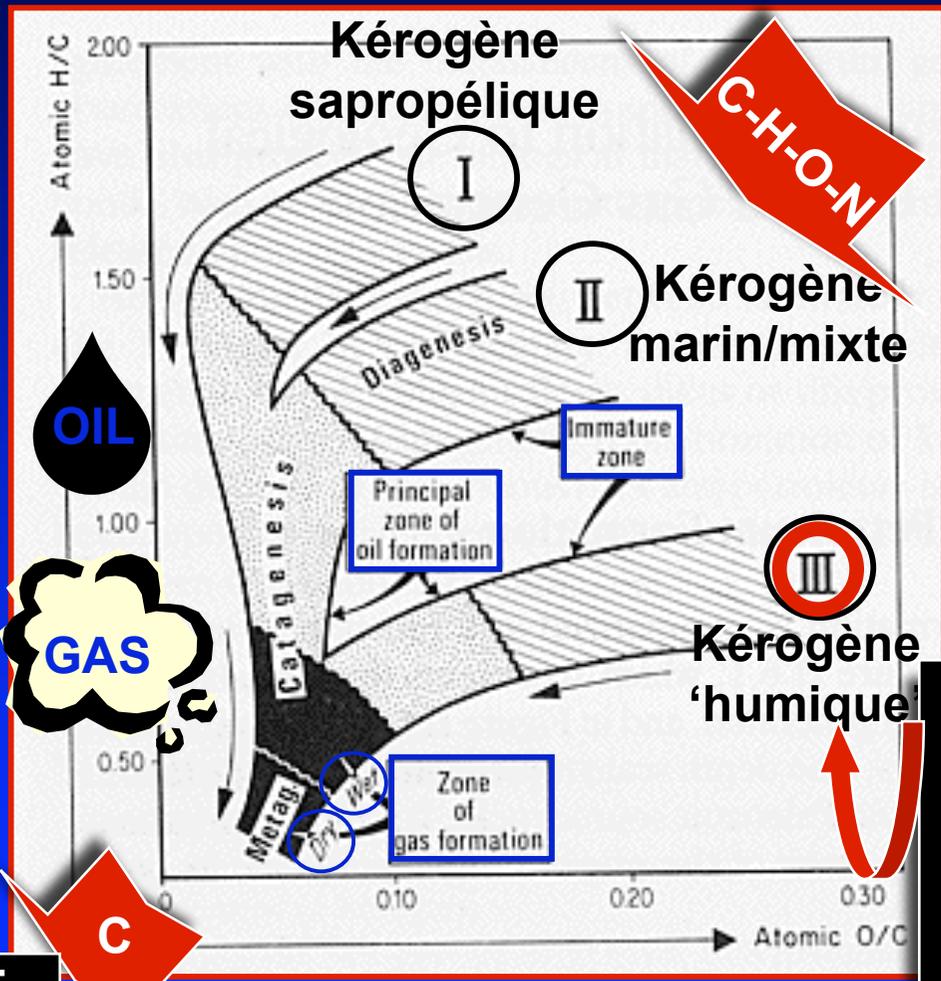
**C
A
T
A
C
E
N
E
S
E**

= condensation-insolubilisation
à partir lipides, ac fulviques, humiques...

EVOLUTION DU KEROGENE

DIAGRAMME DE VAN KREVELEN

DIAG
↓
CATAG
↓
METAG



C-H-O-N

OIL

GAS

C

lipides...
↑
lignine...

<0,5 Charbon
0,5-2.0 Charbon bitumineux
>2.0 Anthracite

GRAPHITE

DU KEROGENE AU PETROLE...

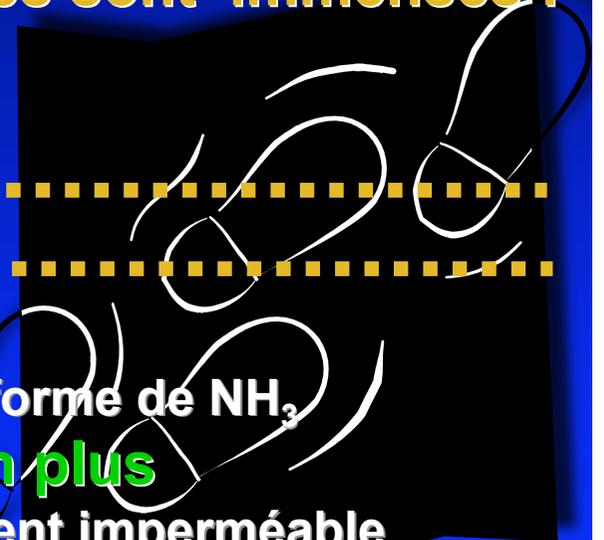
D
A
G
E
N
E
S
E

la M.O. [=le kérogène] 's'enfonce' suite à la subsidence...
PAS TRES VITE = de 0,005 mm/an à un MAX de 0,5 mm/an
soit entre 5 m et 500 m par million d'années

pas de problème... les temps géologiques sont 'immenses'!

suivons 'pas à pas' cet enfouissement

- de -3 à -10m: milieu 'abiotique'
- en qq 10'm le kérogène perd tout son azote sous forme de NH_3
- ensuite le sédiment s'enfonce de plus en plus
- la pression augmente, le sédiment compacté devient imperméable
- l'eau intersticielle est expulsée, une faible partie reste dans les pores
- la température augmente doucement



DU KEROGENE AU PETROLE...

...pas de problème... les temps géologiques sont 'immenses'!

- -600 m, 41°C 'chaleur douce'

- le kérogène se décompose, le CO₂ s'en va (décarboxylation), l'H₂O s'en va (déshydratation)...

- le sédiment s'enfonce de plus en plus

- la température augmente suite au gradient géothermique
=1°C tous les 30 à 40 m environ

et le sédiment est porté à 60°C à 1200 m et à 120°C à 3000 m

=

FENETRE A HUILE

D
I
A
G
E
N
E
S
E

DU KEROGENE AU PETROLE...

...pas de problème... les temps géologiques sont 'immenses'!

= FENETRE A HUILE

le kérogène se casse et libère des molécules plus petites:
marqueurs biologiques piégés dans le réseau et petits
'morceaux' qui dépassent des grosses molécules de
géopolymère

c'est la **CATAGENESE**
càd ...

...la formation du PETROLE
le 'jus' de kérogène mature et donne donc le pétrole

D
I
A
G
N
E
S
E

C
A
T
A
G
E
N
E
S
E

km0

ZONE IMMATURE
CH₄ biogénique
CO₂, H₂O

M S M Z M G A - D

km±1,5

±6Ma

±12Ma

GAZ HUMIDES O:W

M S M Z M G A T A C

km±4

les huiles formées sont en C₁₈-C₄₀

GAZ SECS

M S M Z M G A T E M

km±7

[...300°C]

'GRAPHITE'

M É T A M O R P H - S E

bien souvent, cela débute...



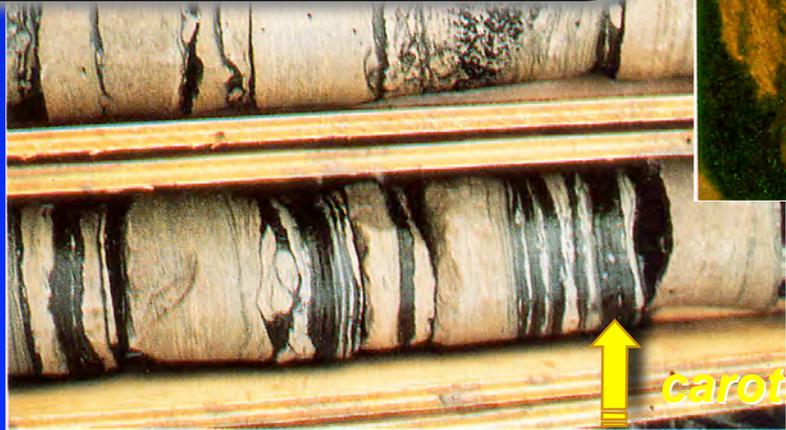
nappe

**... par
des suitements naturels
d'hydrocarbures**

**Migration primaire
Migration secondaire
et RR ...**



microfracture



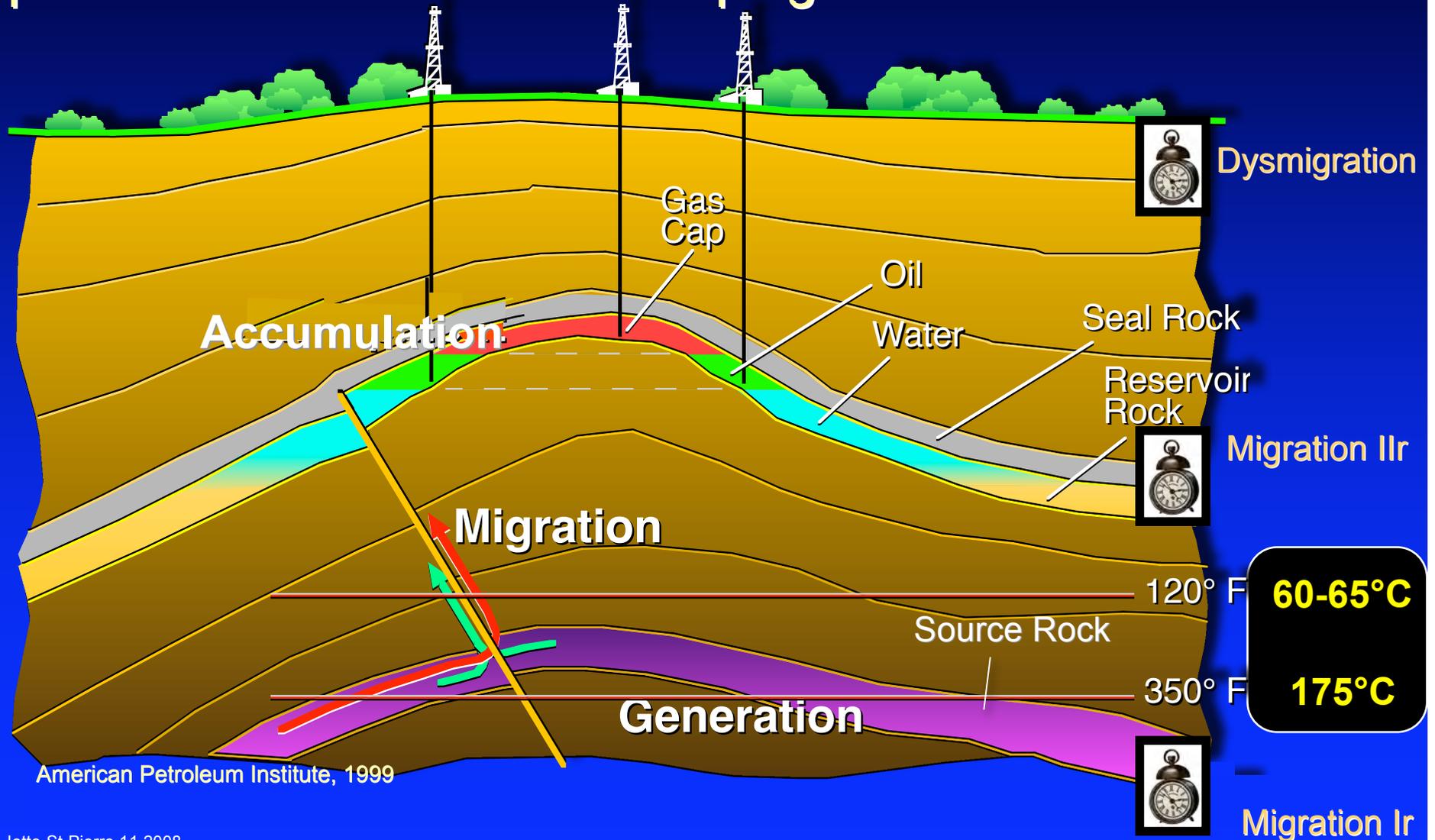
carottes de forage

... par des 'oil shows'

R a p p e l: Réserves = Incertitudes Géologiques ...

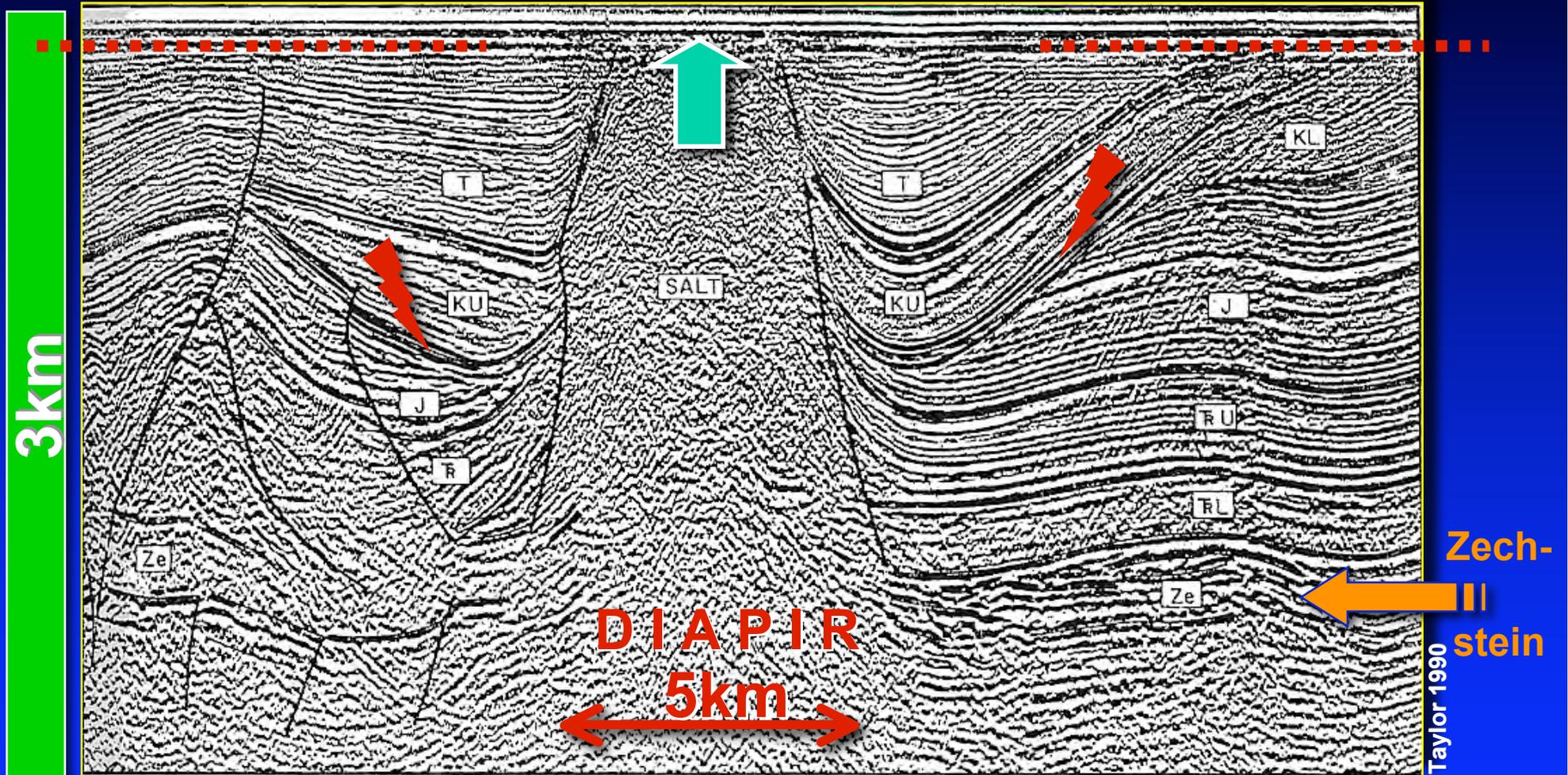
Processus dans Systèmes Pétroliers

Le pétrole s'accumule dans des pièges structuraux fermés



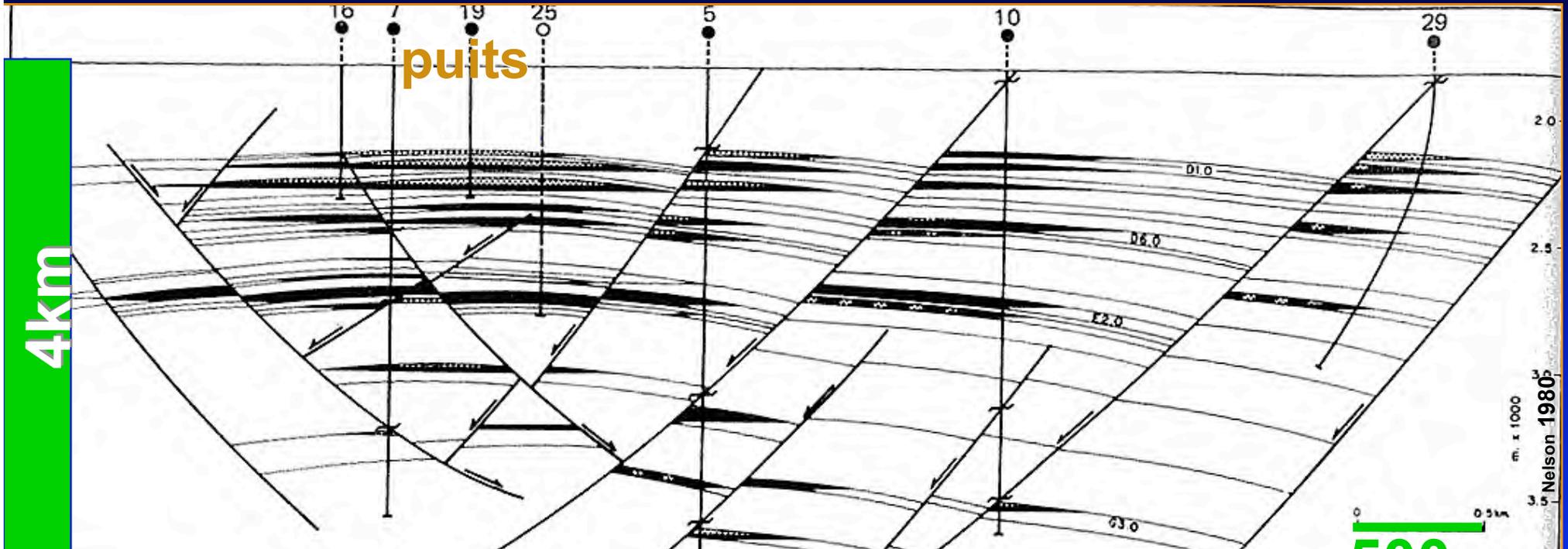
Profil sismique réflexion, Mer du Nord

[25kmX3km, résolution ± 15 m]



Zechstein = gde mer épicontinentale Pm sup [245Ma]
Halocinèse Crétacé - Tertiaire inférieur [135-55Ma]

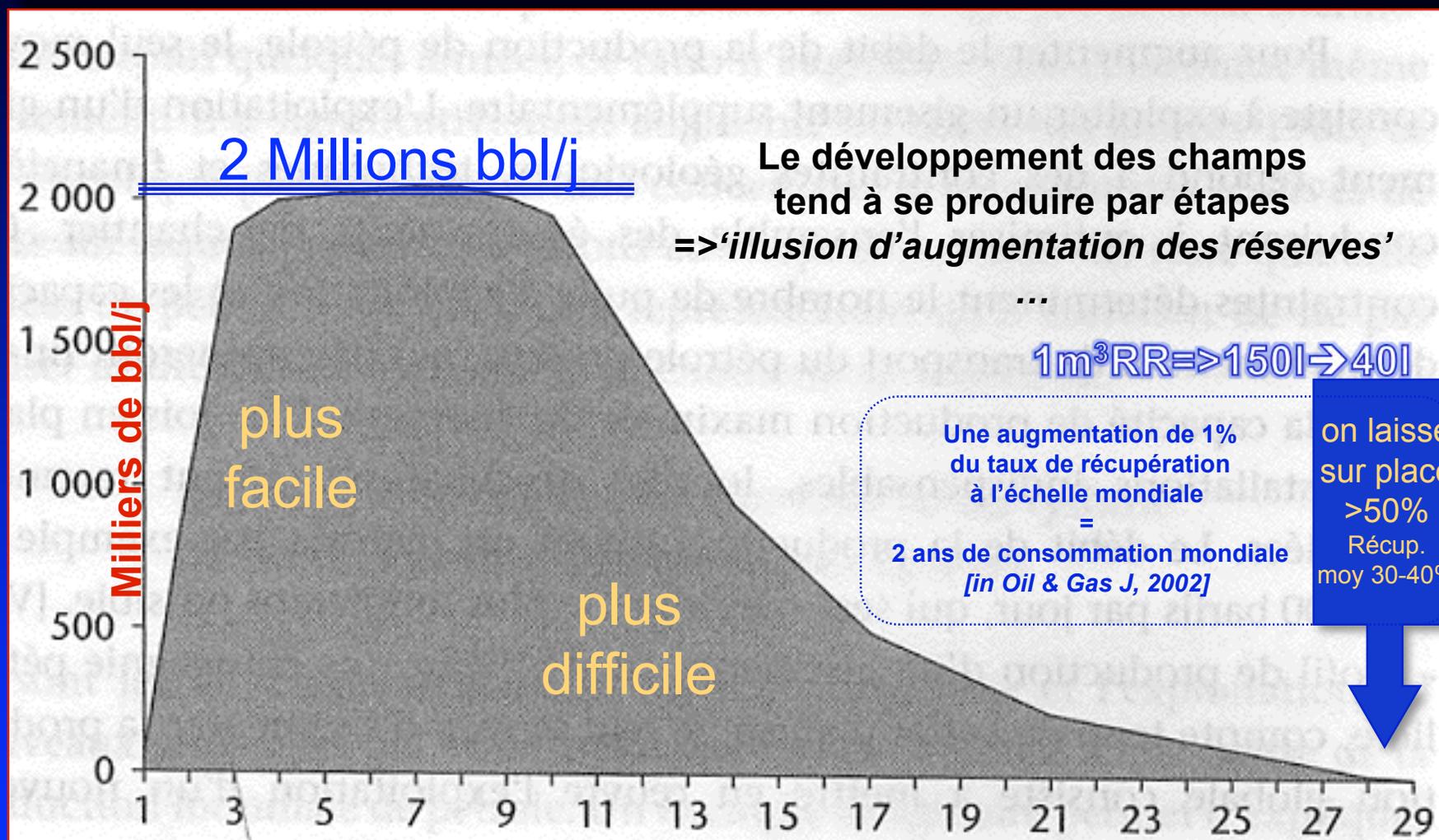
Pour une bonne interprétation structurale, l'espacement sismique doit être proche de la plus petite distance entre les failles...



'Nembe Creek Structure' = anticlinal complexe 15kmL X 6kmI [Nigeria]
fortement failé (réseaux conjugués) ==> blocs failés

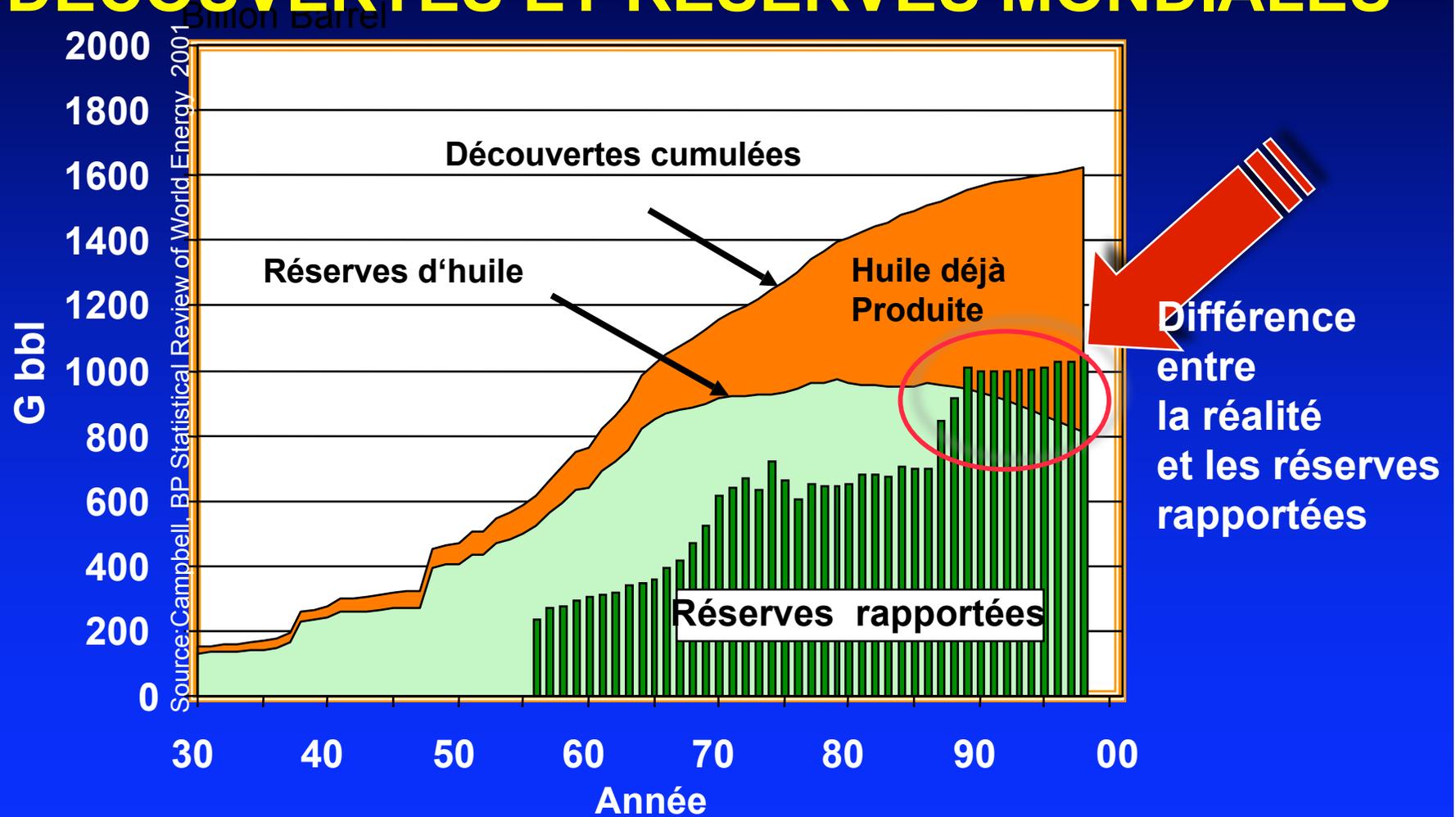
NET OIL SDST = 11 intervalles totalisant 145 m
NET GAS SDST = 8 intervalles totalisant 87 m

PROFIL TYPE DE PRODUCTION D'UN GISEMENT



Ex. d'un champ géant de 10 Gbbl étalé sur 30 ans avec un maximum de 2 Mbbbl/jour. La courbe n'est pas symétrique...

DECOUVERTES ET RESERVES MONDIALES



exploitables (économiques)	Découvertes		Non découvertes	
	produites	Réserves	Dans zones	
		prouvées	probables possibles	connues
potentielles (subéconomique)			hypothétiques	spéculatives
	>90% d'être produites		<90%	

FAISABILITE

← CONNAISSANCE GEOLOGIQUE →

LA REGLE DES 3 'P' [prouvées-probables-potentielles]

Les réserves prouvées 'P' sont définies qualitativement et mesurées quantitativement à quelque 20% près par interpolation entre sondages et extrapolation limitée appuyées sur des données sismiques fidèles

= > 90% ... d'être réalisées

Les réserves probables '2P' sont estimées par extrapolation à partir d'un puits et de géophysique sur une structure, sur une ou plusieurs structures voisines bien connues géologiquement
Dans ce contexte: probable = 40 à 80% de chances de découvertes

= > 50% ... d'être réalisées

Les réserves ou ressources, possibles ou potentielles '3P' sont hypothétiques: < 40 % de découvertes, généralement 5 à 10%

= > 10% ... d'être réalisées

Des Ressources aux Réserves

Charbon > 900 Gt
 7000 G bbl nc [4000 sables asph+3000 sch bit]
RESSOURCES
 10000 à 12000 G bbl c

Bouillard JN, IFP 2002

Accessibles à l'exploration

Non accessibles à l'exploration

Identifiées

Non identifiées

Techniquement productibles

30% c
 dont 1/3 déjà extrait à ce jour

Techniquement non productibles

Economiquement rentables

Economiquement non rentables

P-2P-3P
RESERVES
 = P jusqu'à 2025
 2,0 à 2,2 G bbl

soit 32 à 42 ans suivant les fourchettes et à raison de 30 G bbl/an pour 1,2 Gbbl en 2008



Ressources: quantités en place dans la croûte terrestre (identifiées ou non)
 Réserves: HC récupérables, commerciables dans les conditions actuelles du marché

FINALEME

< 100 \$... > 100 \$

concept fluctuant
(technique, économie)

volume fixe
difficile à évaluer

RESERVES
PROUVEES

RESERVES
ULTIMES

on passe de l'un à l'autre
dans les deux sens



Les réserves développées prouvées: le poisson est dans votre barque, vous l'avez pesé. Vous pouvez le sentir et vous allez le manger. **Les réserves non développées prouvées:** le poisson a mordu à l'hameçon et vous êtes prêt à le sortir de l'eau. Vous pouvez même en évaluer la grosseur (il a toujours l'air plus gros dans l'eau que dans la réalité!). **Les réserves probables :** Il y a des poissons dans le lac. Vous en avez même pêchés hier. Peut-être même pouvez-vous les voir, mais vous n'en avez pas attrapés aujourd'hui.

Les réserves possibles: Le lac existe. Certains vous ont même dit qu'il recèle des poissons. Mais votre barque est toujours sur sa remorque et vous préférez aller jouer au golf.

RESSOURCES

In Legault A 2007

Pourquoi?

INCERTITUDES GEOLOGIQUES ET ... ?

Exemple Récent

En 2002, BP annonce que les gisements inexploités de la Caspienne [prospectée en 90'] ne recélaient pas 200 G bbl comme espéré MAIS 39 G bbl d'un pétrole de mauvaise qualité! [trop de soufre] = géologie et bassins sédimentaires

nb 200 Gbbl = total USA, 220 = Russie, 75 = Europe, MO = 680
(chiffres ASPO/2006 de prod estimée jusqu'en 2100)

- Exemple Récent: le 9 janvier 2004, SHELL annonce que ses réserves étaient SURESTIMEES de 20% (son Président a dû démissionner, la Société étant sur-évaluée à la Bourse = finances....
- Exemple Récent: en 2002, la DOUMA a voté une loi: révéler les réserves de gaz et de pétrole russe est un crime passible de 7 ans de prison! = (géo)politique...

5 milliards de bbl en trop!

nb les réserves détenues par les Cies pétrolières = 'seulement' 5 à 15 %

2003 (chiffres d'affaires)

1 Royal Dutch/Shell 269 milliards US \$

2 Exxon Mobil 237

3 BP Amoco 232,6

4 Total 131,6

5 Chevron Texaco 113

...



9 déc 2003, le responsable Explo-Prod écrit au PDG de Shell

‘ Je suis malade et fatigué de mentir à propos des problèmes concernant l’augmentation de nos réserves et des révisions à la baisse qui doivent être faites suite aux annonces précédentes, largement trop agressives et optimistes.... ’



nb La Royal Dutch/Shell est avec Exxon Mobil un des plus grands producteurs (> 4 millions bbl/j)

Réserves = Incertitudes Géopolitiques...

The Oil Market's Future in the Long Term ...



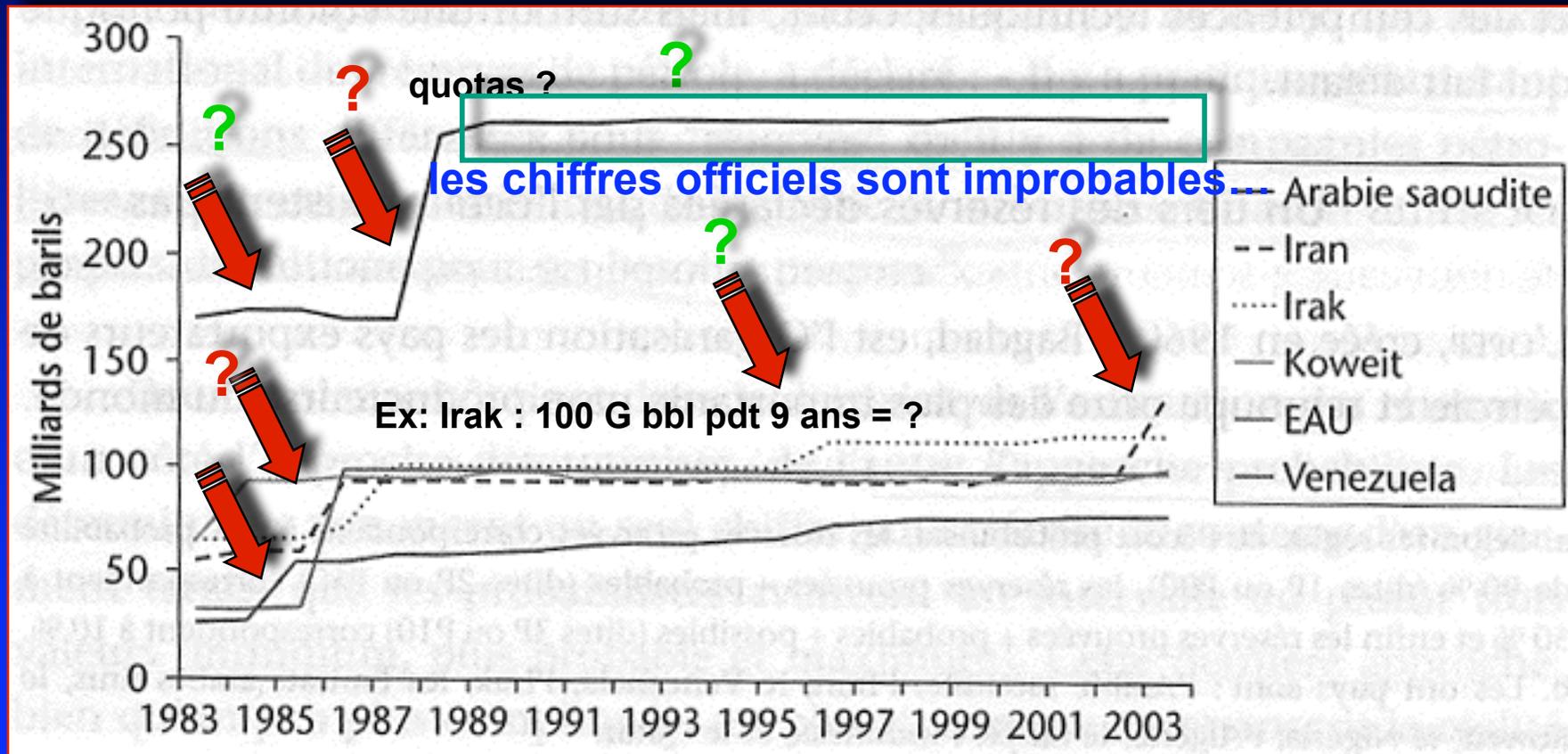
All numbers are wrong...
that much we know.

THE ONLY QUESTION IS:
BY HOW MUCH?



RESERVES DECLAREES DES PRINCIPAUX PAYS 'OPEP'

- ? Hausses soudaines des réserves annoncées fin 80'
- ? Montant des réserves inchangé sur de longues périodes comme si les nouvelles découvertes compensaient TOUJOURS la production...

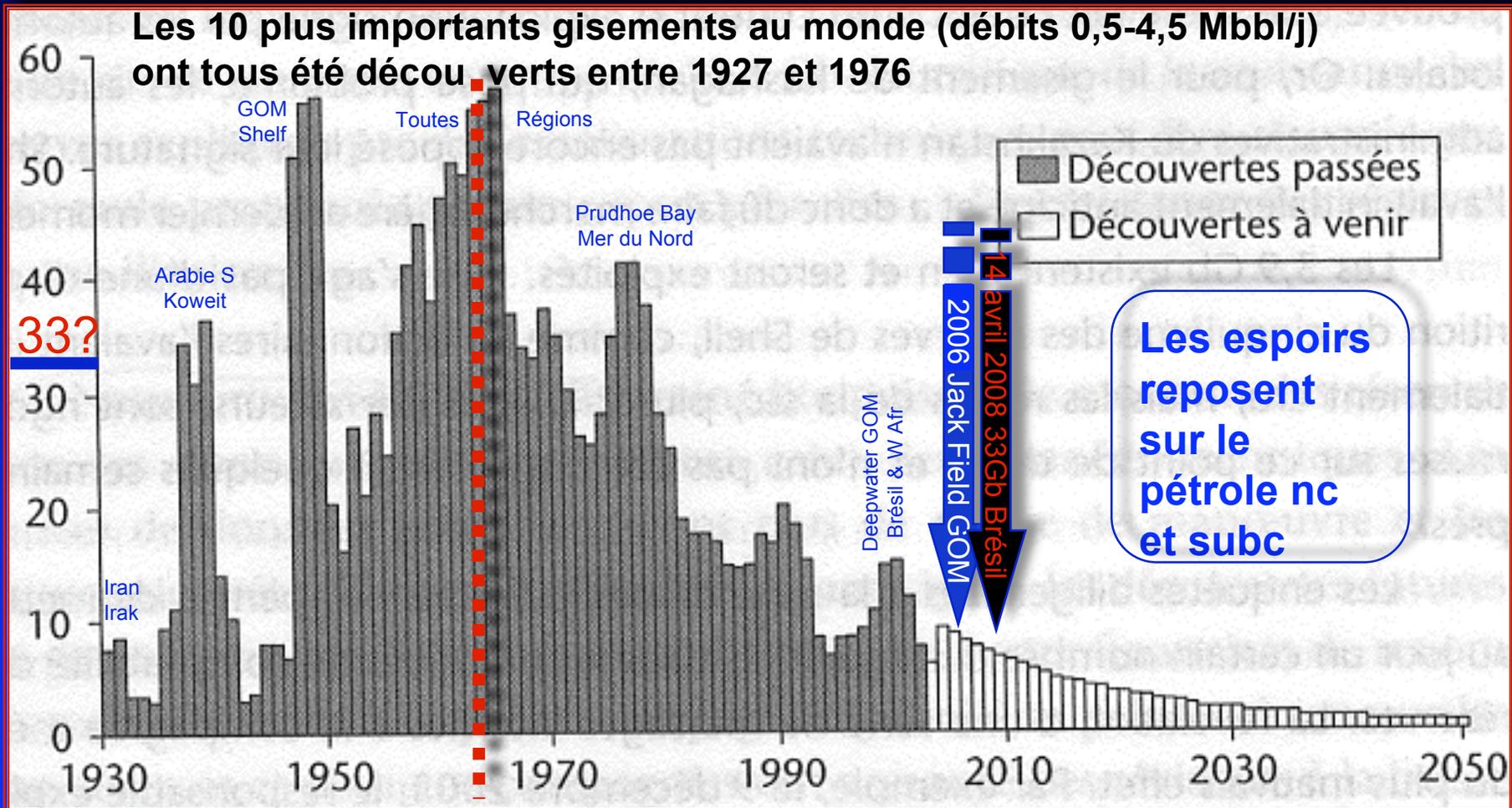


? Hausses après contre-choc pétrolier de 1986

[effondrement bbl = :2! = 'paper barils', finalement existaient vraiment!]

DECOUVERTES MONDIALES DE PETROLE

Les découvertes mondiales ont atteint leur sommet en 1965

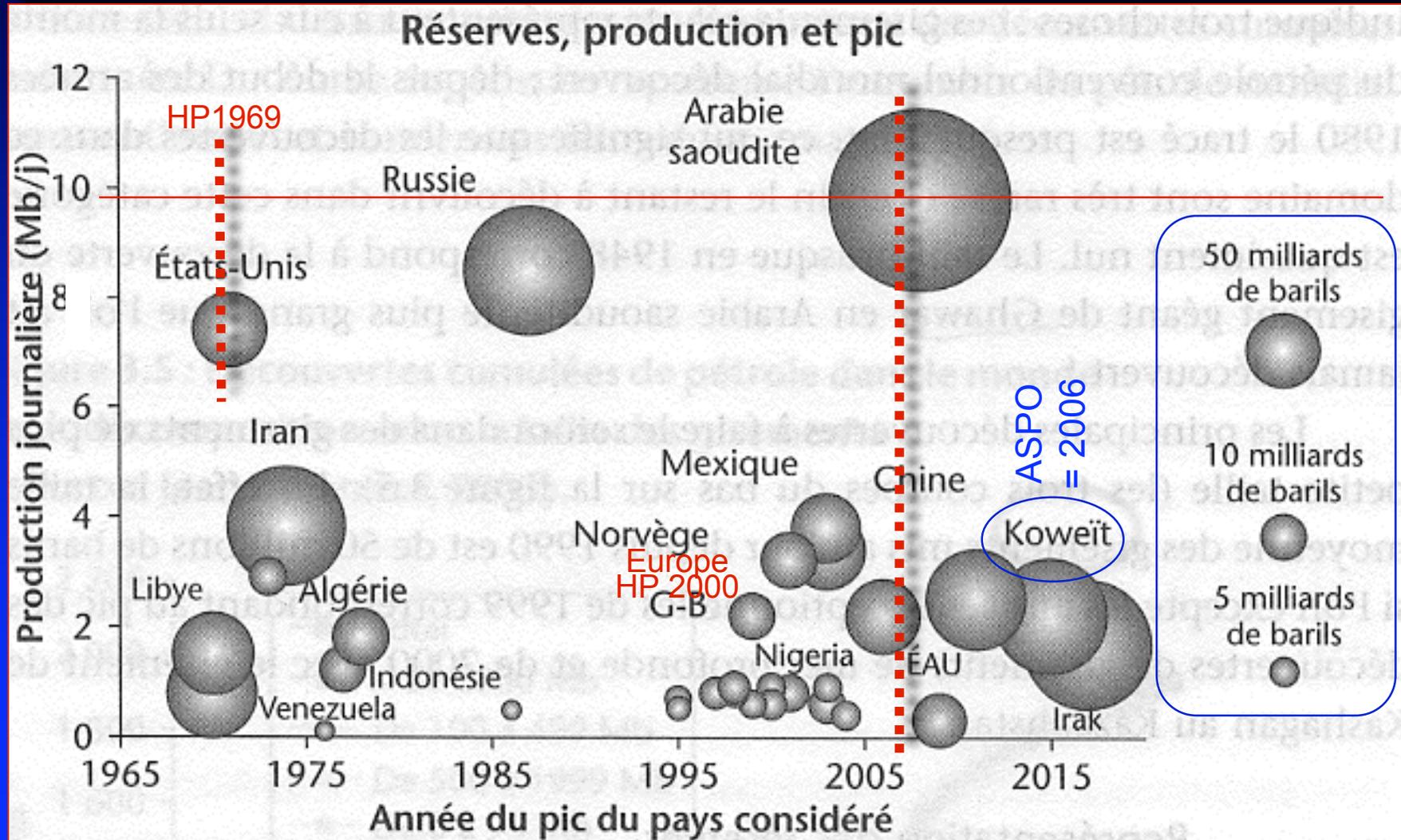


... mais attention! Réserves n'est pas égal à Production...

1965

Nb il existe 40000 accumulations, production 2006 à partir de 1001 CHAMPS

RESERVES DE PETROLE PAR PAYS [les 30 premiers] AVEC DATE DU PIC ET PRODUCTION JOURNALIERE

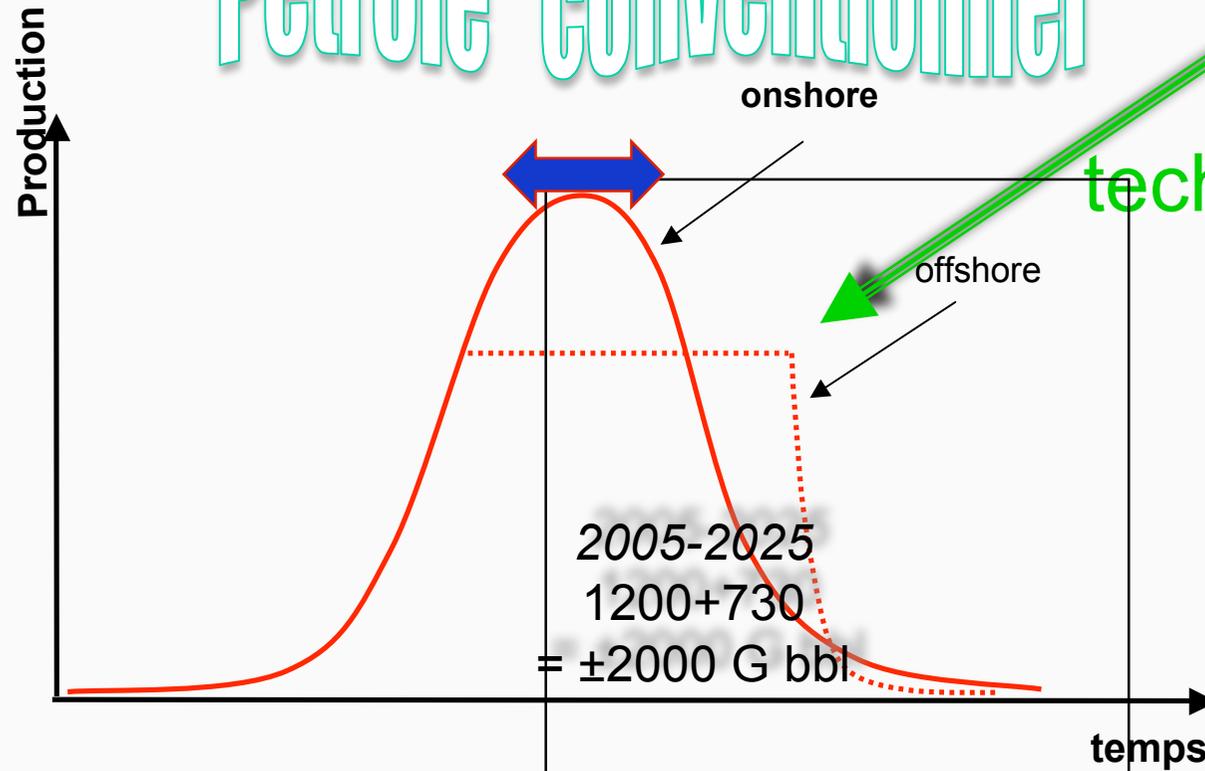


Campbell et BP, 2003

Réserves = Incertitudes Technologiques...

Production d'huile: la courbe en cloche

Pétrole conventionnel



progrès technologiques

Exemples: Forages Etendus et Forages Horizontaux

ultime

Planète $20G \text{ bep}$ $\times 10^3$

↓

10G c

↓

5 à 10G Récupérable

↓

Rés Prouv 2,2G

↓

Rés Prouv 1995-2025 1,2G bbl

↓

Croissance Rés Prouv 2005-2025 0,73G bbl $\times 10^3$

AIE 2005, IEO 2005 etc

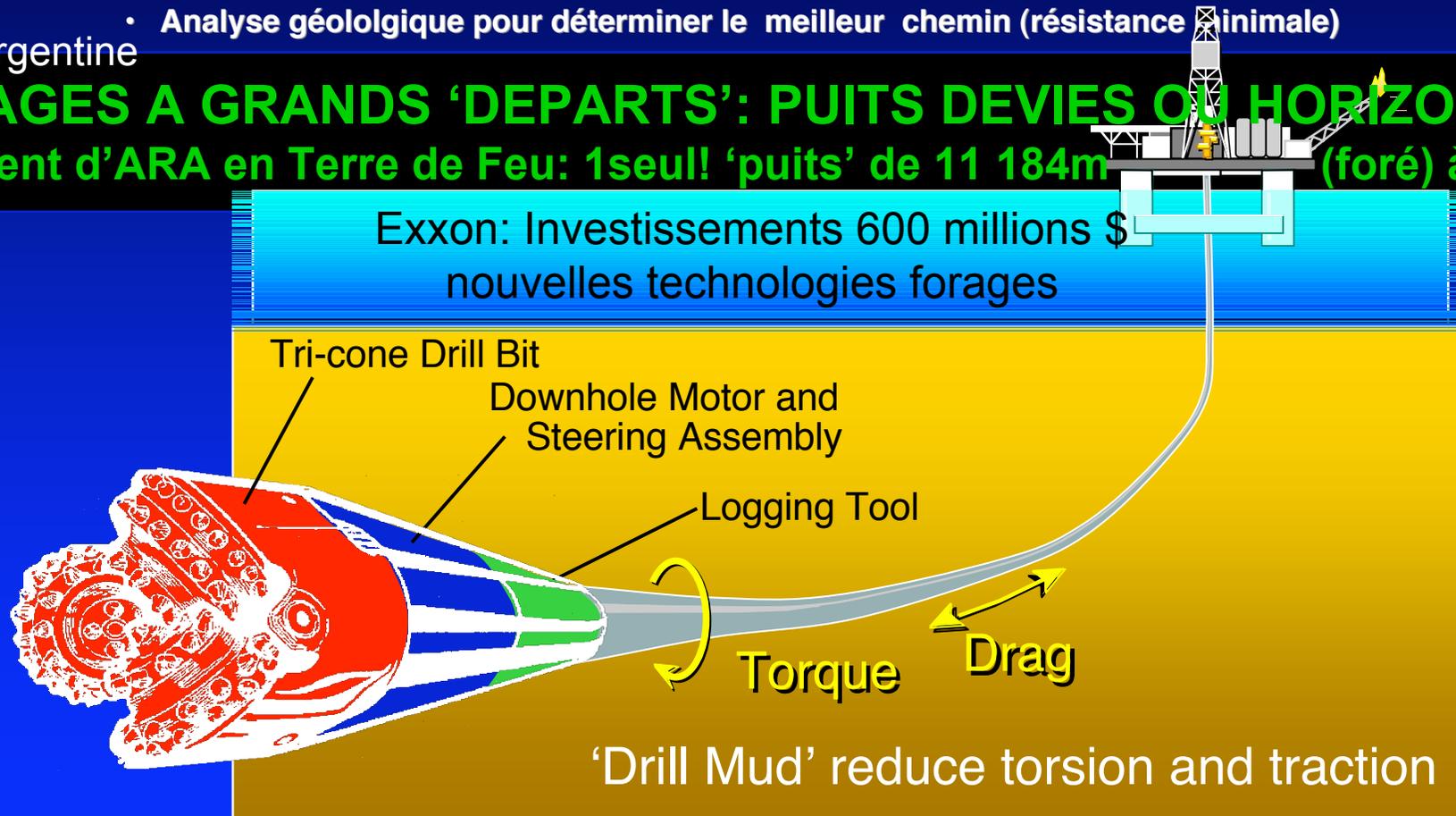
Forages 'Etendus' (directionnels ou hztaux)

La technologie permet des gains dans les puits plus difficiles

- Diminution de la friction
- Analyse géologique pour déterminer le meilleur chemin (résistance minimale)

1998-Argentine

FORAGES A GRANDS 'DEPARTS': PUIITS DEVIES OU HORIZONTALAUX
gisement d'ARA en Terre de Feu: 1 seul! 'puits' de 11 184m (foré) à 1 695m

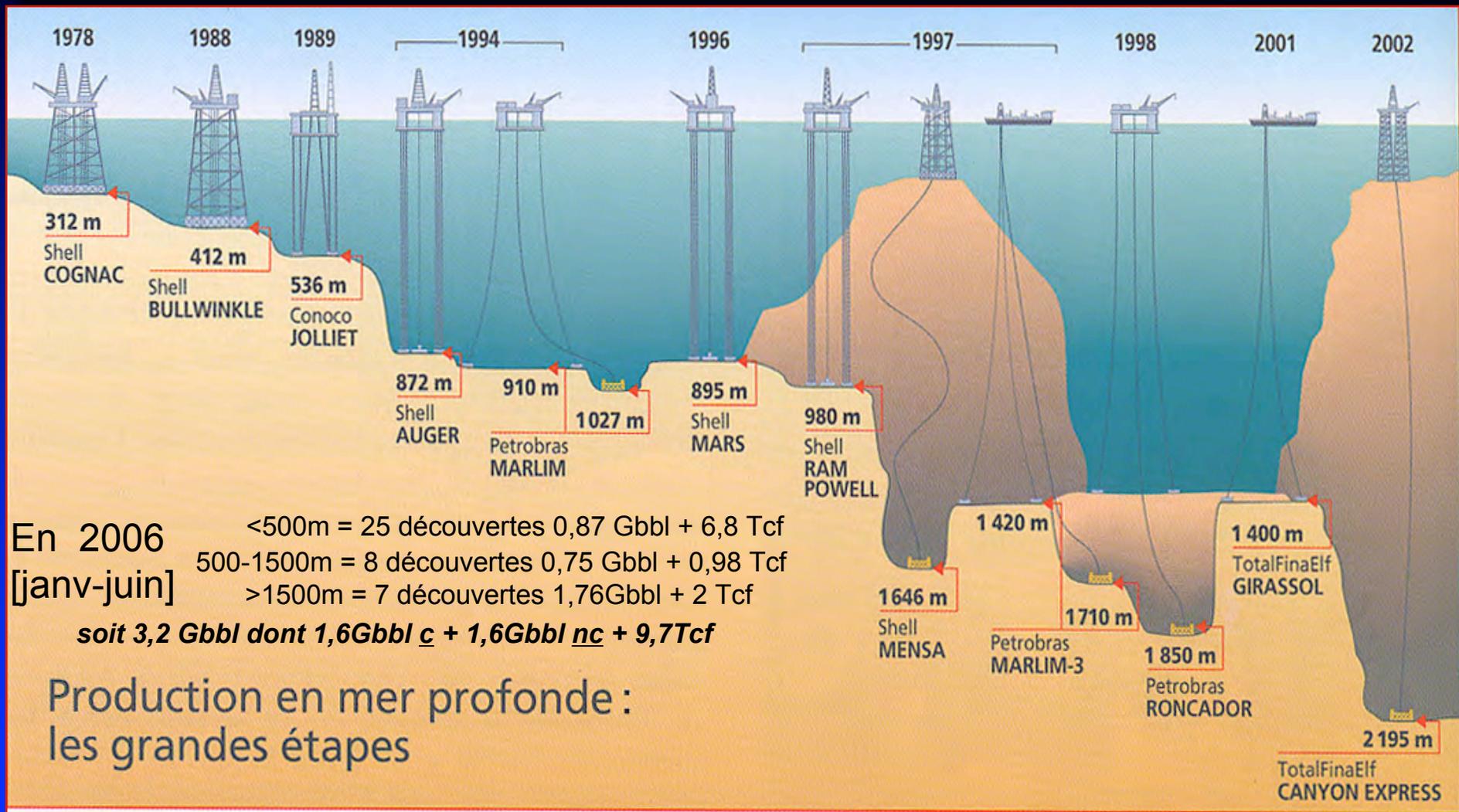


PREAT A Uib, Jette-St-Pierre 11.2008

1891? premiers essais ...

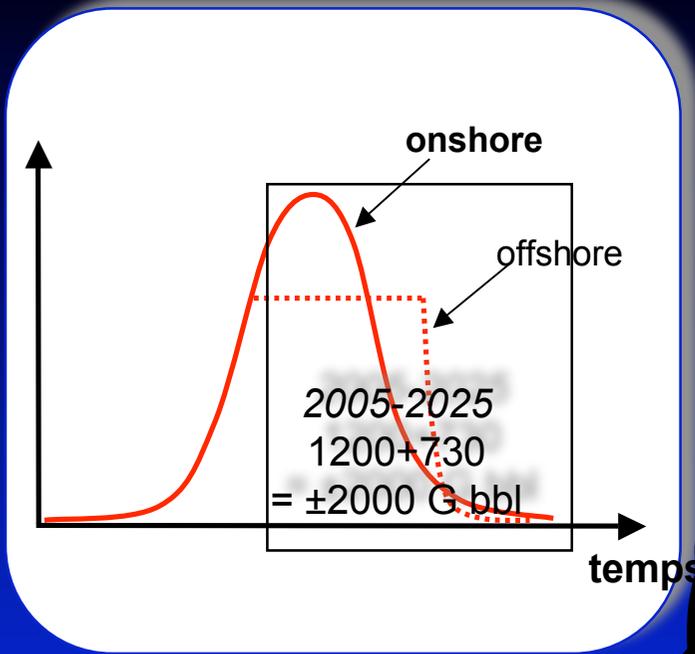
1985: premier puits [craie, USA]-1990 = 1500 puits [Monde]-2000 = ± 20.000 puits [id]

VERS L'ULTRA-PROFOND > 3000 m



Bauquis & Bauquis 2004

En 2000, l'offshore 'profond' >200m représentait 20%
En 1970, il représentait un peu moins de 5%



POURQUOI?
voyons les chiffres...



90-95%

...des réserves mondiales *PROUVEES*

PETROLE c

Réserves Prouvées
2004/2005
[±5%?]

Rés Prouvées	Oil Gb	%	Gas %
Arabie Saoudite	267,9	20,7	3,8
Canada	183,0	14,1	< 1
Iran	128,7	9,9	15,3
Irak	117,7	9,1	1,8
Koweït	101,3	7,8	< 1
Emirats Ar Unis	100,1	7,7	3,4
Venezuela	79,6	6,1	< 1
Russie	61,4	4,7	26,7
Libye	36,8	2,8	< 1

Rés Prouvées	Oil Gb	%	Gas %
Nigeria	25,6	2,0	2,8
USA	23,2	1,8	2,9
Chine	18,7	1,4	< 1
Mexique	16,0	1,2	1,8
Norvège	10,7	0,8	1,3
Algérie	8,7	0,7	2,5
Qatar			14,5
Australie			2,3
Indonésie			2,1





le marché réel = la production

Sur les 192 pays de la Planète, 30 produisent du pétrole significativement et seuls 17 d'entre eux exportent plus de 500.000 bbl/j ==> la géographie ET la politique limitent les choix. Les importateurs diversifient les approvisionnements, chacun à partir d'une dizaine de pays ou moins...

PRODUCTEURS

1. Arabie Saoudite 8,03 millions bbl/j **avec 1560 puits [2001]**
 2. Russie 7,05
 3. USA 5,80 **avec 563.160 puits [2001]**
Rendement moyen annuel d'un puits 1985: $2,2 \cdot 10^3 t$ soit 44bbl/j ou 0,08l/s **<0,1l/s**
 4. Iran 3,72 Rendement moyen annuel d'un puits 1985: $1514,5 \cdot 10^3 t$ soit 30.500bbl/j ou **56l/s**
- ...



[le plus grand champ du monde: Ghawar = 50% production Arabie S.]

PETROLE nc (taux de récupération 10 à 20%)

[±7000Gb Ultime]

Pétroles lourds 10-20°API = 23%

Sables bitumineux = 39%

Schistes bitumineux = 38%

Canada	36%
USA	32%
Venezuela	19%
Russie et 'satellites'	7%
Afrique	3%
Moyen-Orient	1%
Autres	2%

Données BP - 2005

OPEP = ±3/4 Pétrole c
NOPEP = ± 3/4 Pétrole nc
[Am N = 68% nc]

Moyen Orient + Russie = ±2/3 Gaz

[Producteurs Gaz 2008: 1 Russie, 2USA, 3Canada, 4 Iran]

2008
600Gbbi? récupérable
20 à 50 ans production
porosité 11-12%
Alberta: 600 cies (oil)
prix revient 2008: 40\$

scénario le plus probable du futur (P90)

	épuisement dans		Réserves ULTIMES = hors technologie et économie actuelles
PETROLE <u>c</u>	40 ans	min.	120-140
GAZ	70 ans		150-300
CHARBON	227 ans		<400
CLATHRATES	?		+nc 120-130

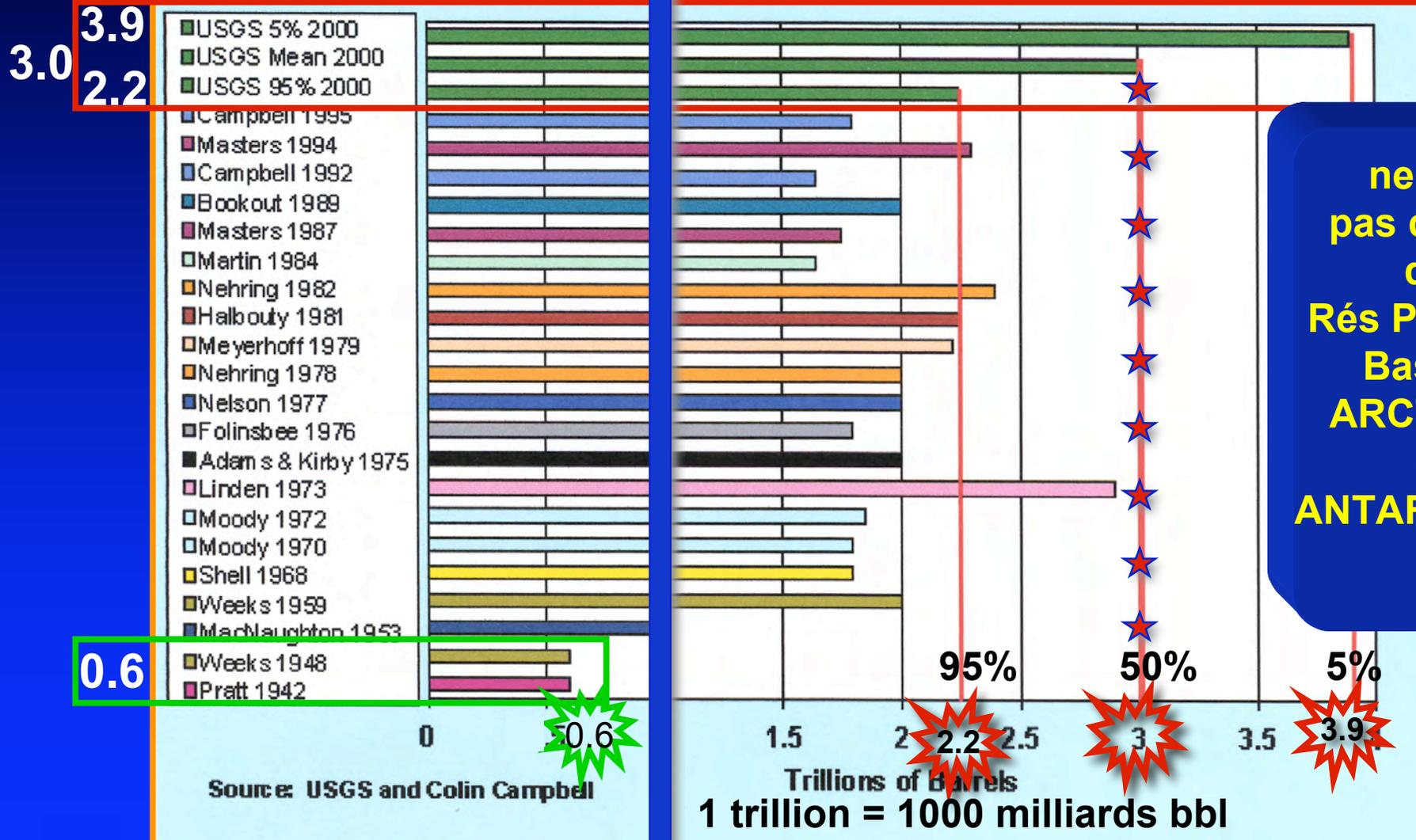
Bobin et al., 2001; Ngô, 2002

2000': les combustibles fossiles représentent, 80 à 90 % de la consommation d'énergie primaire commerciale mondiale

2006

==> USGS-EIA: scénario 'optimiste': H'P le +probable en 2037!

Published Estimates of World Oil Ultimate Recovery



ne tient pas compte des Rés Prouvées Bassins ARCTIQUE et ANTARCTIQUE

3.0
3.9
2.2

0.6

0.6

1.0

ASPO

**L'ANNEE 2010: LA PLUS SOUVENT AVANCEE
POUR LE PIC DE
LA PRODUCTION PETROLIERE c**
[Gaz ± 2030..., Charbon entre 2035 et 2055...]

ensuite c'est l'année 2020...

(USGS = 2037)

OPEP
'MAJOR'



K Deffeyes (U. Princeton, expert pétrolier à la suite de K Hubbert)
Thanksgiving Day 2005 EST LE JOUR du pic pétrolier mondial
avec 1000,6 G bbl produit depuis le début de l'ère du pétrole!

CANADIAN (TAR) OIL SANDS : 1750 Gbbl ultimes

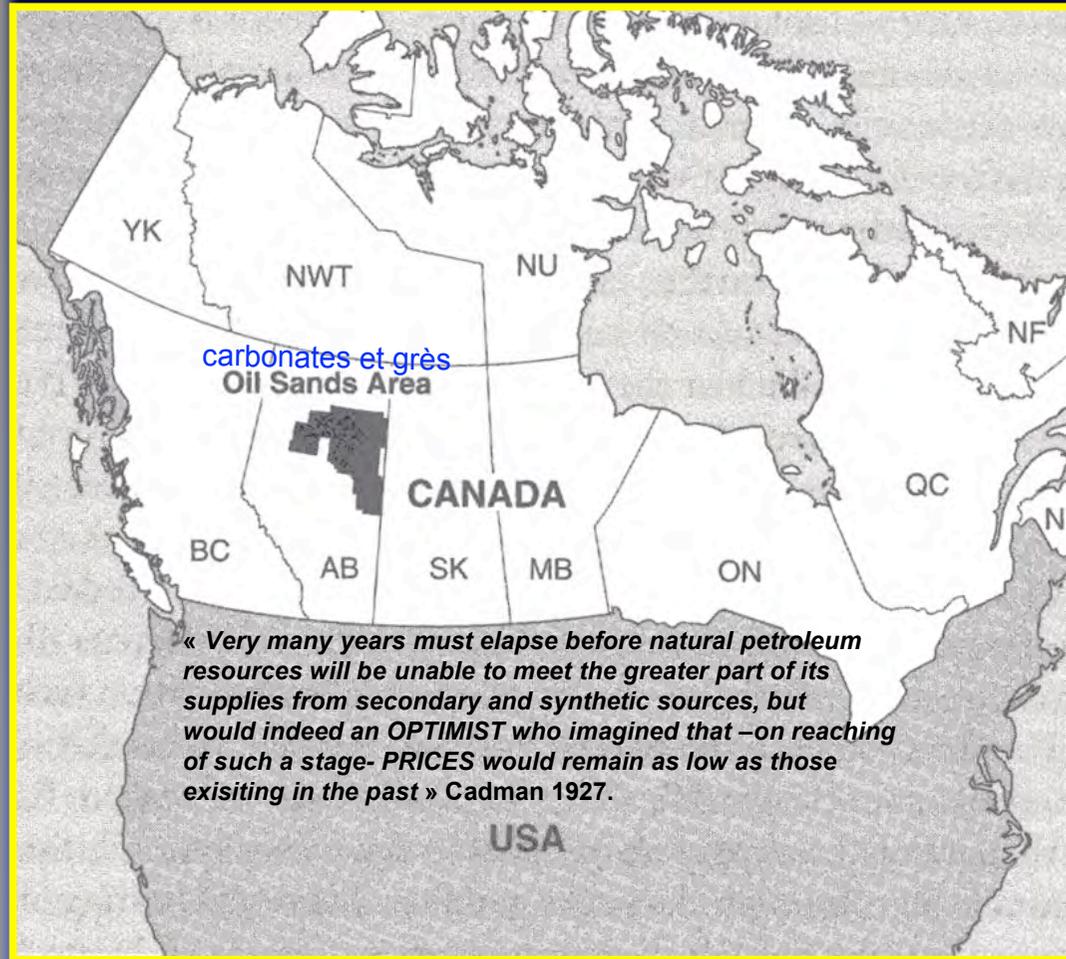
ATHABASCA, FORT McMURRAY, COLD LAKE, PEACE RIVER -ALBERTA

2004
US Dept of Energy
reconnait
des réserves
de
200 G bbl oil
=
seconde plus
grande
accumulation
après
Arabie S

vrai si bbl > 35 \$
crise financière
2008 > 80\$?

2008

?600G bbl ultimes réc
11-12%, 20 à 50 ans
Sface > Belgique
600 cies



Sir John CADMAN's prophecy,
chairman of Anglo-Persian
Nov 2 - 1927

1927
Cadman's
Prophecy
=
?
c ==> nc

+? Biofuels USA
+? Chine >30
réact. nucléaires
+? LNG Japon...

this predates Hubbert's work by 30 years...!

Investissement : 70G \$ sur 10 ans
Prospective: 3,0 millions bbl/j en 2015 [auj = 1,0 M bbl/j]
Nb Venezuela: idem [oil sands] mais politiquement incertain...
Nb USA: oil shales Colorado & Utah...

CLASSEMENT DES PAYS PAR LEUR POTENTIEL ENERGETIQUE

* = pétrole lourd, ** = sables bitumineux,
 ° = chiffres modifiés par l'auteur

	Rés en Gtep =>	Pétrole	Gaz	Charbon	U	total
1	Etats-Unis	3,8	4,7	122,0	3,2	133,7
2	Russie	8,2	42,8	68,7	1,6	121,3
3	Chine	2,4	1,4	58,9	0,1	62,9
4	Inde	0,7	0,7	55,6		57,0
5	Venezuela	11,2°+41*	4	0,3		56,5
6	Australie	0,4	2,3	41,6	8,6	52,9
7	Afrique Sud			33,0	3,4	36,4
8	Canada	0,9+ 25**	1,5	3,3	4,0	34,7
9	Kasakhstan	1,2	1,7	21,7	7,9	32,5
10	Arabie Saoud.	25,1°	5,7			30,8

Renardet 2004
 Source: BP, Rev annuelle sur l'énergie et OCDE

11 Allemagne (surtout charbon), **12 Iran** (surtout gaz), **13 Ukraine** (charbon), **14 Irak** (pétrole), **15 Pologne** (charbon) **16 Qatar** (gaz), **Total n°18** **17 Koweït** (pétrole), **18 Emirats arabes** (pétrole-gaz). ← **= 10,4**

ANALYSE DES DONNEES DU TABLEAU

- 1. Les Etats-Unis ont EGALEMENT l'avantage de la technologie et de l'efficacité dans les techniques d'exploitation
La Russie a L'AVANTAGE de la diversification dans ses sources**
- 2. Trois pays européens sont riches en charbon (All, 'Ukr', Pologne)**
- 3. Quelques pays (Australie, Kazakhstan, Canada) ont des réserves assez diversifiées AU CONTRAIRE du Venezuela**
- 4. Le Moyen Orient a des ressources énergétiques assez élevées, MAIS constituées exclusivement d'hydrocarbures.**

RESUME ET SCENARIO PROBABLE A COURT TERME

1. 50'-60': période d'abondance du pétrole
2. 80' : cohabitation du pétrole avec d'autres sources d'énergie
= période d'abondance relative
3. 2010 : transition conventionnel - non conventionnel (nc)
Nb le coût de production des pétroles nc diminue
de 0,5-1\$ bbl/an!

la plupart des Cies pétrolières évaluent la rentabilité de leurs investissements sur base d'un bbl à 18 \$, et même à 16 \$ pour BP, en 2005

SCENARIO PROBABLE A MOYEN TERME = XXIè s

1. Optimiser la production dans les zones matures

auj: 70% prod. mondiale = champs mis en production il y a > 20ans
(sismique 4-D, ré-entrées par drains hztaux)

2. Champs marginaux et satellites situés à proximité des connus

auj: on profite des infrastructures existantes + gisements difficiles HP/HT

3. Offshore profond et ultraprofond

• profond = >500m, 30% prod. mondiale en 2004 avec 2000 puits, 30.10⁶km²,
seulement 5% de permis,
TRIANGLE D'OR: BRESIL-MEXIQUE-ANGOLA(NIGERIA), 80% RR identifiées
par 500-1500m d'eau

• ultraprofond = 1500-3000m (300bars), 8% prod. mondiale en 2010?,

4. Zones arctiques (polaires)

5. Pétroles NC

sables asphaltiques (bitume) et huiles extralourdes = oxydation bactérienne
+ schistes bitumineux = MO incomplètement transformée

====> taux de récupération 2004 = 8% ====> ?25% en 2020

====> en 2004: différence prod. bbl Mer du N et huiles nc Orénoque = 3\$/bbl

TECHNOLOGIE...

Exemples 'historiques'

1. au milieu des années 1980, le coût technique de production d'un bbl de pétrole en mer par > 200 m de fond était estimé à 13-15\$

==> en 2005 = 5 à 7\$

2. Le taux de récupération qui ne dépassait pas 20% dans les années 1960 est maintenant de 30%. Le passage de 30 à 38%, réalisable dans les 25 années à venir permettrait d'accroître les réserves de 500 G bbl

... soit l'ordre de grandeur

de l'ensemble des réserves détenues par l'Arabie Saoudite...!

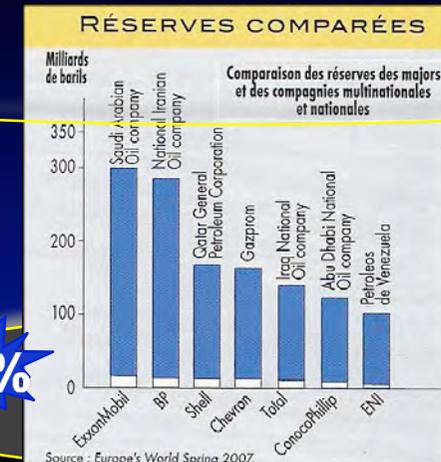
etc...

MOYEN TERME

'Force de frappe des *majors* (multinationales)'

		G \$ [2002]
1	Wall-Mart USA	distribution 233,3
	ExxonMobil USA	pétrole 191,7
	General Motors USA	automobile 178,2
	Royal Dutch Shell PB/UK	pétrole 171,2
	BP UK	pétrole 170,5
	Ford USA	automobile 155,1
	Daimler-Chrysler AI/USA	automobile 149,5
	General Electric USA	conglomérat 125,6
	Toyota Jap	automobile 119,8
	Mitsubishi Jap	automobile 103,0
	Total France	pétrole 102,5
	Mitsui Jap	chimie 102,3
13	Chevron Texaco USA	pétrole 94,0

in A Nonjon 2007



10%

Les 5 premières Cies mondiales d'HC
= ±1000 G \$

• => 10è PIB mondial

- Shell plus puissant que l'Autriche (n°20)
En 2006: Exxon-Mobil = major 1
avec 450 G \$ (>PIB Belgique ±393 G \$)
> que le PIB de 160 à 180 sur 195 Etats
siégeant à l'ONU (suivant liste)

en 2004 : les 15 premières Cies pétrolières
avec > 1500 G \$ environ le PIB Chine (n°7)





CONCLUSION

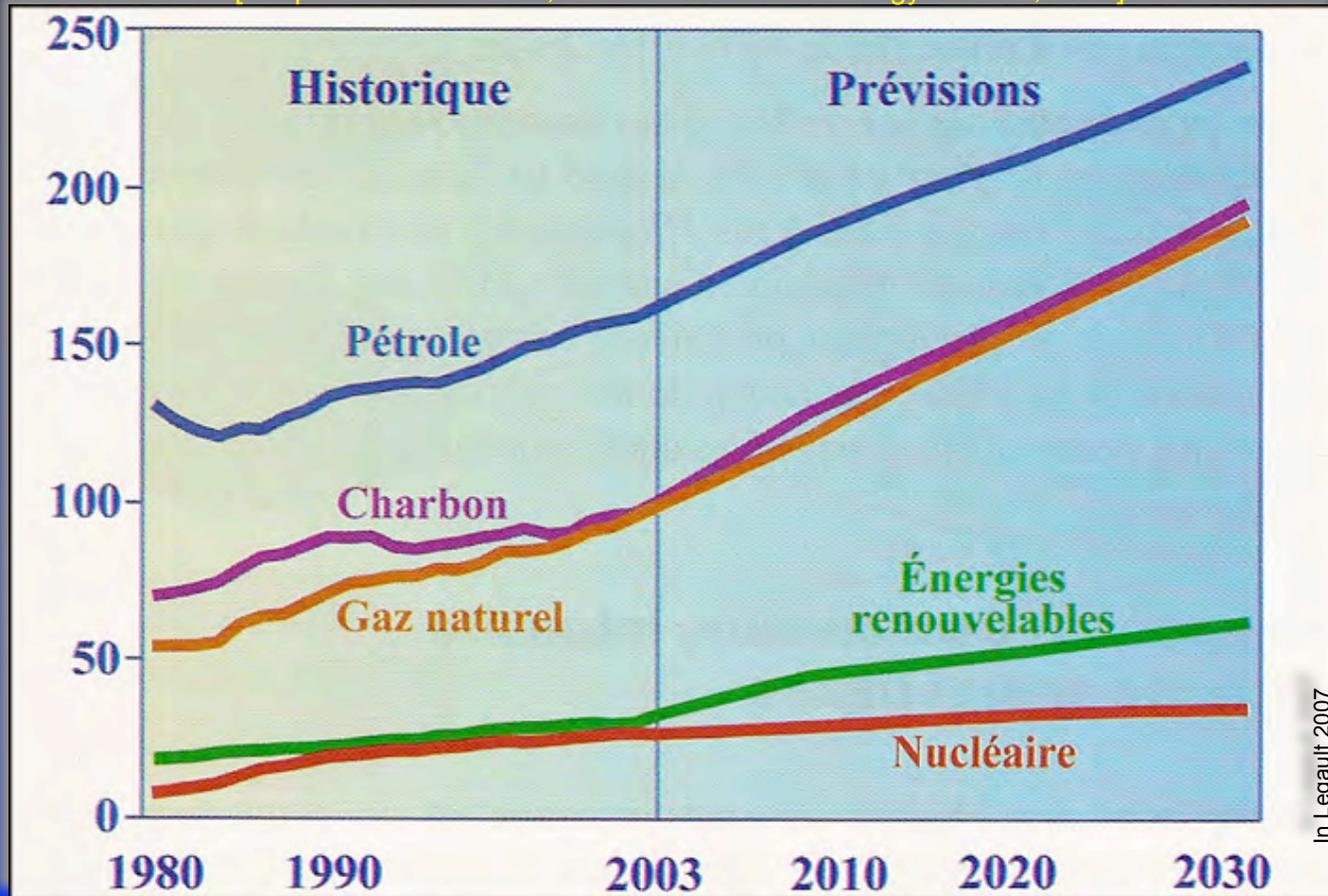
**LE XXIème SIECLE DEVRAIT VOIR LE PIC
PUIS LE DECLIN DE LA PRODUCTION
PETROLIERE MONDIALE, MAIS CE DECLIN
SERA PROBABLEMENT TRES PROGRESSIF
CAR IL S'ACCOMPAGNERA DE HAUSSES DE
PRIX QUI PERMETTRONT D'EXTRAIRE
NOUVELLES RESERVES A PARTIR DE
RESSOURCES DEJA DECOUVERTES**



<http://www.peakoil.net>

CONSOMMATION MONDIALE ENERGIE PRIMAIRE

[en quadrillions de BTU, EIA et International Energy Outlook, 2006]



In Legault 2007

AUJ. 2008

1. RETARD D'INVESTISSEMENT

[Raffinage...]

2. DEMANDE DURABLE

[Croissance soutenue pays émergents, Chine, Inde...]

3. INSTABILITE Z. PRODUCTRICES

+ 71 %

en

27 ans

... avec les 2/3 = pays en voie de développement



2,2 G VOIS/2007

Chine... 150 aéroports
Malaga... 400/j

le mot de la fin...

'Toute personne croyant qu'une croissance exponentielle peut durer indéfiniment dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste'

Kenneth Boulding

1910-1993

President de l'American Economic Association