

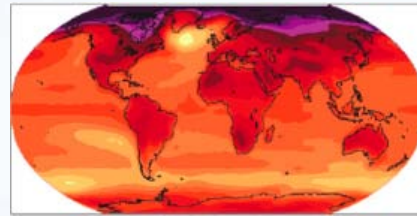
# Éléments de base sur l'énergie au 21<sup>e</sup> siècle



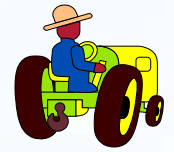
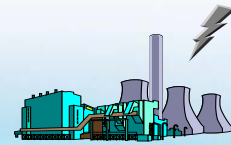
**Jean-Marc Jancovici - ENSMP 2010**

**Partie 2 - Pétrole apocalypse ou carbon paradise ?**

# L'ère du feu, croissance à gogo et 2 questions...

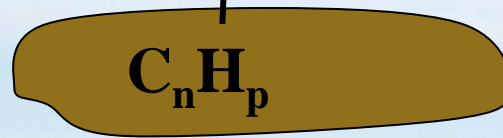


???

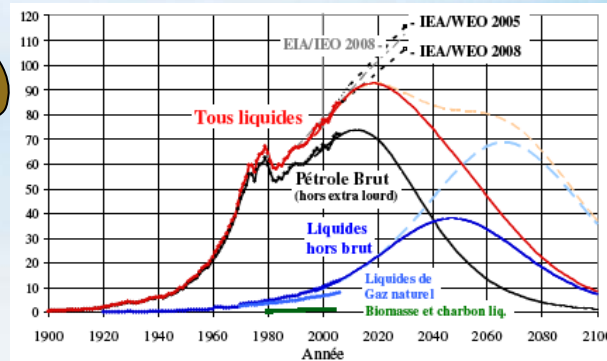


**Structure actuelle des métiers, loisirs et vacances, études longues, santé, retraites, mondialisation, concentration urbaine et banlieues étalées...**

O<sub>2</sub>



C<sub>n</sub>H<sub>p</sub>

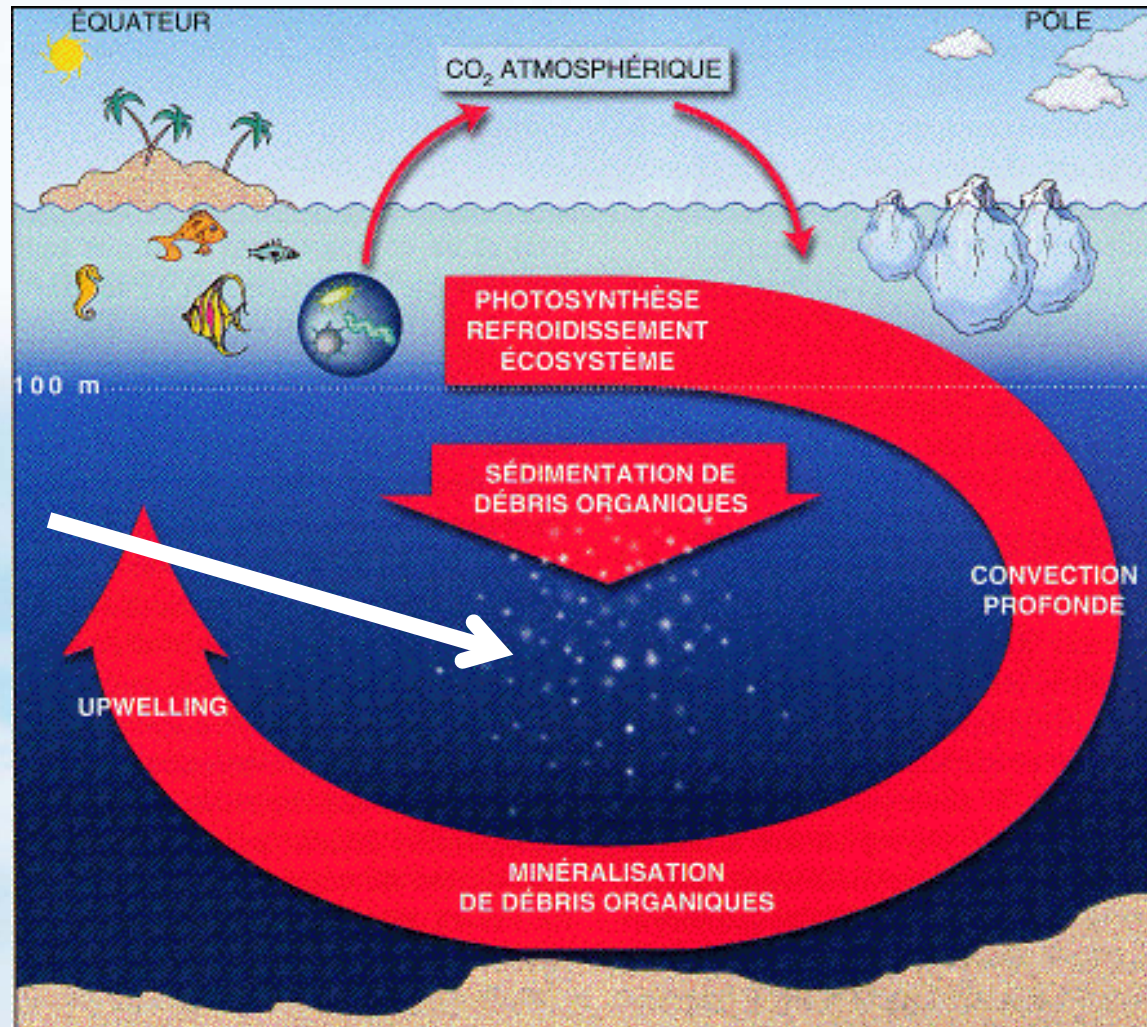


???

# L'aventure du pétrole commence à la plage ou presque

**Futur pétrole**

**Il faut juste attendre 10 millions à 1 milliard d'années !**

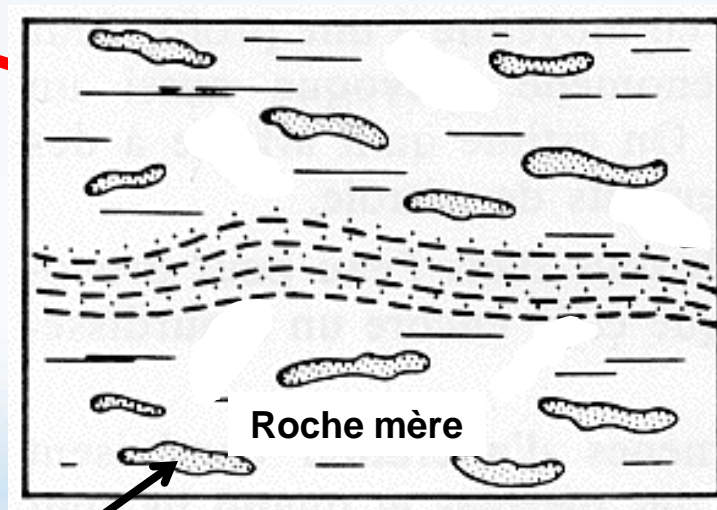


**1% des débris  
sédimentent**

# Le pétrole aime la cuisson à petit feu

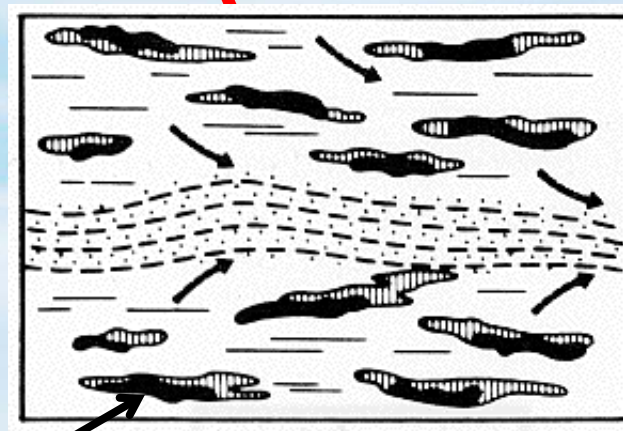
**Tectonique**

+ 0,5 à 20°C  
par million  
d'années



50 à 120 °C : dégradation  
bactérienne  
(biochimique) avec  
expulsion d'eau et de  
CO<sub>2</sub>, et formation de  
**kérogène**

Matière organique  
incluse dans le  
sédiment



Un peu plus chaud :  
pyrolyse du kérogène,  
avec expulsion d'huile  
(pétrole) et de gaz  
(méthane)

Il reste du  
carbone sans  
hydrogène : du  
charbon

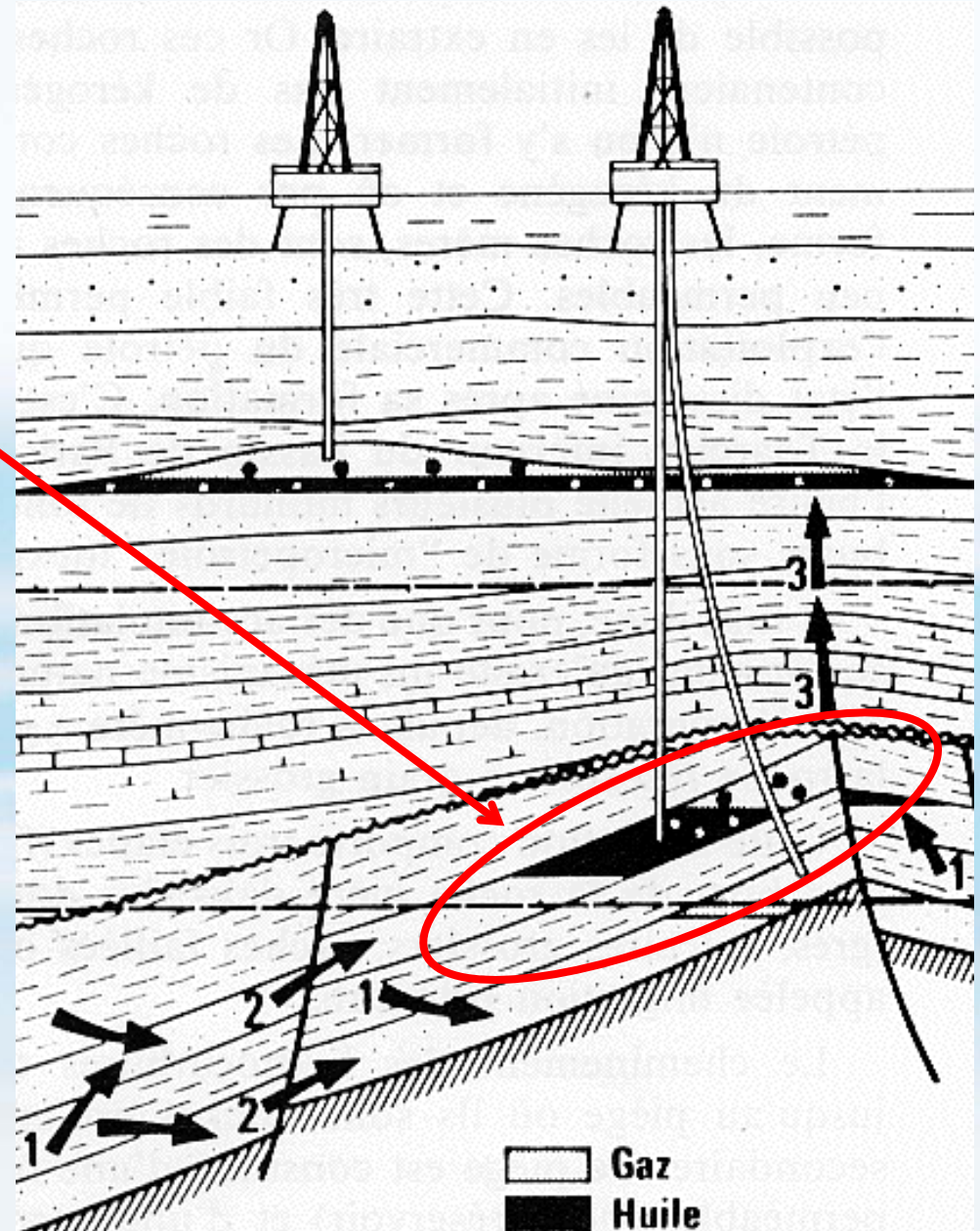
# Le but du jeu, c'est de piéger l'autre

## Piège

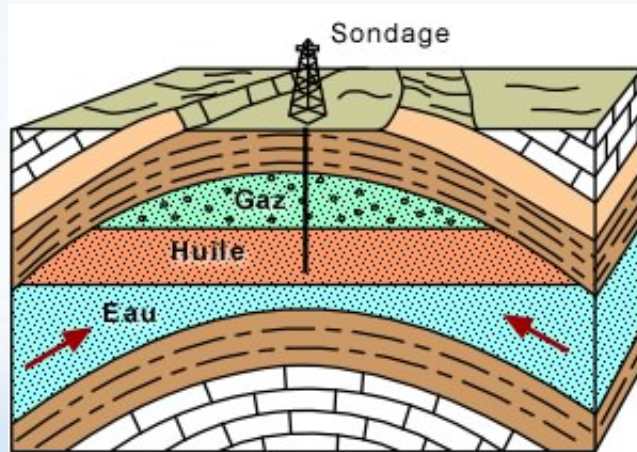
Accumulation d'eau,  
de gaz et d'huile,  
dans une **roche**  
**réservoir**

2 - migration secondaire  
(cheminement vers la surface)

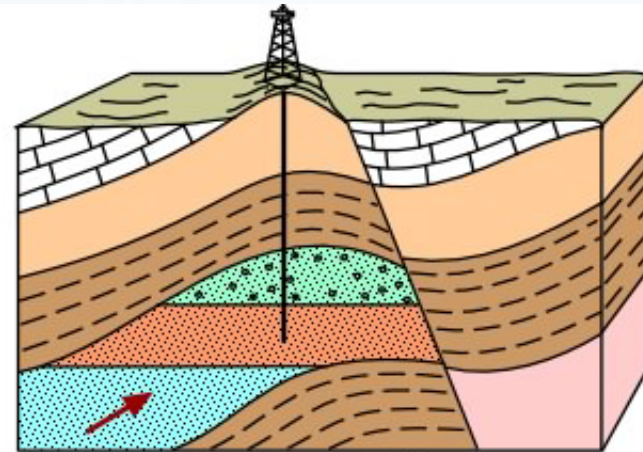
1 - migration primaire (expulsion de  
la roche mère)



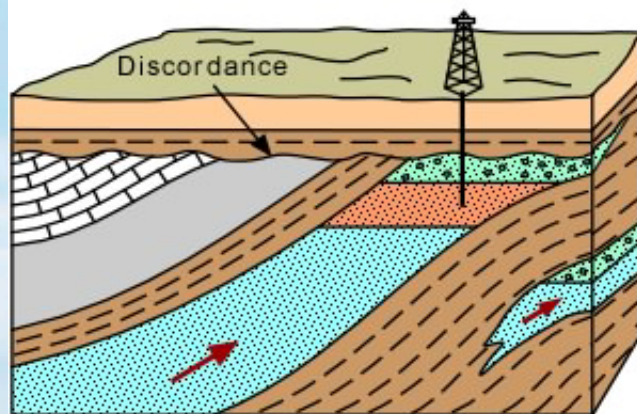
# On peut être piégé de plusieurs manières



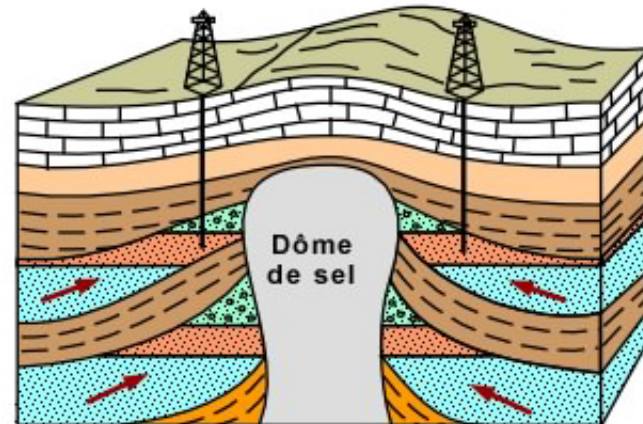
A - Piège structural: anticlinal



B - Piège structural: faille



C - Pièges stratigraphiques:  
discordance et biseau sédimentaire

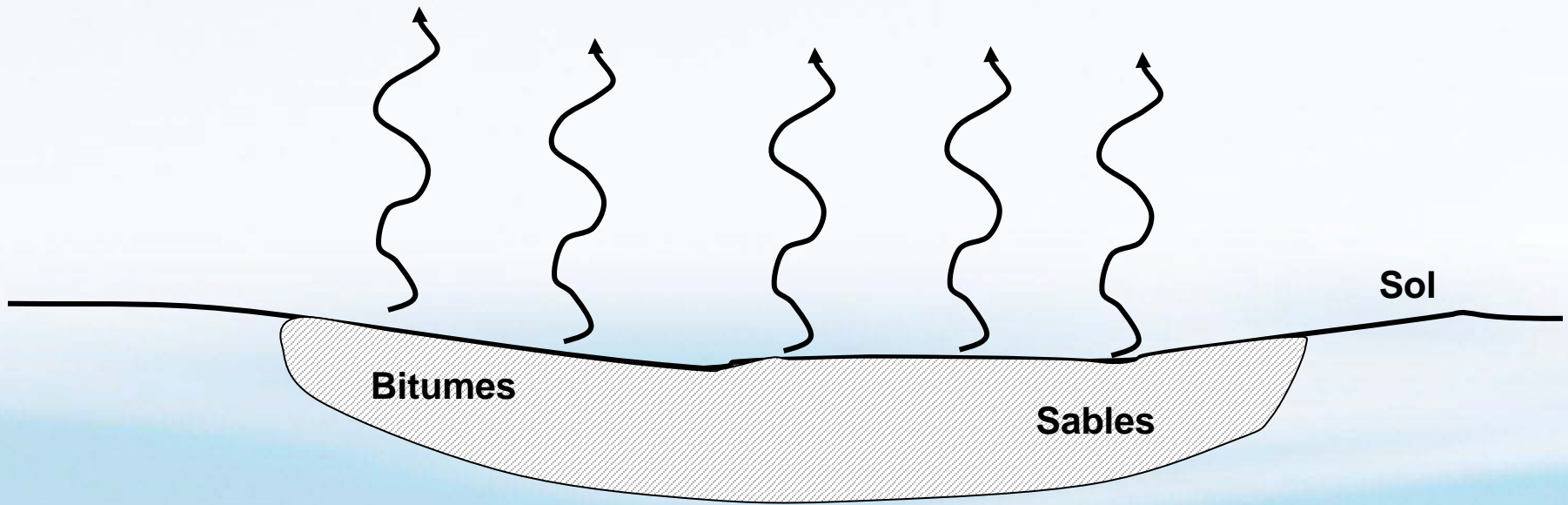


D - Pièges mixtes associés à un diapir

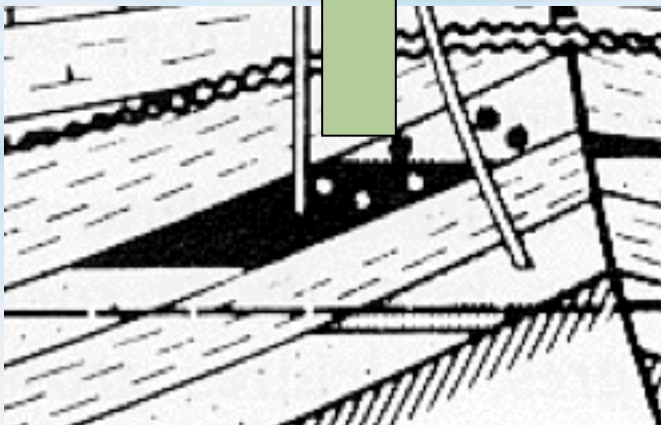
## Divers types de pièges.

**Source :** [http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete\\_terre.html](http://www.ggl.ulaval.ca/personnel/bourque/intro.pt/planete_terre.html) (meilleur site de vulgarisation sur la géologie de toute la netosphère).

# Le lendemain de cui...sson est parfois pâteux

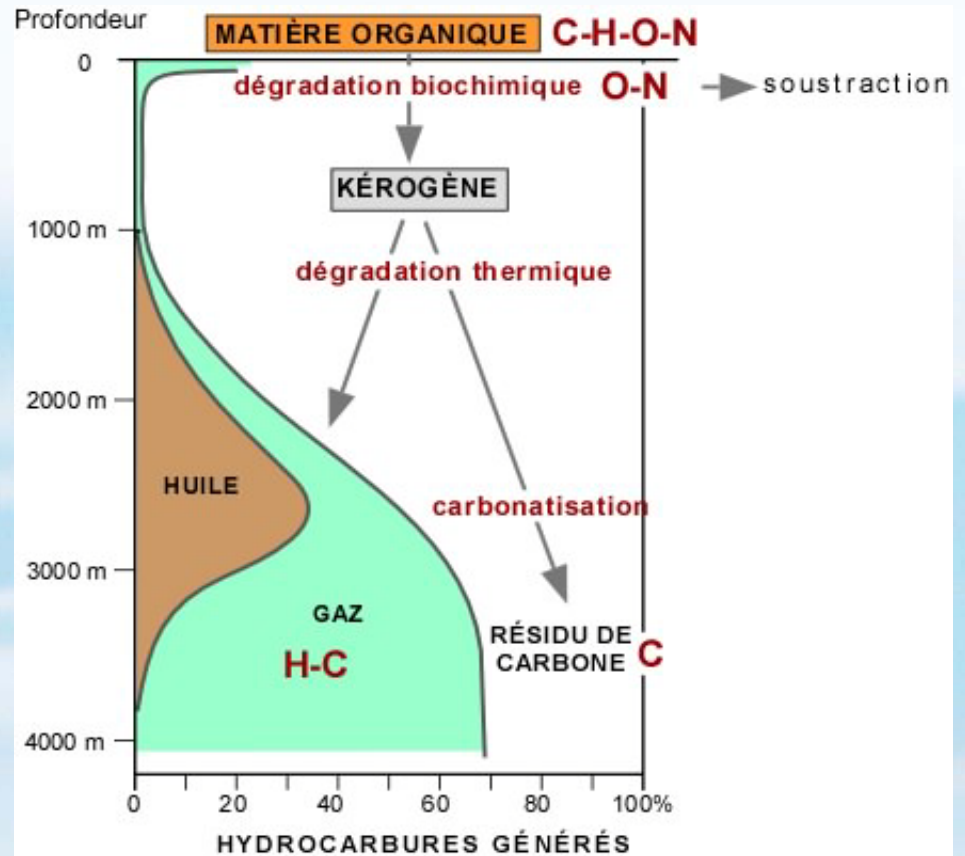
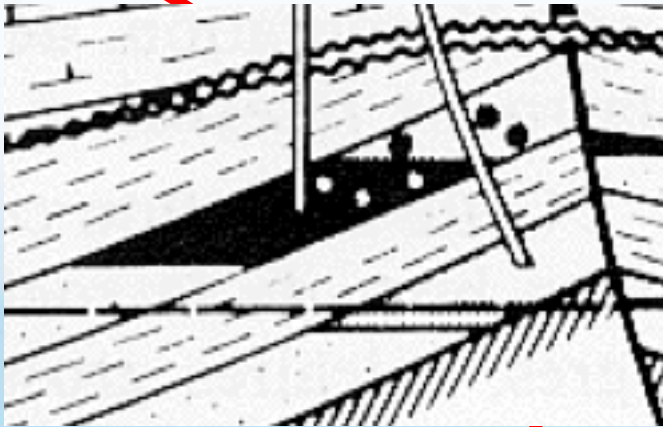


Migration



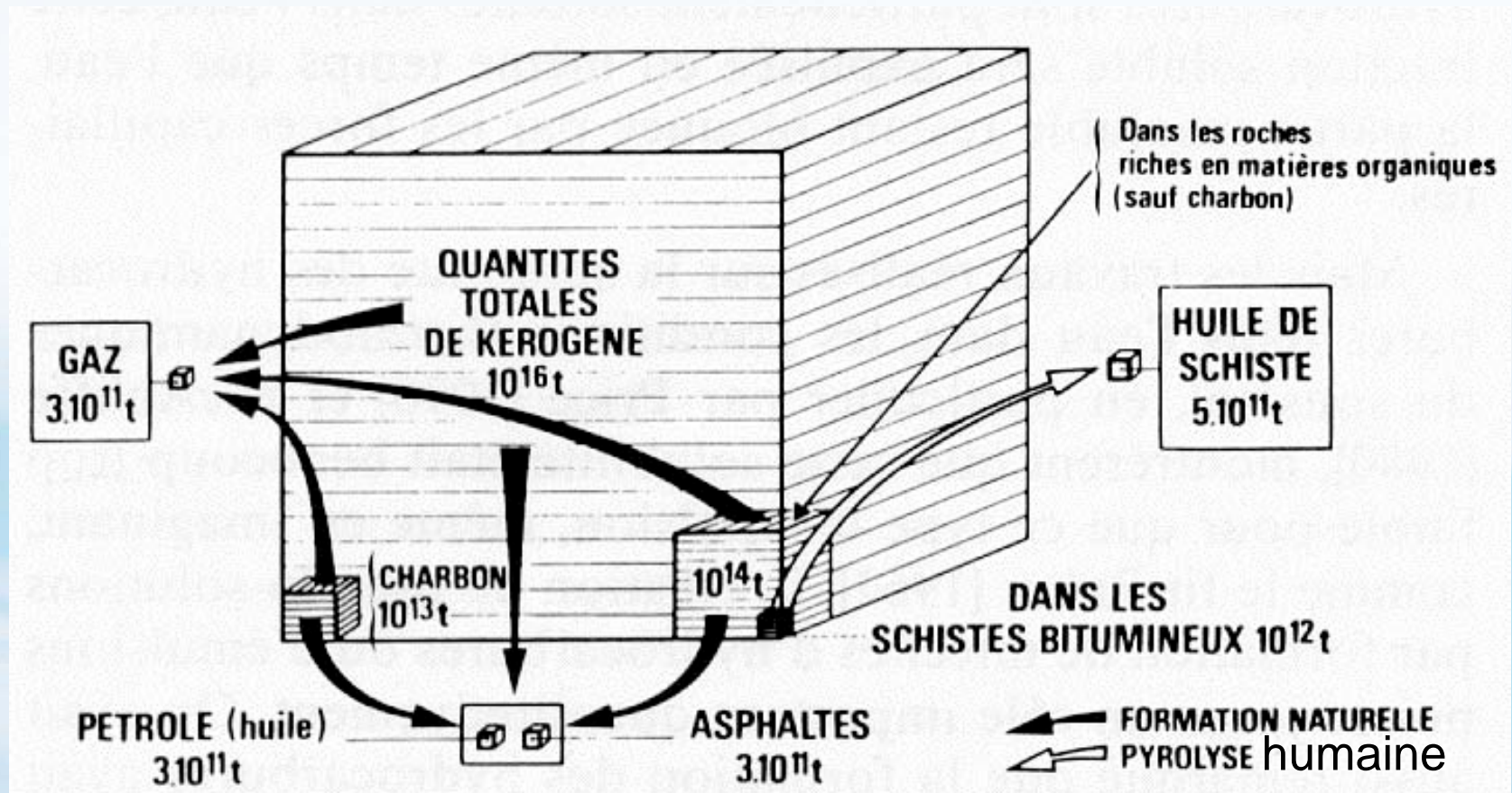
**Au Canada (sables bitumineux) nous avons du pétrole « plus vieux que du pétrole »**

Tectonique





# Du plancton à l'huile, une sélection plus sévère qu'à ENSMP



Etat des stocks de carbone d'origine organique dans la lithosphère. Le pétrole, c'est 0,00001% de la matière organique qui a vécu au moment de la sédimentation.

Source : les voies et les mécanismes des transformations des matières organiques sédimentaires au cours de l'enfouissement, Bernard Durand, Mem. Soc. Geol. France, N.S., 1987, pp 77-95

# Le pétrole sous terre : réserve or not réserve ?

Un « réservoir » de pétrole met  $\approx 100$  à 1000 millions d'années à se former

Il s'agit en fait d'une formation géologique plus ou moins poreuse, inégalement imprégnée de liquide visqueux, avec en général 3 « étages » : gaz, huile, eau.

La proportion d'huile dans la roche (en poids) est typiquement de quelques % à quelques dizaines de %

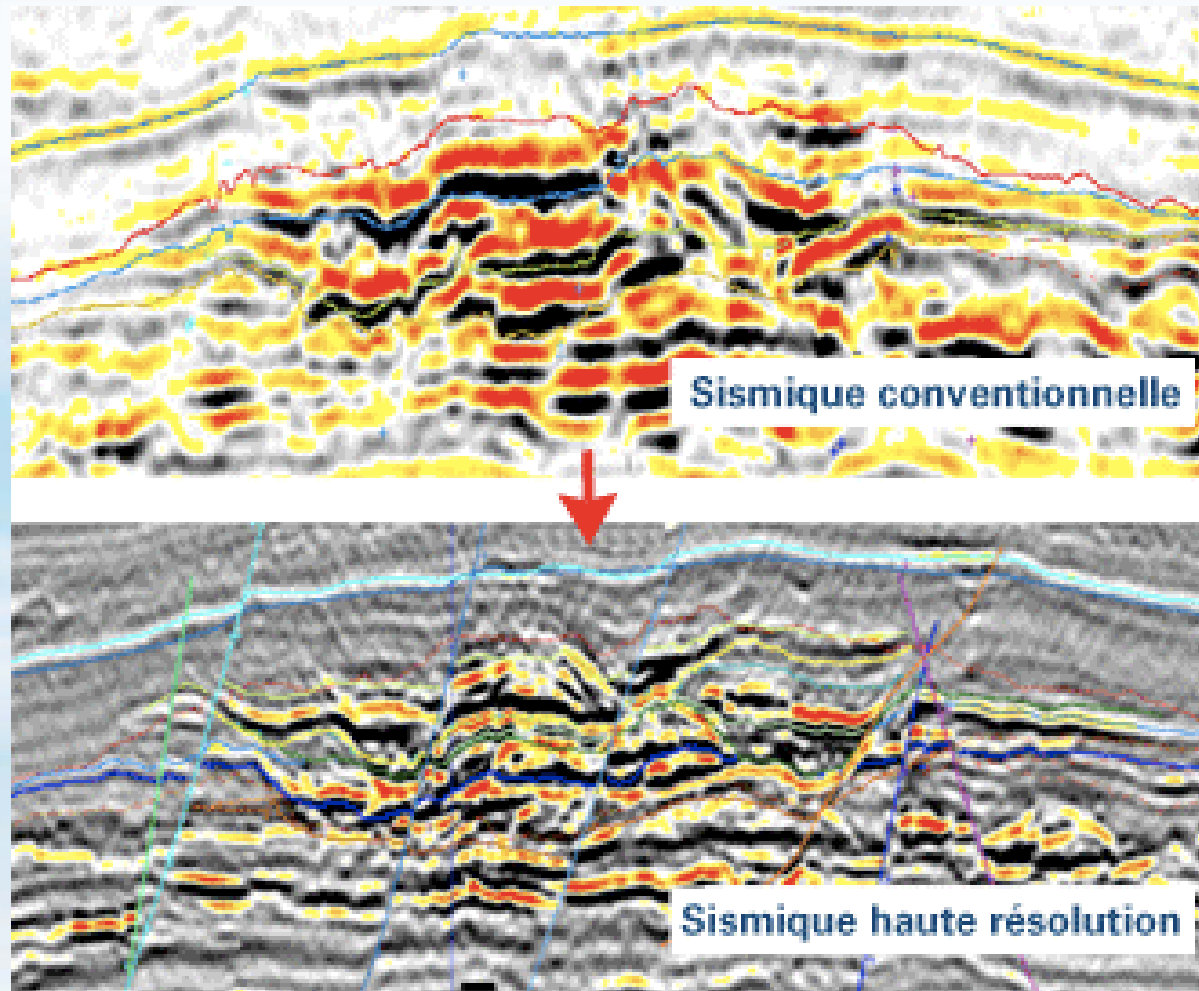
Le pétrole contenu dans la roche s'appelle du pétrole « en place ». Tout ne sortira pas.

En première approximation, plus le réservoir est situé profond sous terre et plus la fraction de gaz est élevée

Un pétrole « plus vieux que le pétrole », c'est du bitume

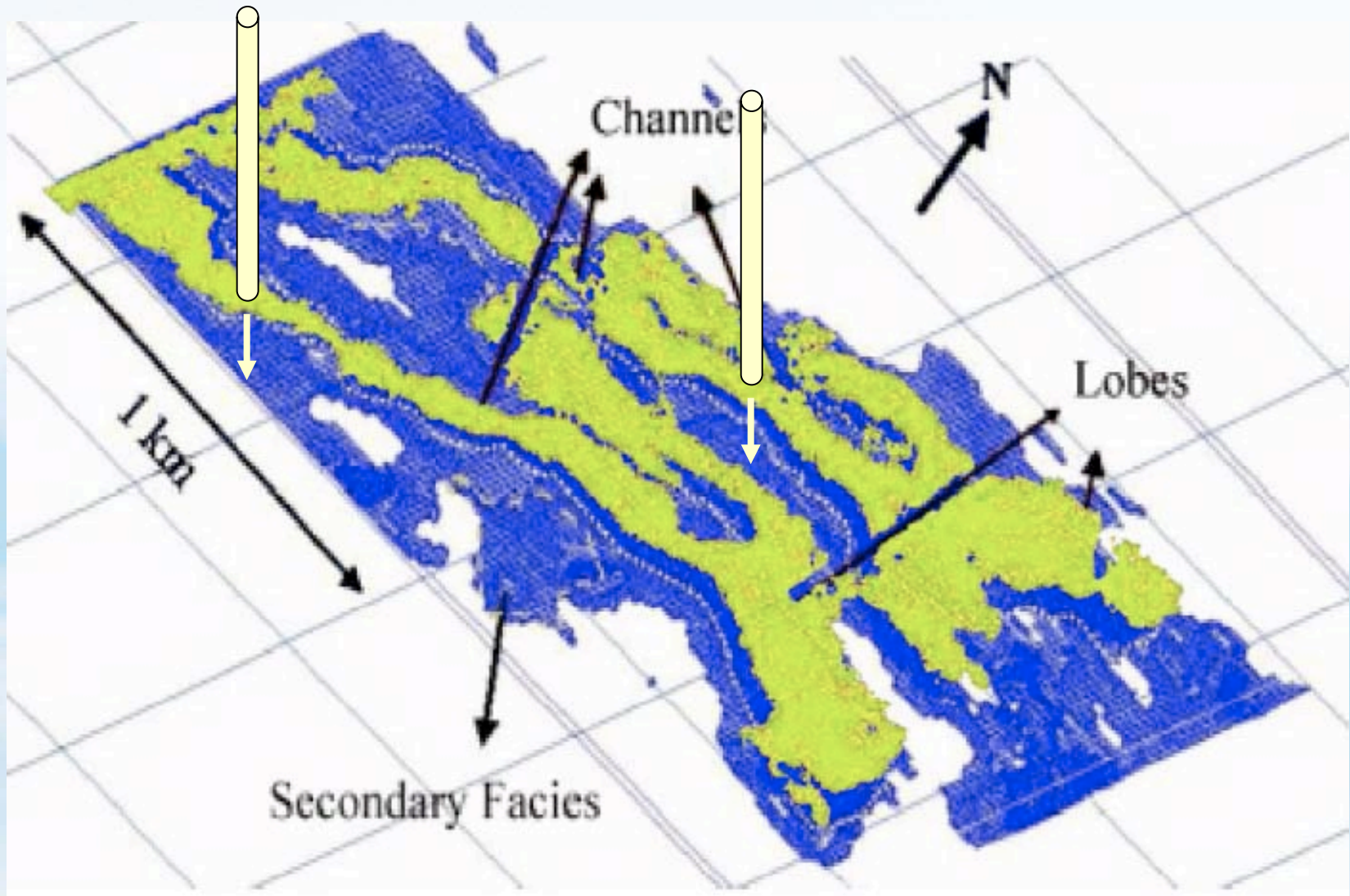
Les schistes contiennent quelques % de pétrole « plus jeune que le pétrole ». En général le rendement énergétique de l'ensemble « extraction+pyrolyse » est  $< 1$

# Plus dur que le sexe d'un bébé : combien de pétrole ?



**Exemple d'image obtenue avec de la sismique**

# Un réservoir de géologue n'est pas celui d'une auto...



Un exemple de réservoir, reconstitué sur ordinateur à partir d'analyses sismiques

Le pétrole en place dans la roche réservoir, qu'il soit extractible ou non, s'appelle une **ressource**. Cette quantité n'est jamais connue avec précision au moment de l'exploration (ni même après parfois), car elle va dépendre :

Du volume de la roche réservoir (qui a rarement une forme simple)

De sa porosité (qui varie d'un point à l'autre du réservoir)

De la distribution de l'huile (qui peut très fortement varier au mètre près)

De la viscosité de l'huile (qui peut aussi varier)

La **ressource** peut être déjà découverte ou non. Une découverte ne « crée » pas de pétrole, elle permet simplement de savoir où il se trouve !

Une fois découvert, le gisement peut être en cours d'exploitation, en développement (les investissements sont en cours), ou rien de tout cela.

Il n'est pas toujours simple de savoir si de multiples forages « positifs » dans une même zone appartiennent à un même réservoir qui communique de bout en bout, ou à plusieurs réservoirs, géologiquement séparés

# Les joies de la nomenclature (bis)

Pour un gisement - ou réservoir - donné, la **réserve prouvée** correspond à la quantité d'huile qui est **extractible avec certitude** ( $P > 90\%$ ), **aux conditions techniques et économiques du moment**.

Toutes choses égales par ailleurs :

Elle varie avec la réévaluation du réservoir

Elle augmente avec les progrès techniques

Elle varie avec le prix, mais peu (limite énergétique)

Elle diminue avec le temps quand tous les autres paramètres sont stables

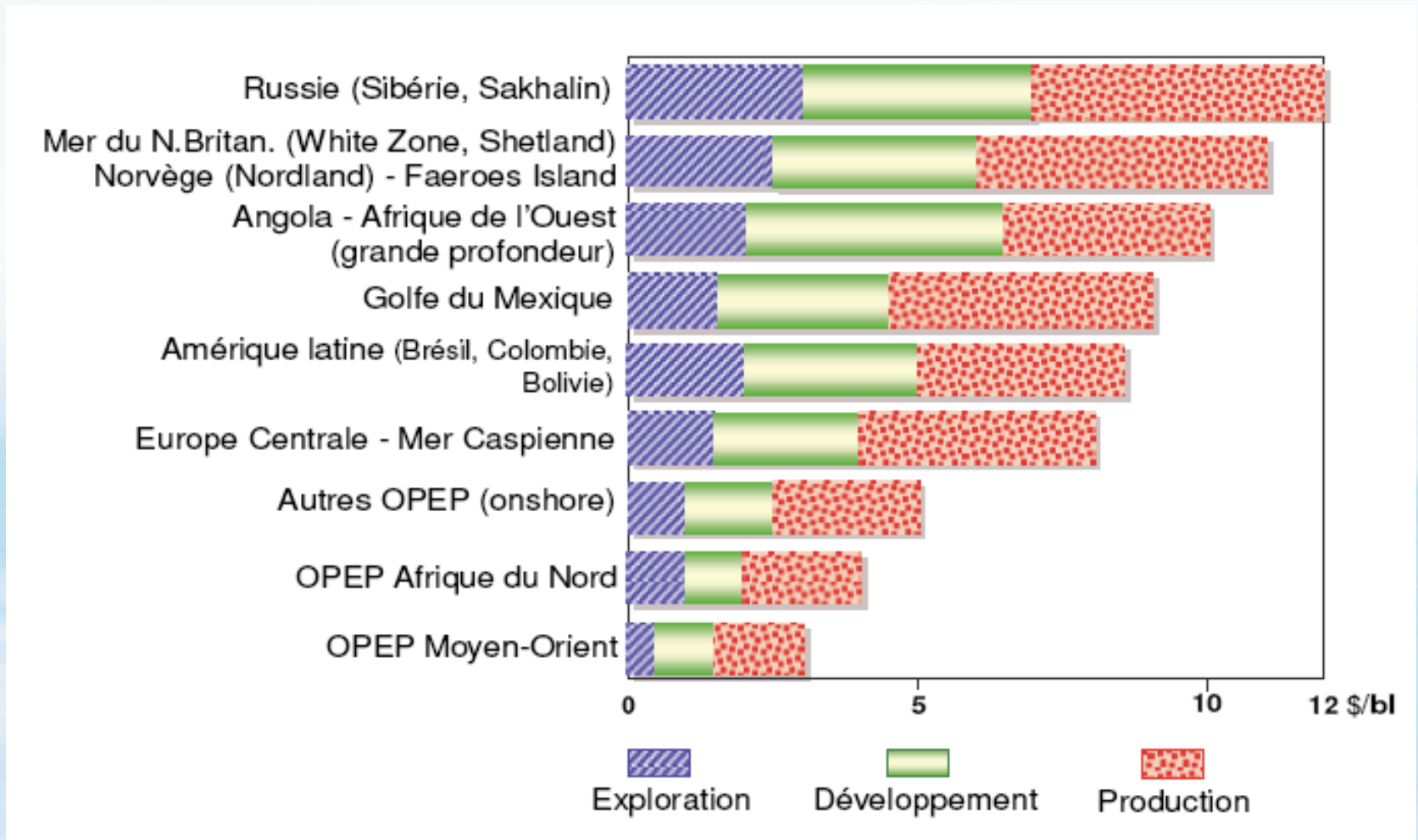
Les **réserves ultimes** correspondent à l'ensemble de ce qui peut sortir d'un gisement donné, du début à la fin de son exploitation (idem monde)

Par définition, les réserves ultimes correspondent à l'intégrale de la courbe de production entre  $-\infty$  et  $+\infty$ , et **ne varient pas au cours du temps**

Les réserves ultimes **restantes** constituent la totalité du pétrole extractible restant. Les réserves prouvées en sont un sous-ensemble.

Les réserves ultimes d'un réservoir ne sont connues avec certitude **qu'une fois l'exploitation terminée**. Si les réserves ultimes sont invariantes avec le temps, l'appréciation de ces réserves peut elle varier.

# Une réserve, c'est pour un prix



**Coût d'extraction d'un baril de pétrole. 10\$/baril  $\approx$  0,4 centime (d'euro) par kWh.  
Imbattable !**

**Source : ADL, Long term Outlook, 1999, In Bauquis & Babusiaux, Adadémie des Technologies, 2007**

# Le pétrole c'est aussi simple que des poupées russes

Réserves ultimes =

Extraction passée

**extraction** +

Réserves ultimes restantes :

Réserves prouvées

+

« Le reste » :

- restant à réévaluer (raisons physiques ou économiques)

- restant à développer

- restant à découvrir...

**réévaluation**

**découvertes**



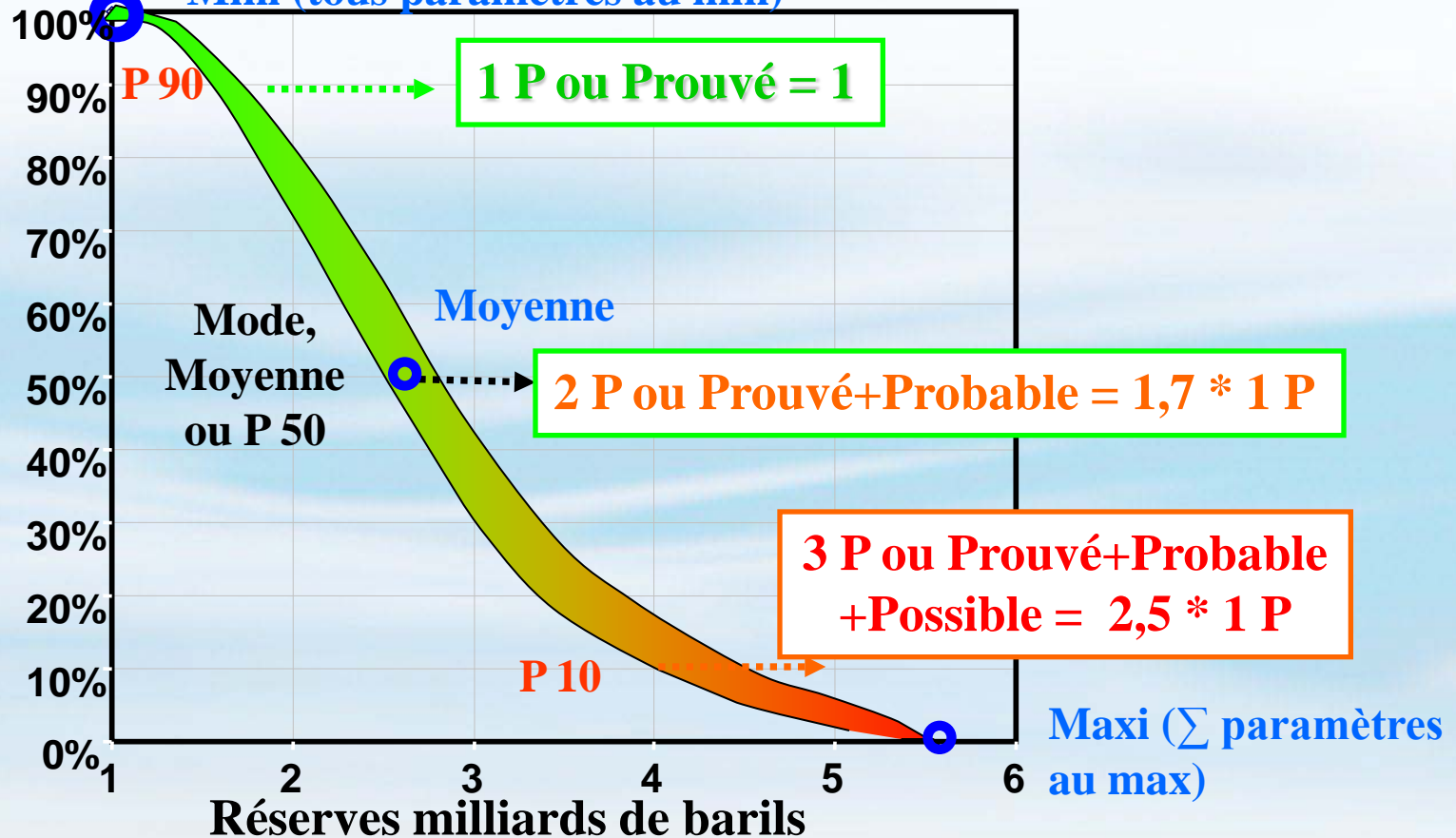
# Faire le tour du hangar et regarder par le trou de la serrure

Soit un réservoir, avec une incertitude sur son volume, sur sa porosité, sur sa pression, sur sa viscosité, etc

Probabilités

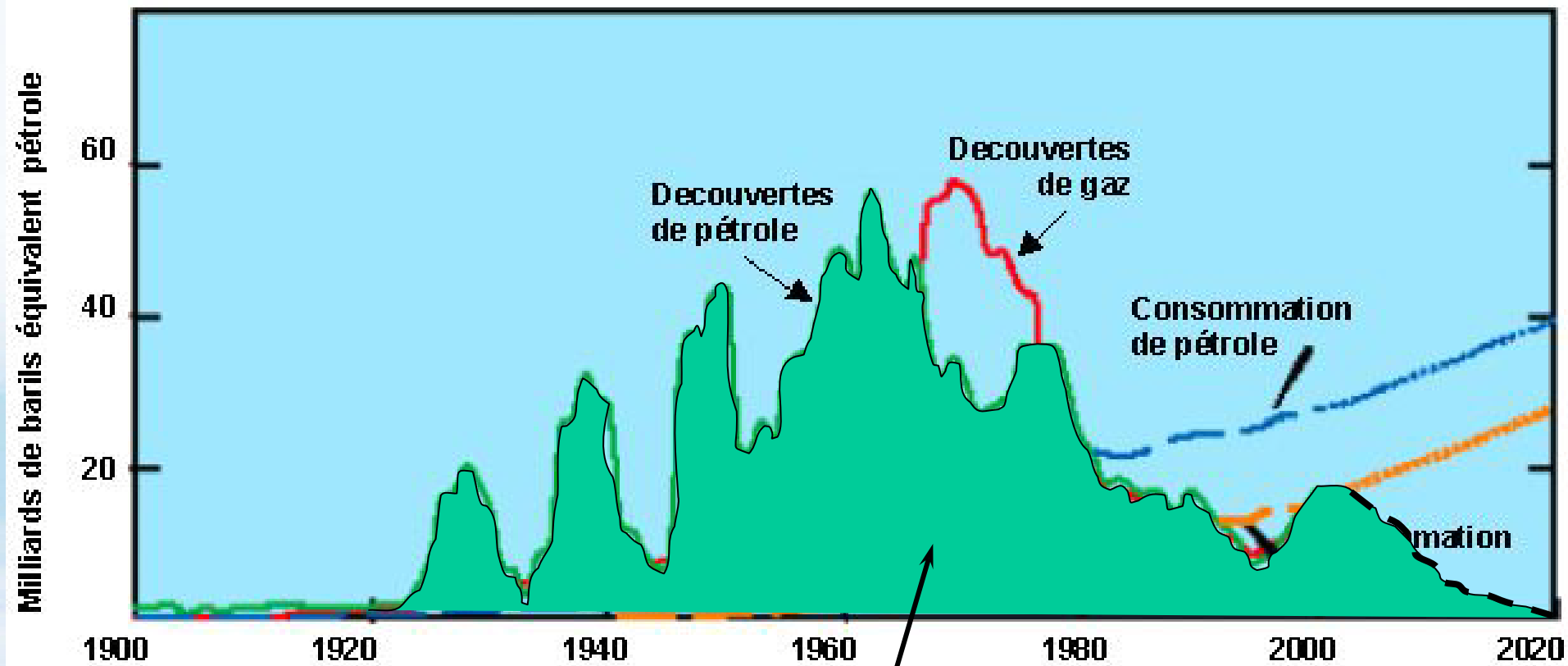
## APPROCHE PROBABILISTE

Mini (tous paramètres au min)



Yves Mathieu IFP, Juin 2004

# Pour produire du pétrole, mieux vaut d'abord le découvrir

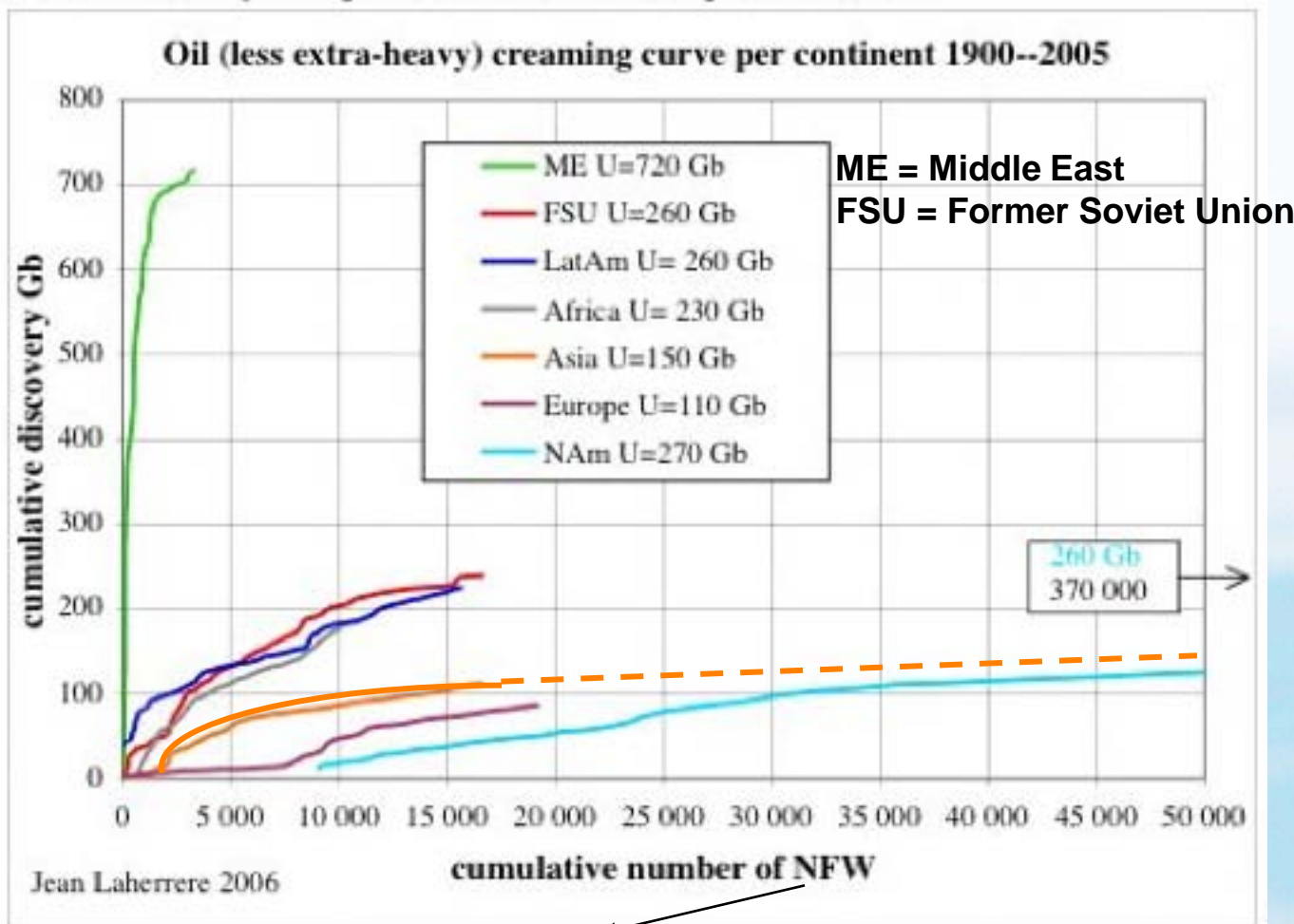


Découvertes cumulées de pétrole récupérable (2P) = réserves **ultimes** = max de la production cumulée possible de  $-\infty$  à  $+\infty$  !

Découvertes mondiales de pétrole récupérable depuis 1900 (2P), en moyenne mobile sur 5 ans, en milliards de tonnes équivalent pétrole (1 tonne = 7,3 barils).

Source : Exxon Mobil, 2002

# Moins de découvertes parce nous cherchons moins ?

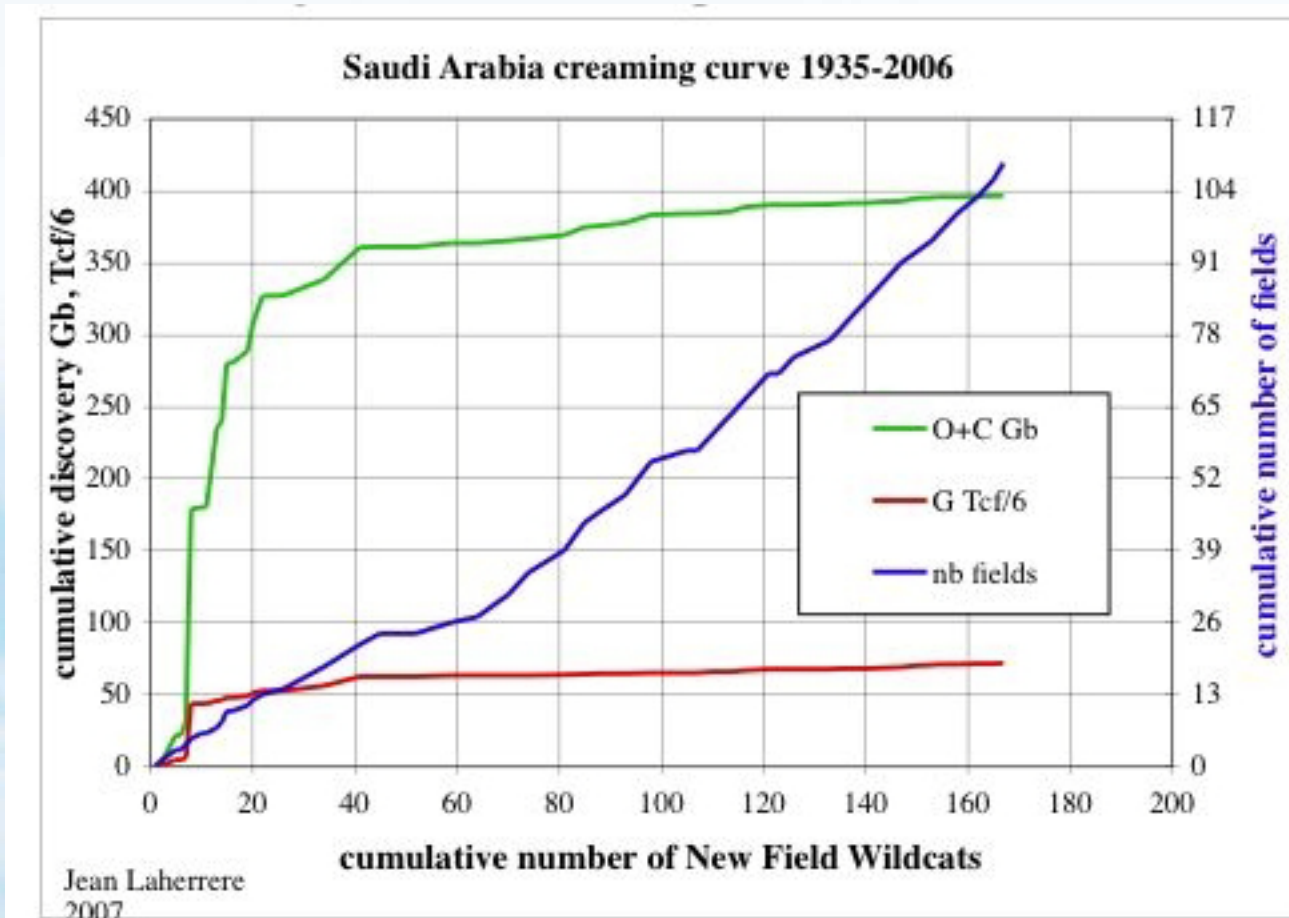


NFW = New Field Wildcats = puits d'exploration

Découvertes cumulées en fonction du nombre de puits forés pour le monde. Même remarque que précédemment.

Source Jean Laherrère, 2006

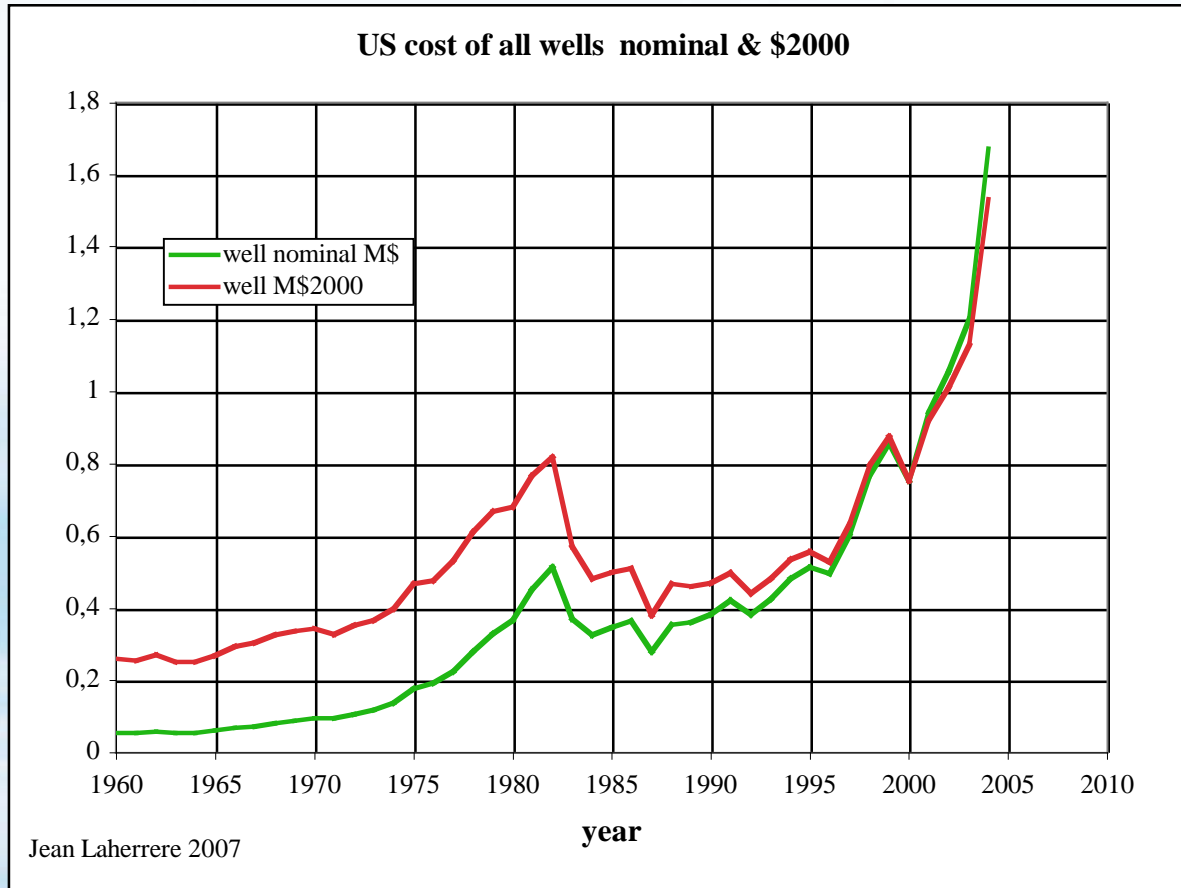
# Moins de découvertes parce nous cherchons moins (bis) ?



**Découvertes cumulées en fonction du nombre de puits forés pour l'Arabie Saoudite. Il est facile de constater que plus le nombre de puits d'exploration forés est important, moins les derniers puits forés contribuent aux découvertes.**

**Source Jean Laherrère, 2007**

# Moins de découvertes parce que nous sommes radins ?



1980

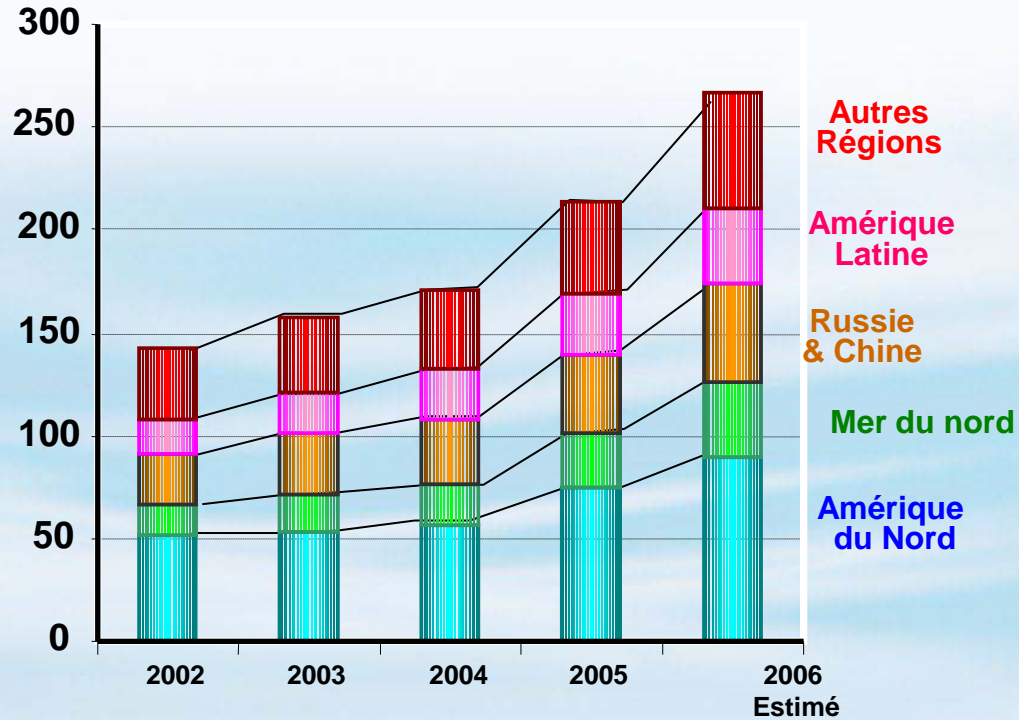
2006

Prix d'un forage d'exploration aux US (Alaska et deepwater inclus ?). Ca monte un peu partout...

Source Jean Laherrère, 2007

# En pratique, faire des trous n'a jamais coûté aussi cher

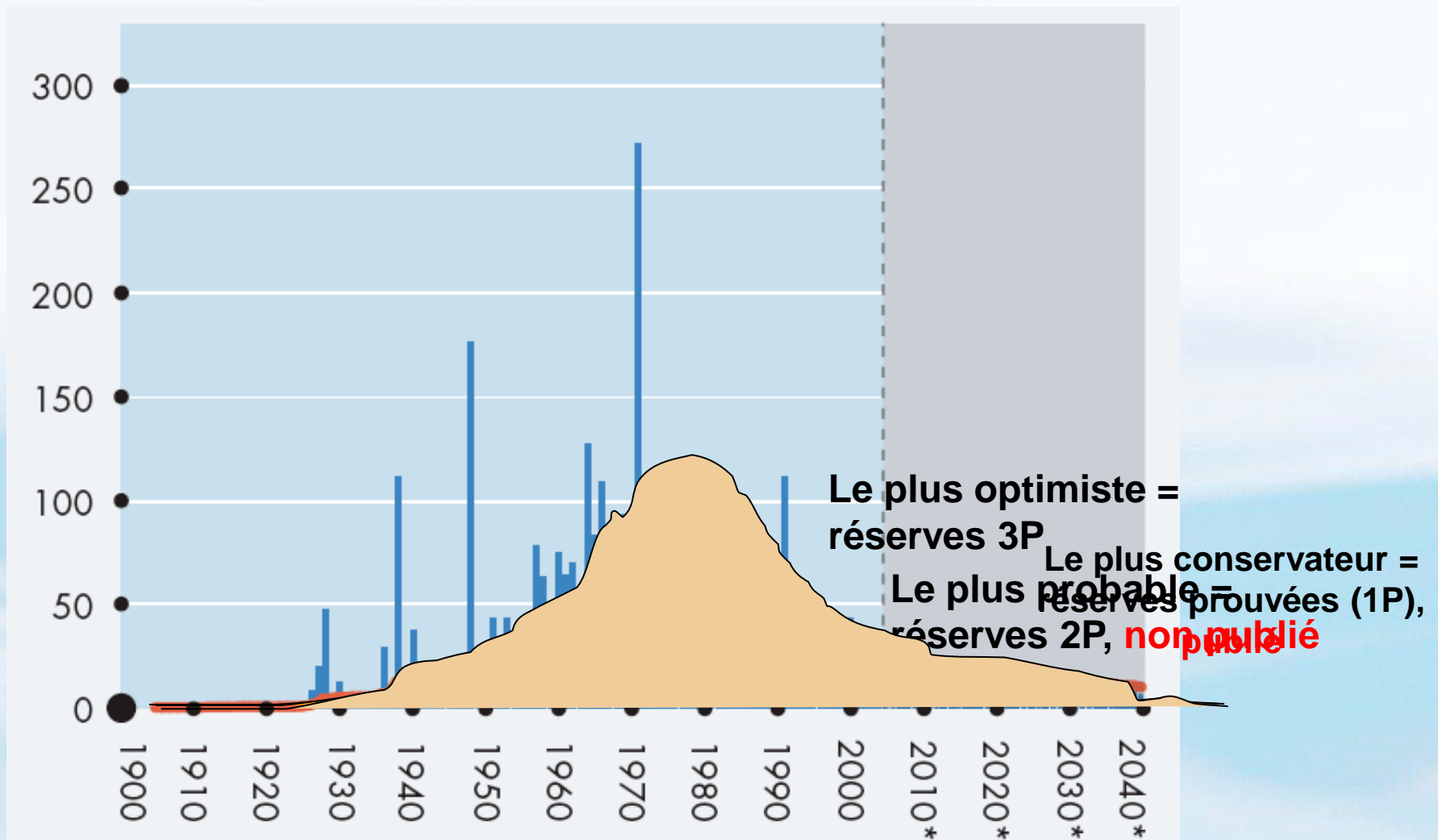
## Investissements en milliards de \$



Dépenses d'exploration dans le monde, par zone, en G\$.

Source IFP, 2007

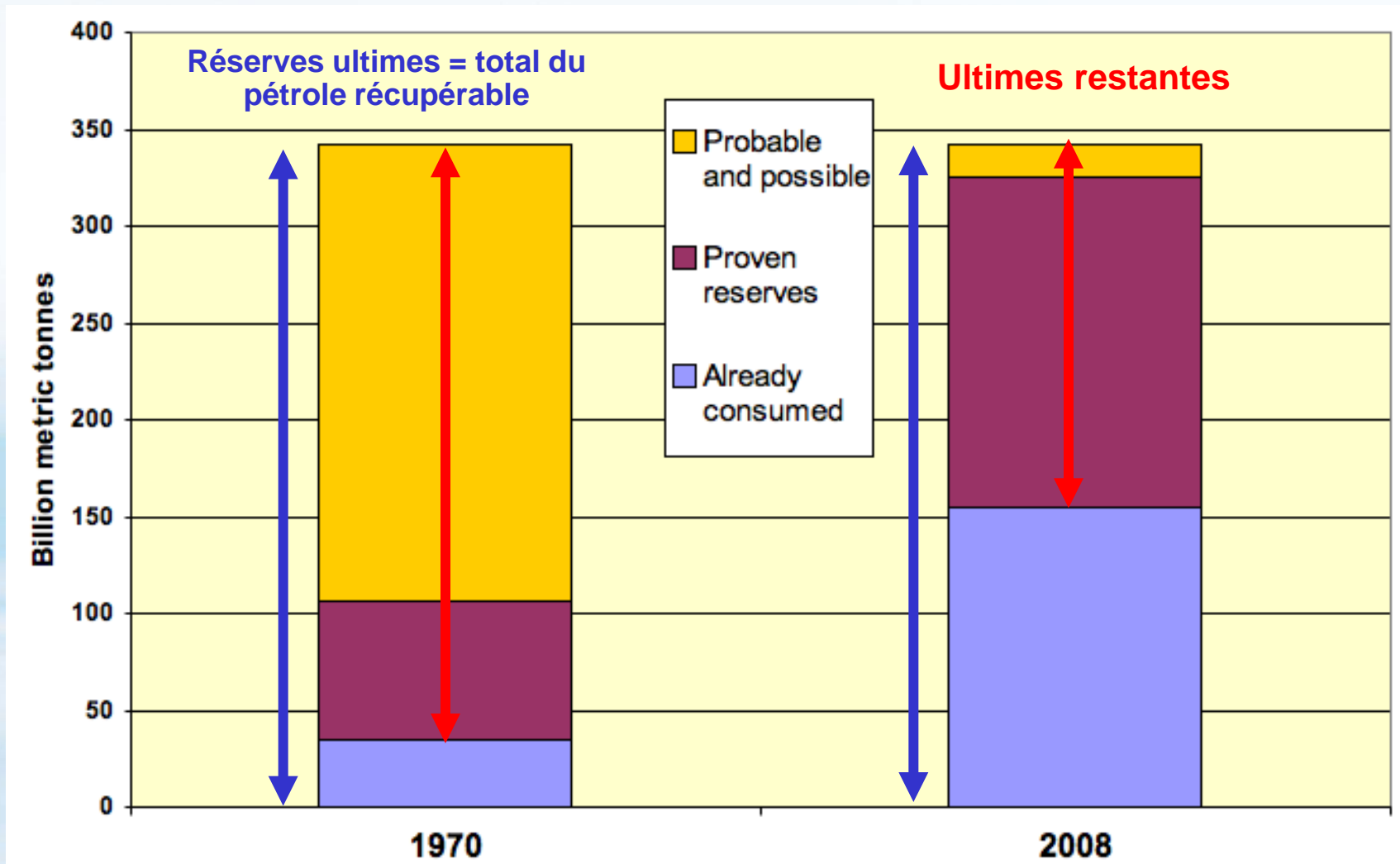
# Le Gross Kapital, décidément impréccateur d'apocalypse...



Découvertes mondiales de pétrole récupérable depuis 1900 (valeurs annuelles et moyenne mobile sur 20 ans), en milliards de barils, et **extrapolation pour le futur** (y compris offshore profond, polaire, condensats, etc).

Source : Shell/IHS Energy, 2005

# 40 ans ou 40 fois ? C'est un peu différent...

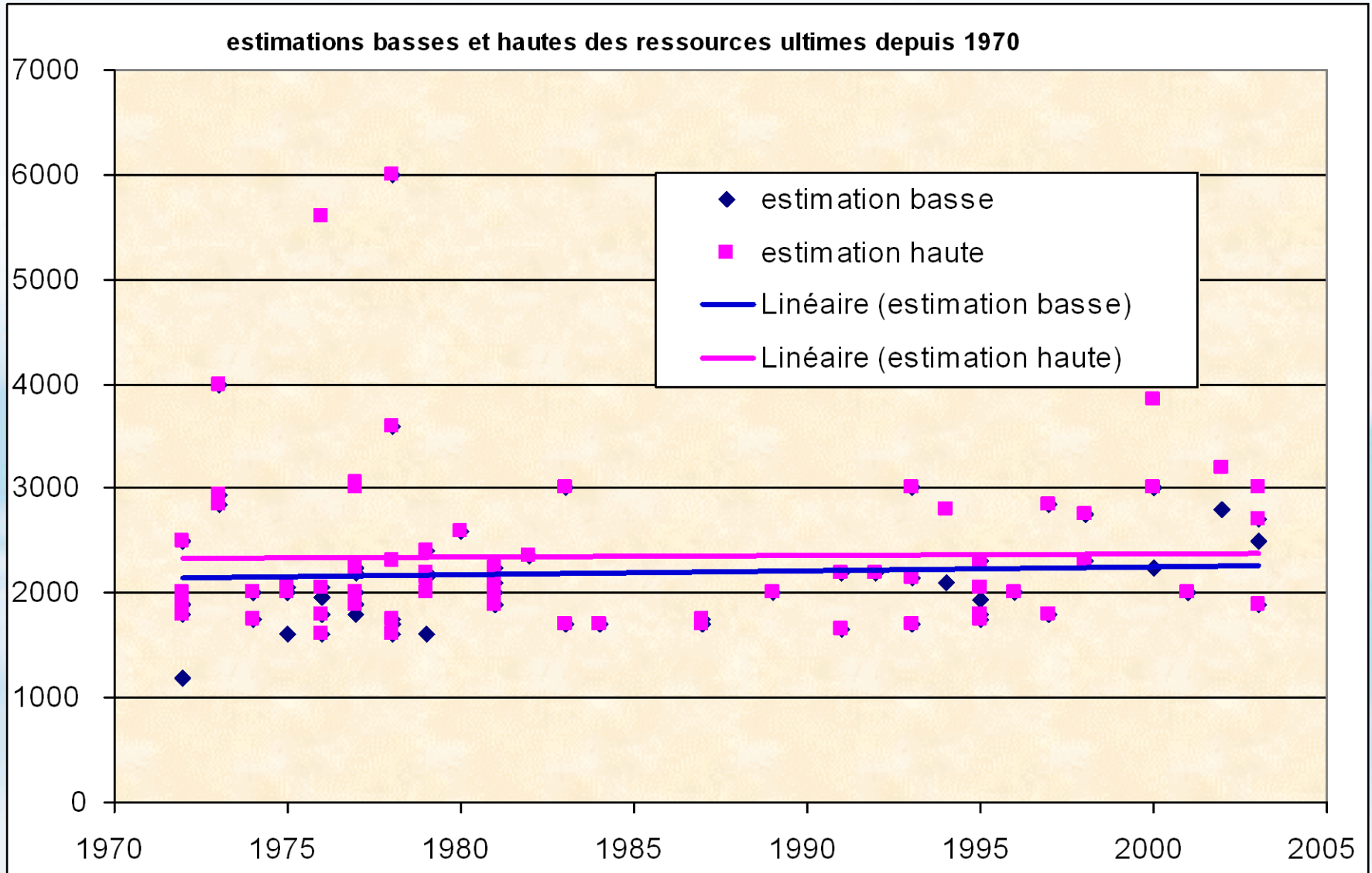


L'augmentation des réserves prouvées est un trompe-l'œil : ce qui compte, ce sont les **ultimes restantes**... qui ont bien diminué.

Jancovici, 2010, d'après BP Stat 2009, Schilling et al 1977 ; ultimes = 2500 milliards de barils

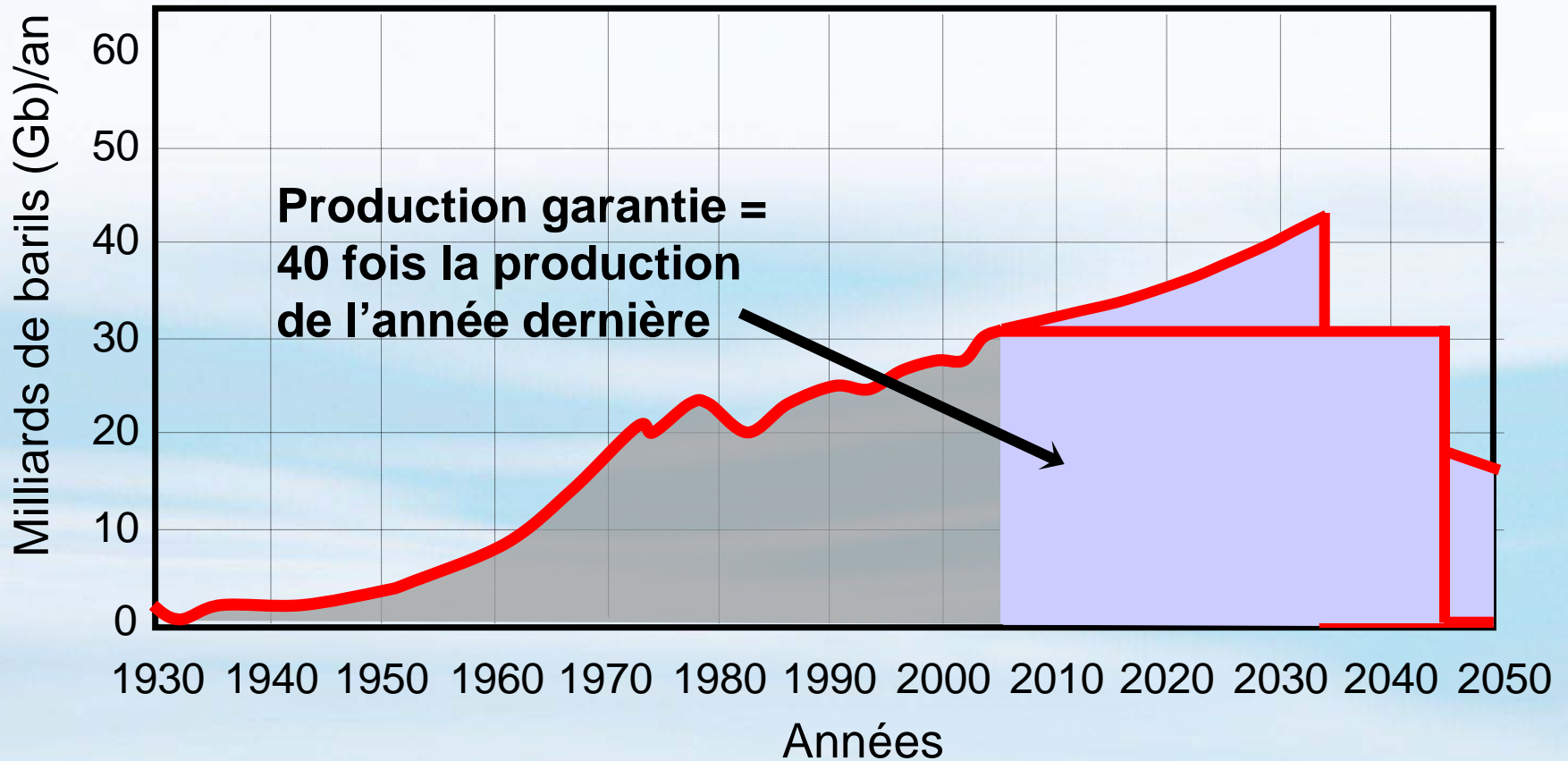


# Kikadikoi, et depuis quand ?



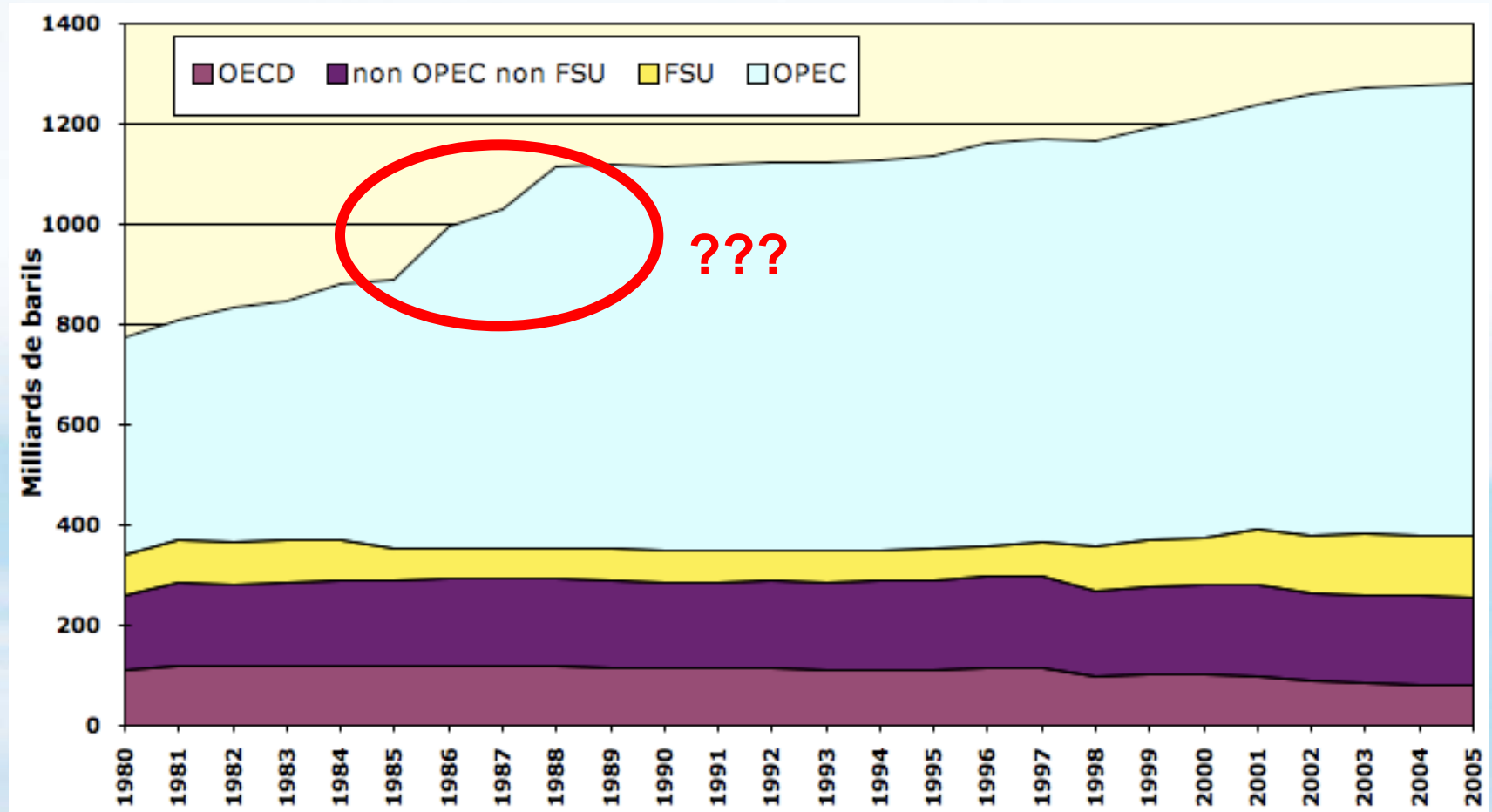
**La médiane des estimations sur les ressources ultimes est peu près stable depuis 30 ans. Compilation de l'auteur sur sources diverses.**

**Version très sympathique mais on ne peut pas garantir qu'elle ait aussi bonne tenue à l'arrivée!**



**3 manières de voir « 40 ans de pétrole » pour la production future.**

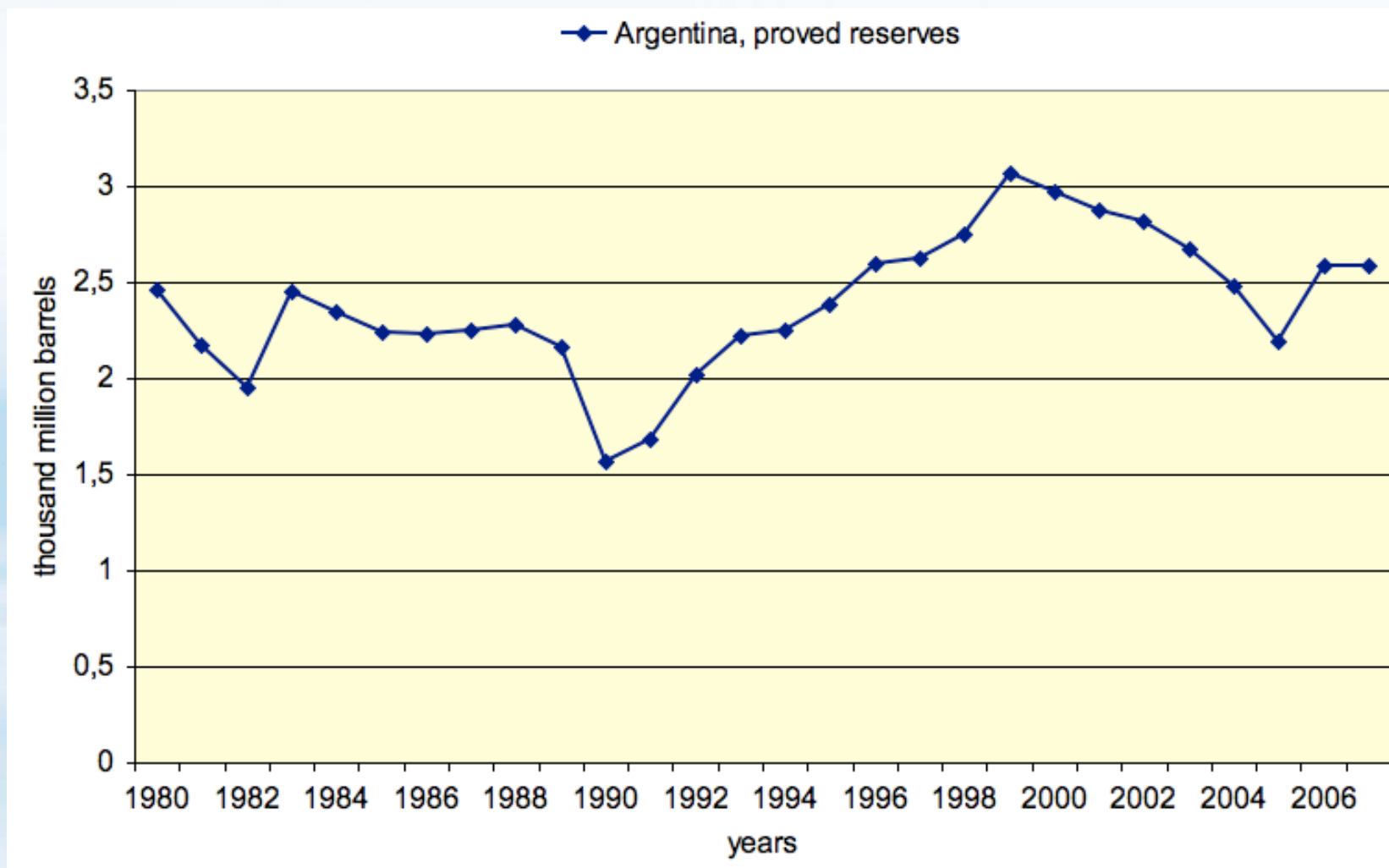
# Un petit fumet de poker menteur...



Evolution des réserves prouvées déclarées, de 1980 à 2005, par zone géographique. Aucune découverte majeure ni percée technologique n'explique de manière évidente la réévaluation des réserves des pays de l'OPEP de 1985 à 1990, en plein « contre-choc ».

Source BP Statistical Review 2007

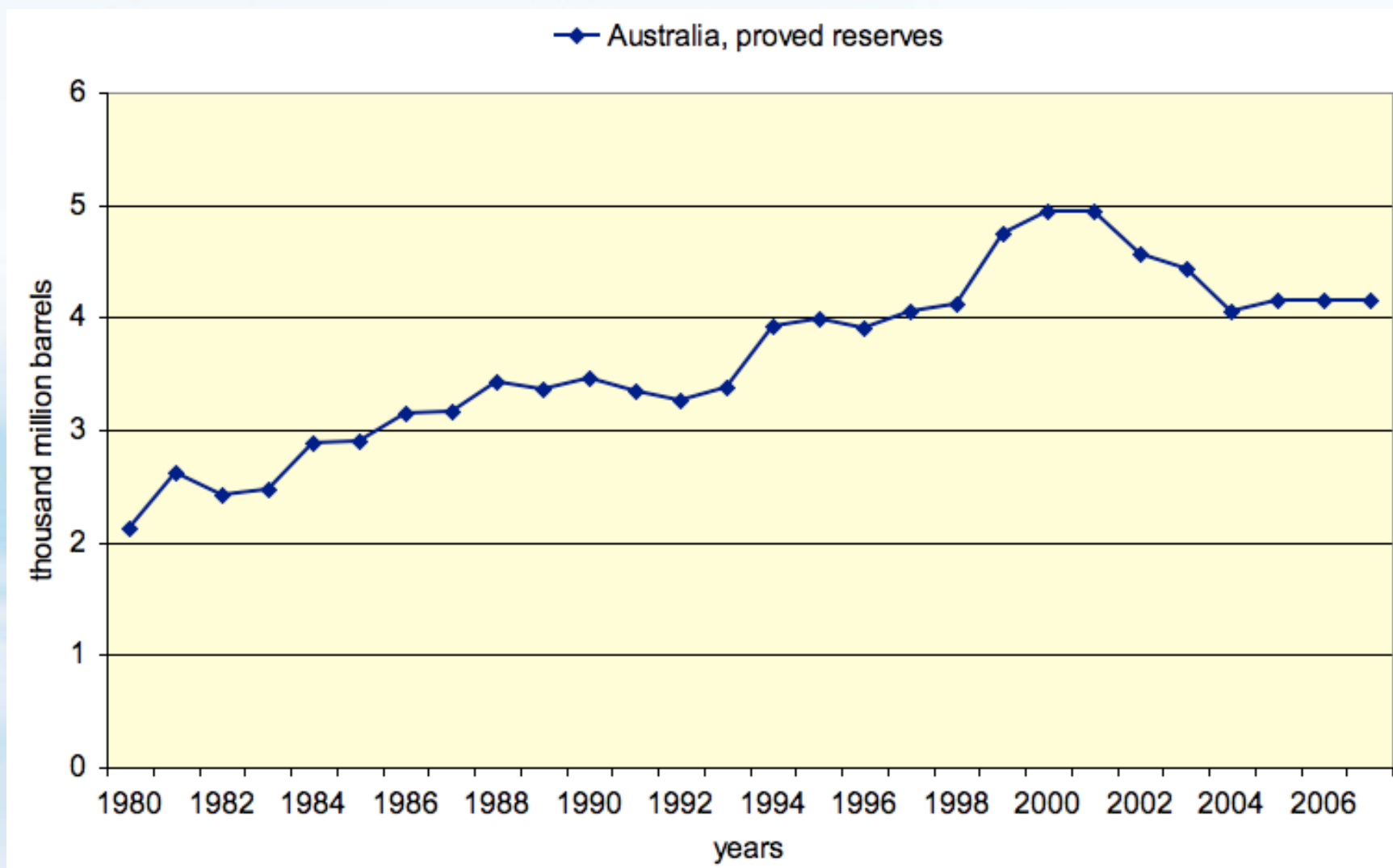
# Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



**Evolution des réserves prouvées en Argentine.**

**Source BP Statistical Review, 2008**

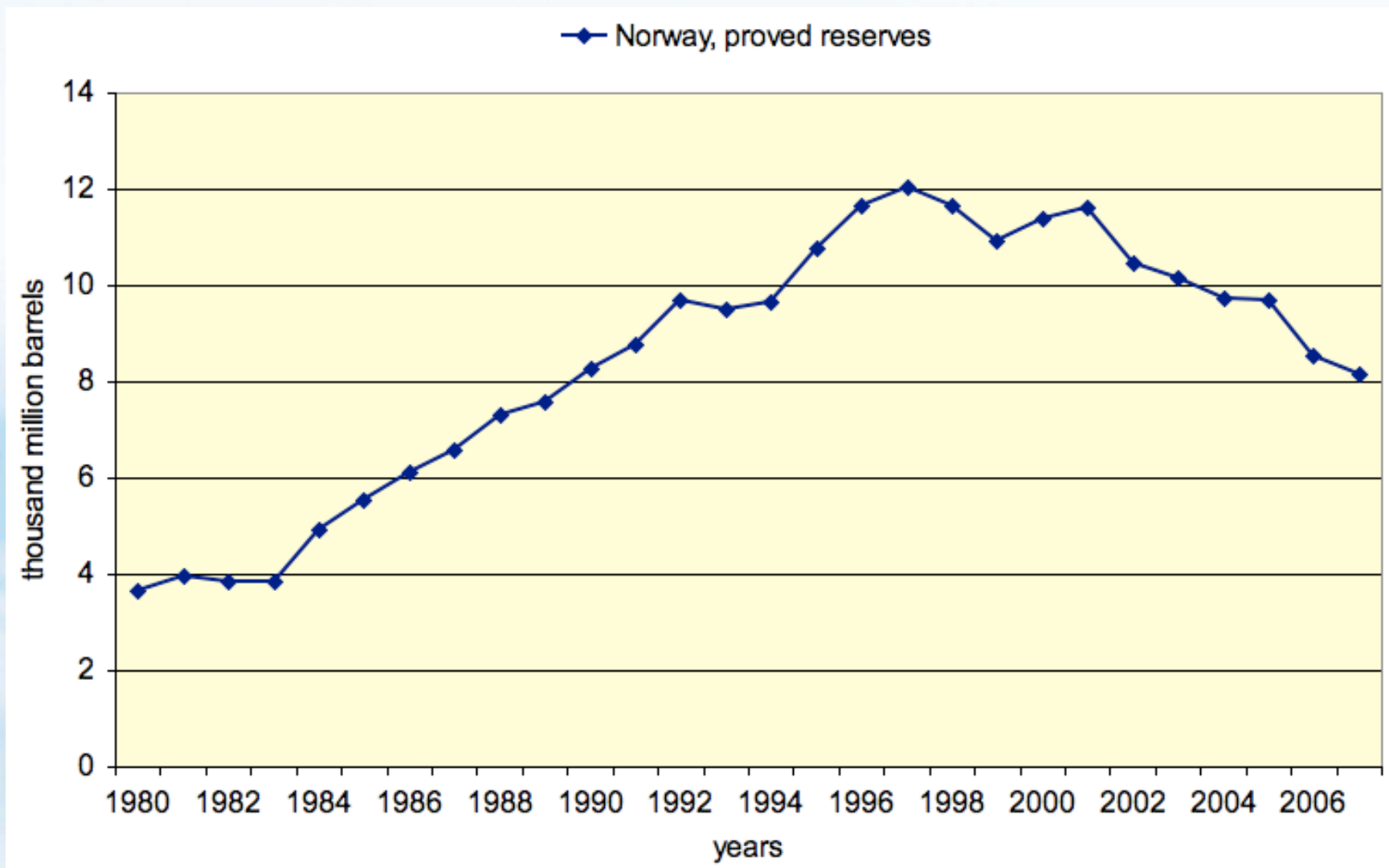
# Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



**Evolution des réserves prouvées en Australie.**

**Source BP Statistical Review, 2008**

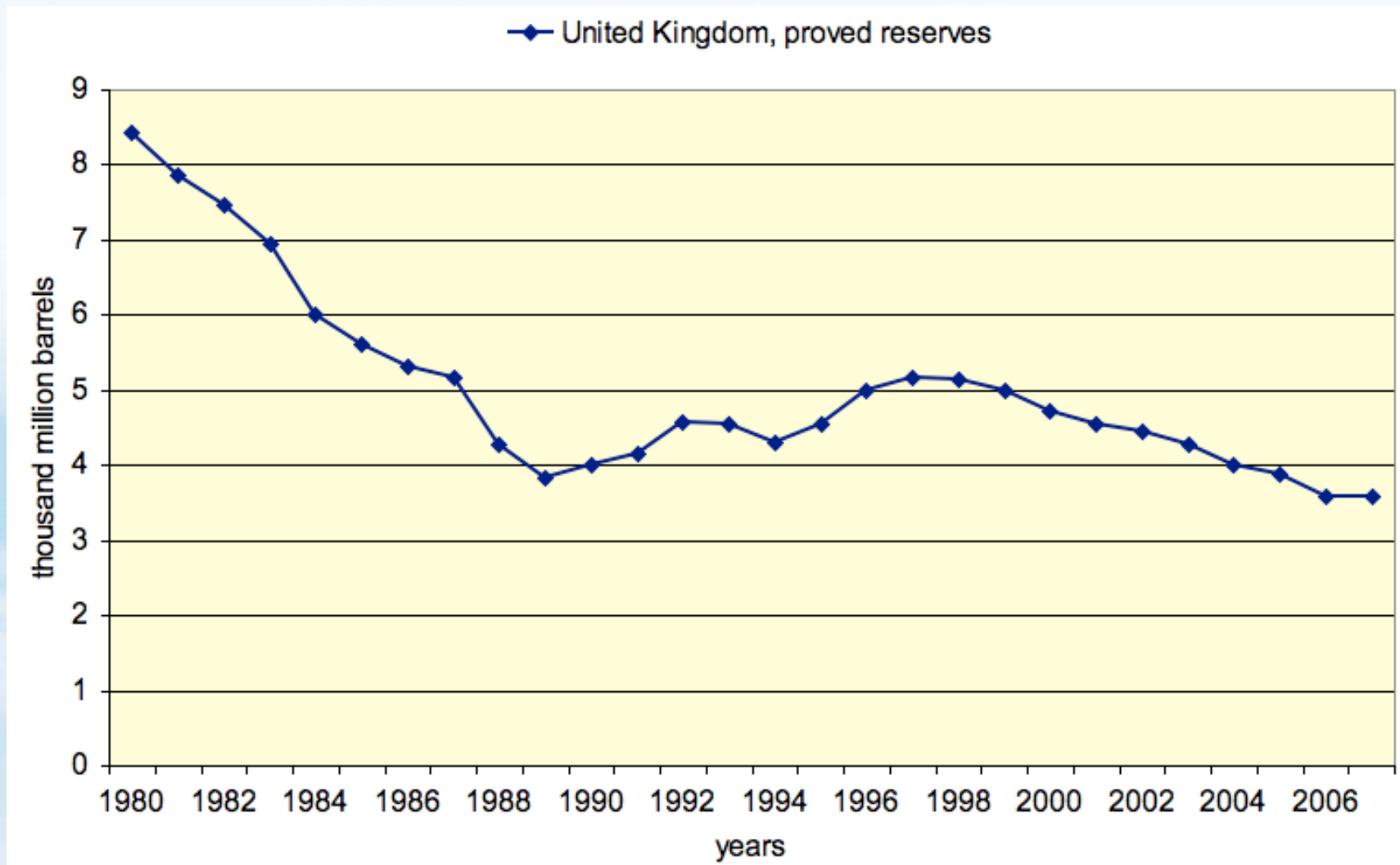
# Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



Evolution des réserves prouvées en Norvège (1er producteur de brut en Europe).

Source BP Statistical Review, 2008

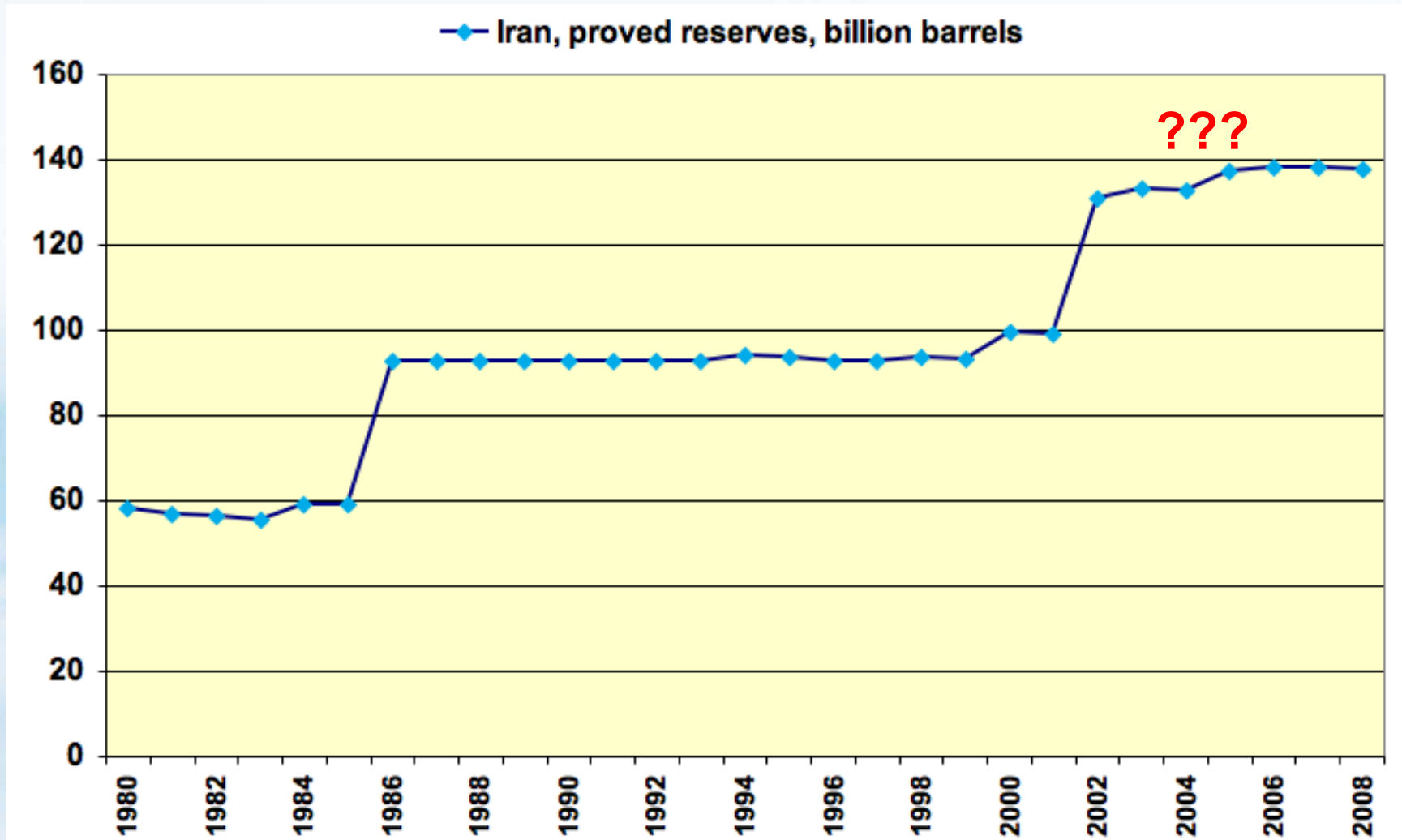
# Les réserves, normalement sensibles à l'activité des shadoks



**Evolution des réserves prouvées en Grande Bretagne.**

**Source BP Statistical Review, 2008**

# Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?

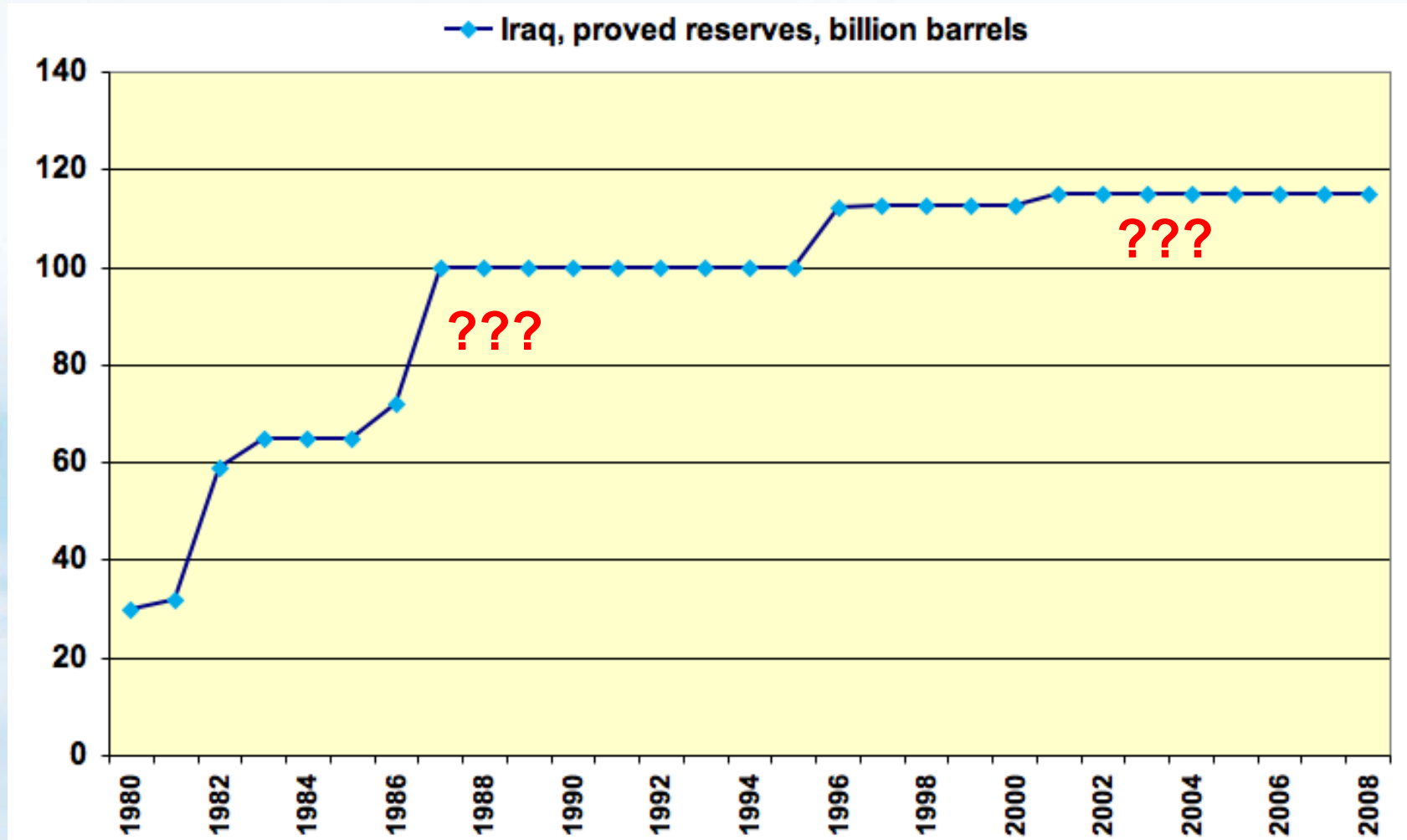


Evolution des réserves prouvées en Iran.

Source BP Statistical Review, 2009



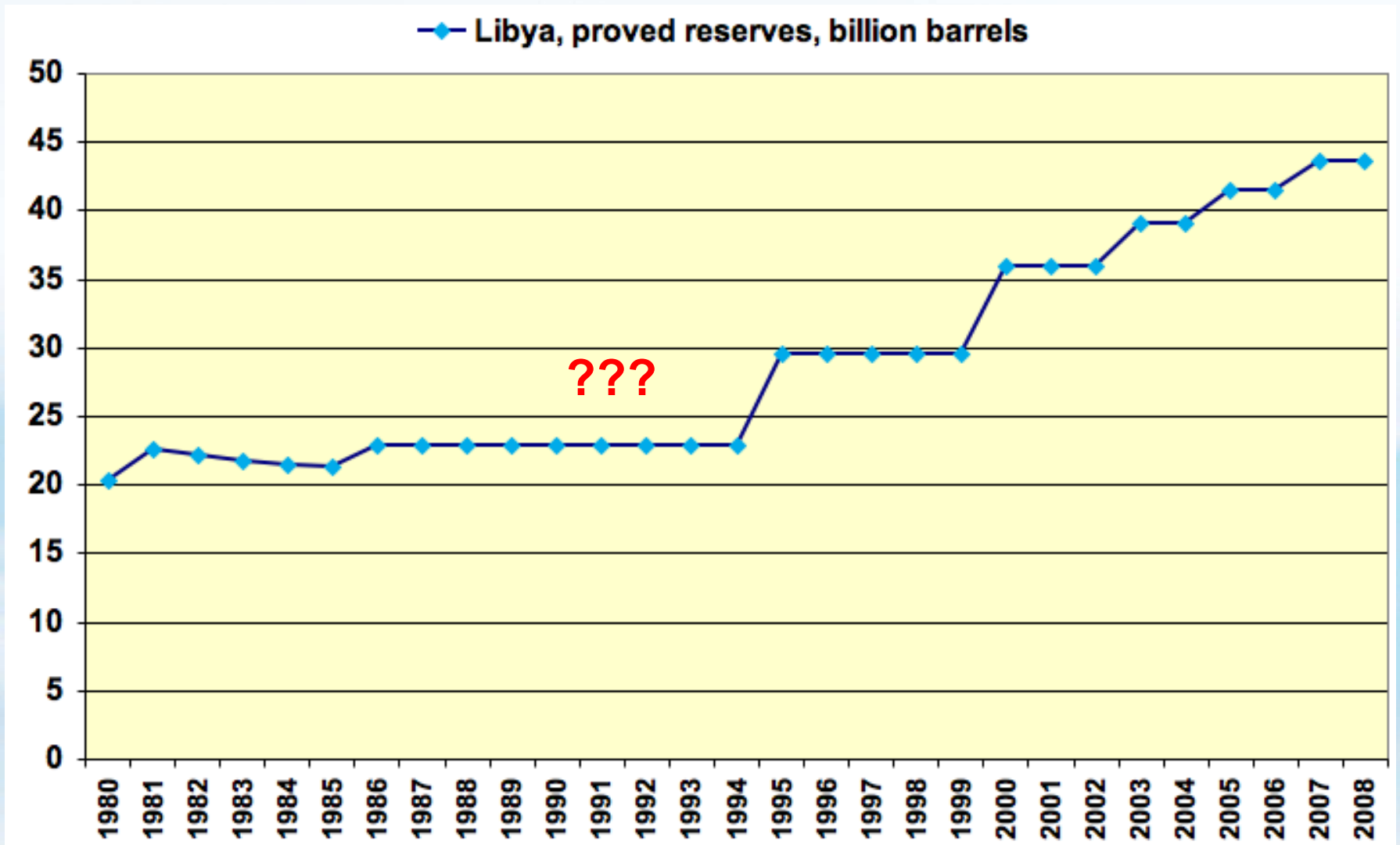
# Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?



Evolution des réserves prouvées en Irak.

Source BP Statistical Review, 2009

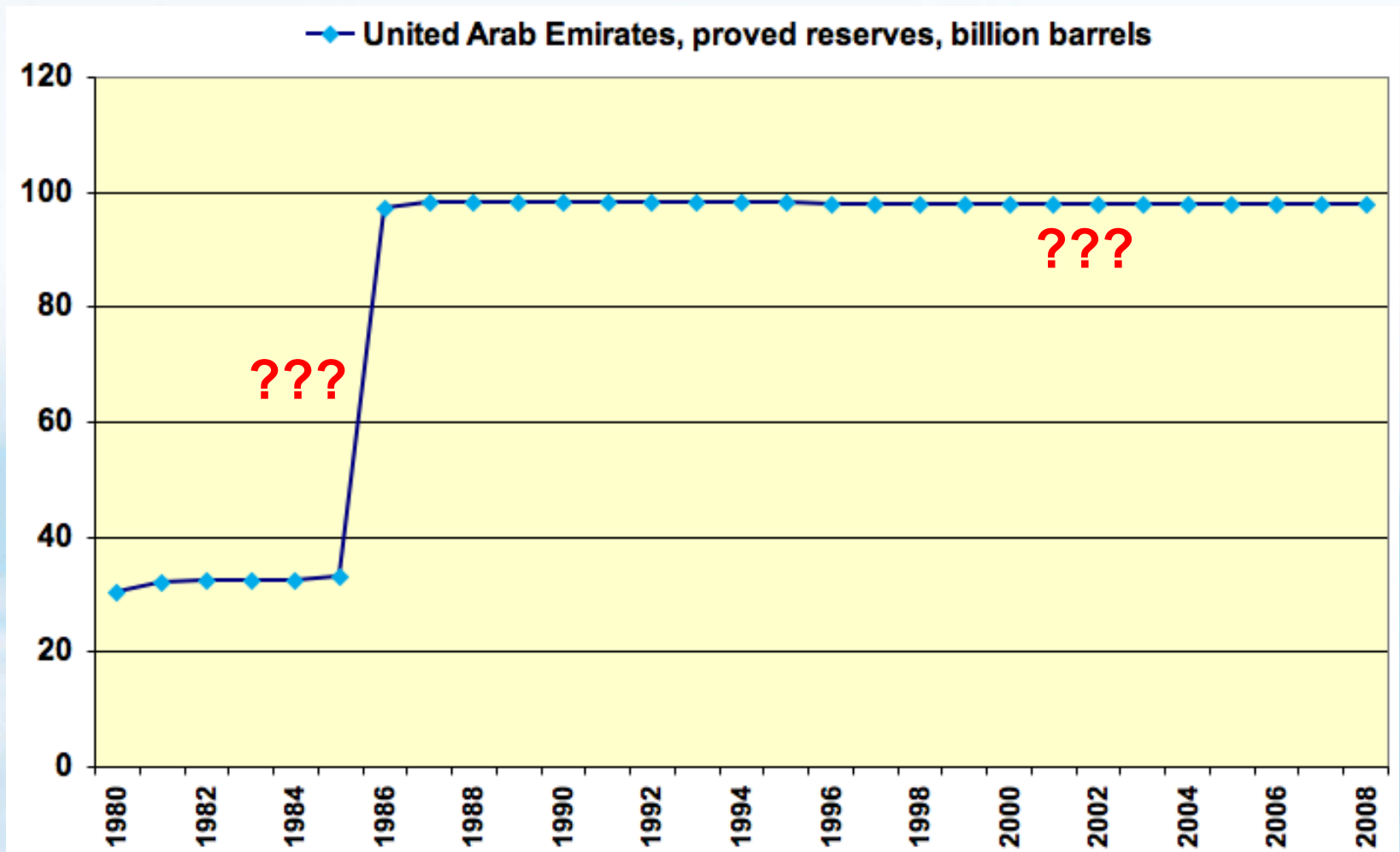
# Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?



Evolution des réserves prouvées en Libye.

Source BP Statistical Review, 2008

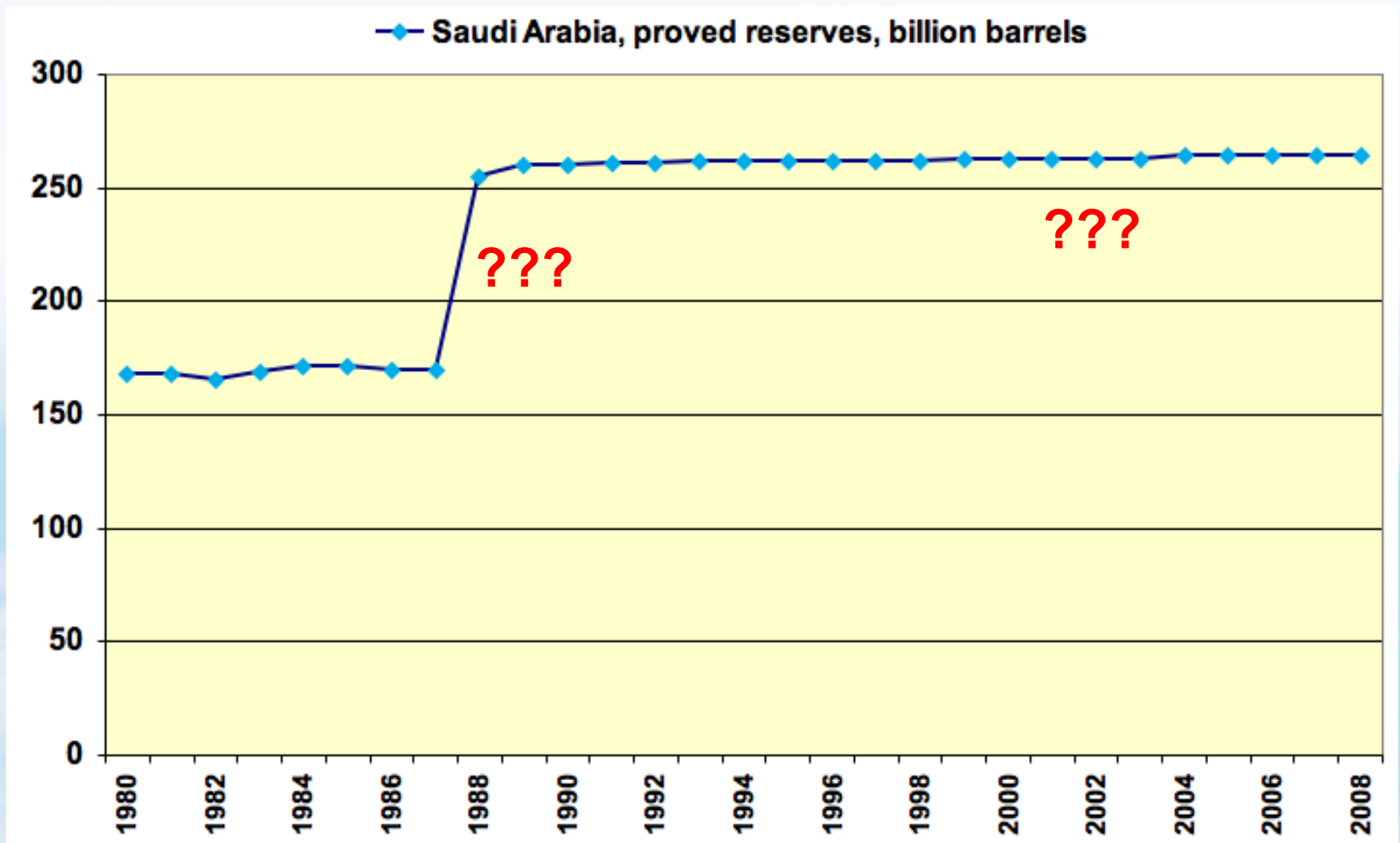
# Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?



Evolution des réserves prouvées aux Emirats.

Source BP Statistical Review, 2009

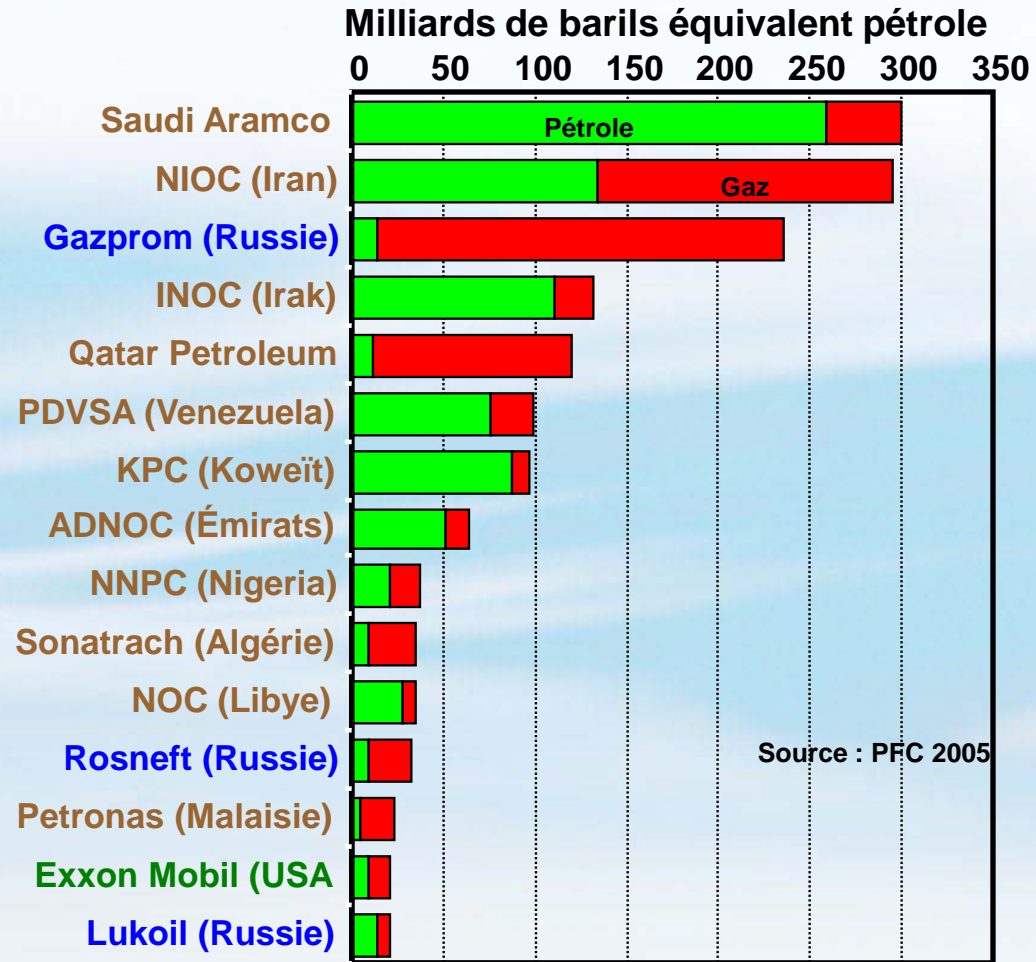
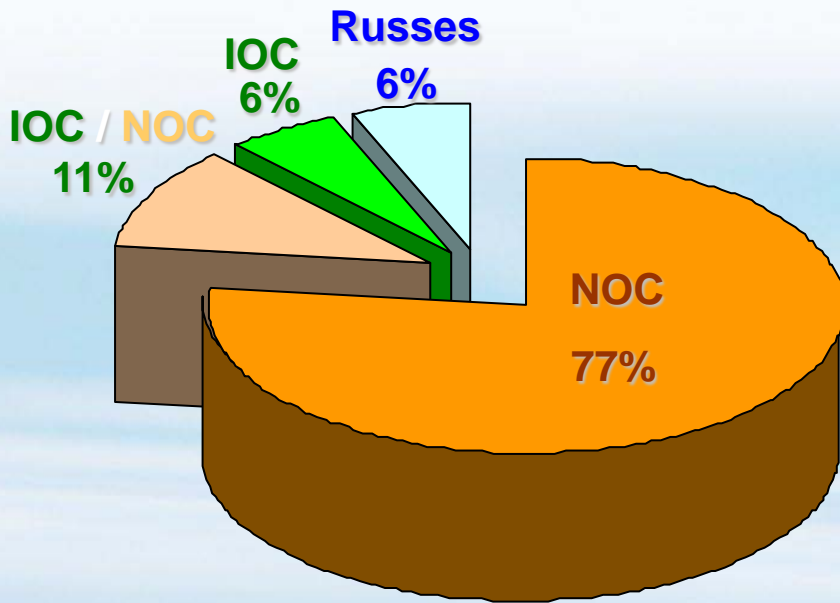
# Les réserves, insensibles à l'activité des shadoks ?



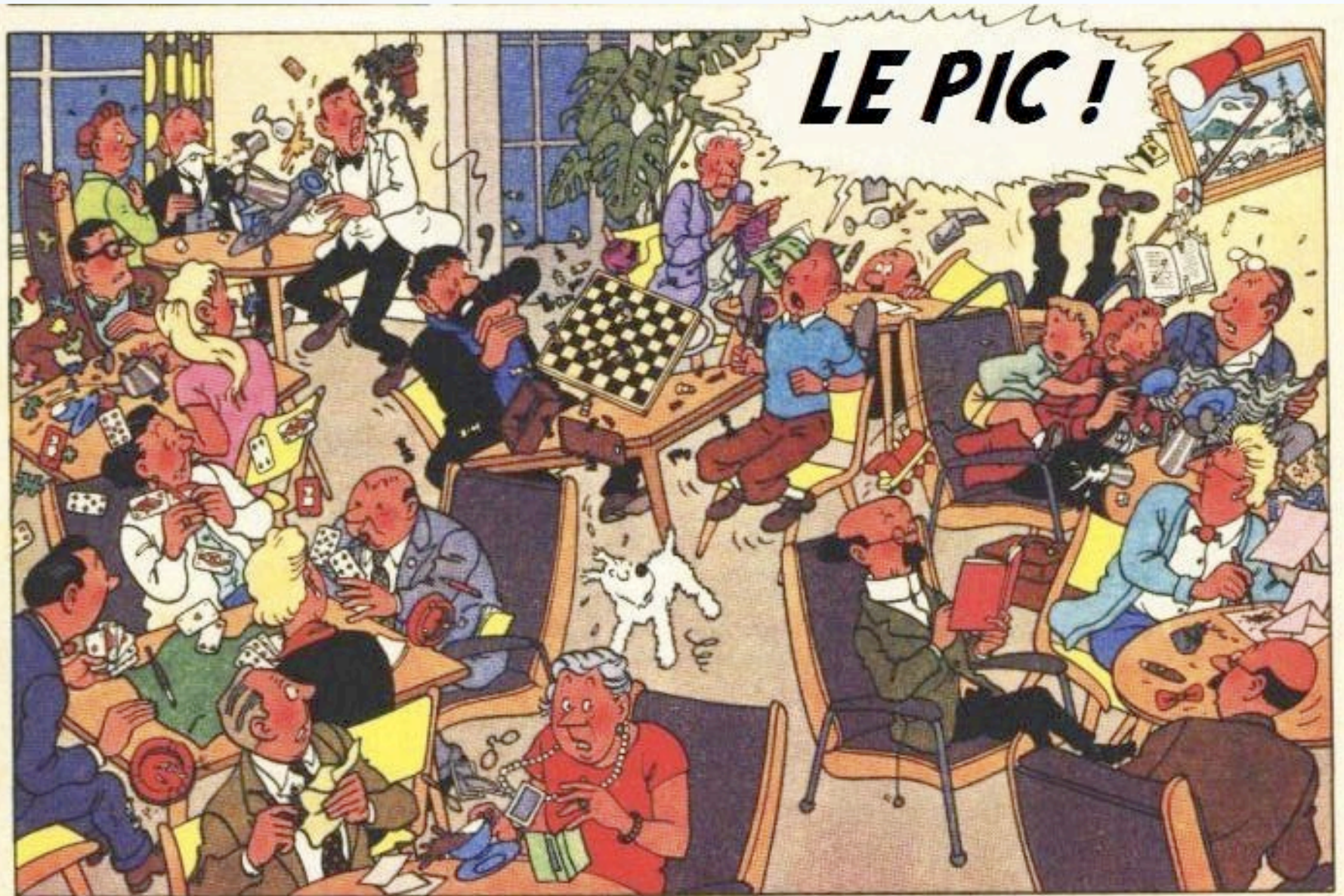
Evolution des réserves prouvées en Arabie Saoudite.

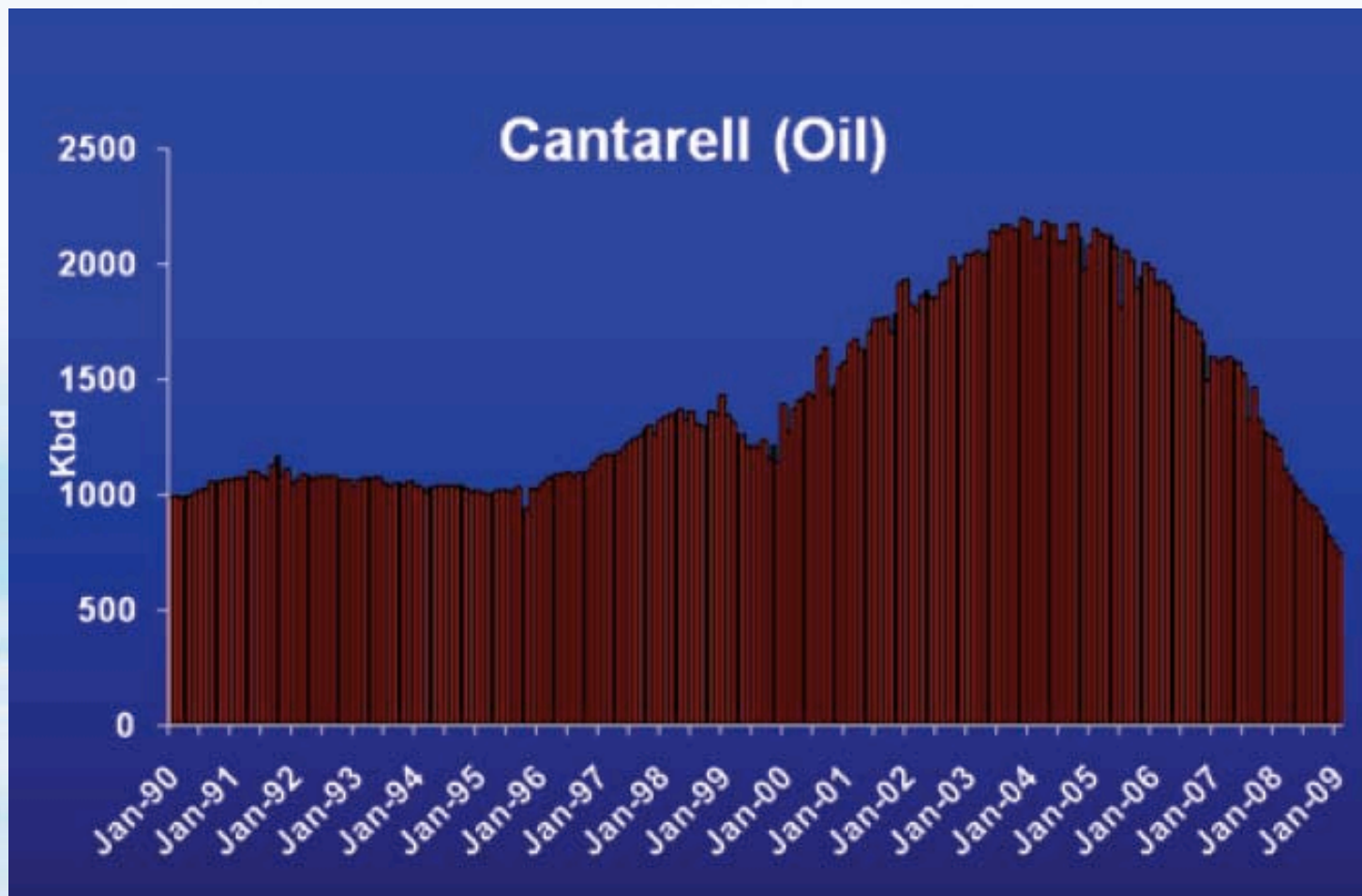
Source BP Statistical Review, 2009

# Les réserves sont l'affaire du ministre plus que du PDG

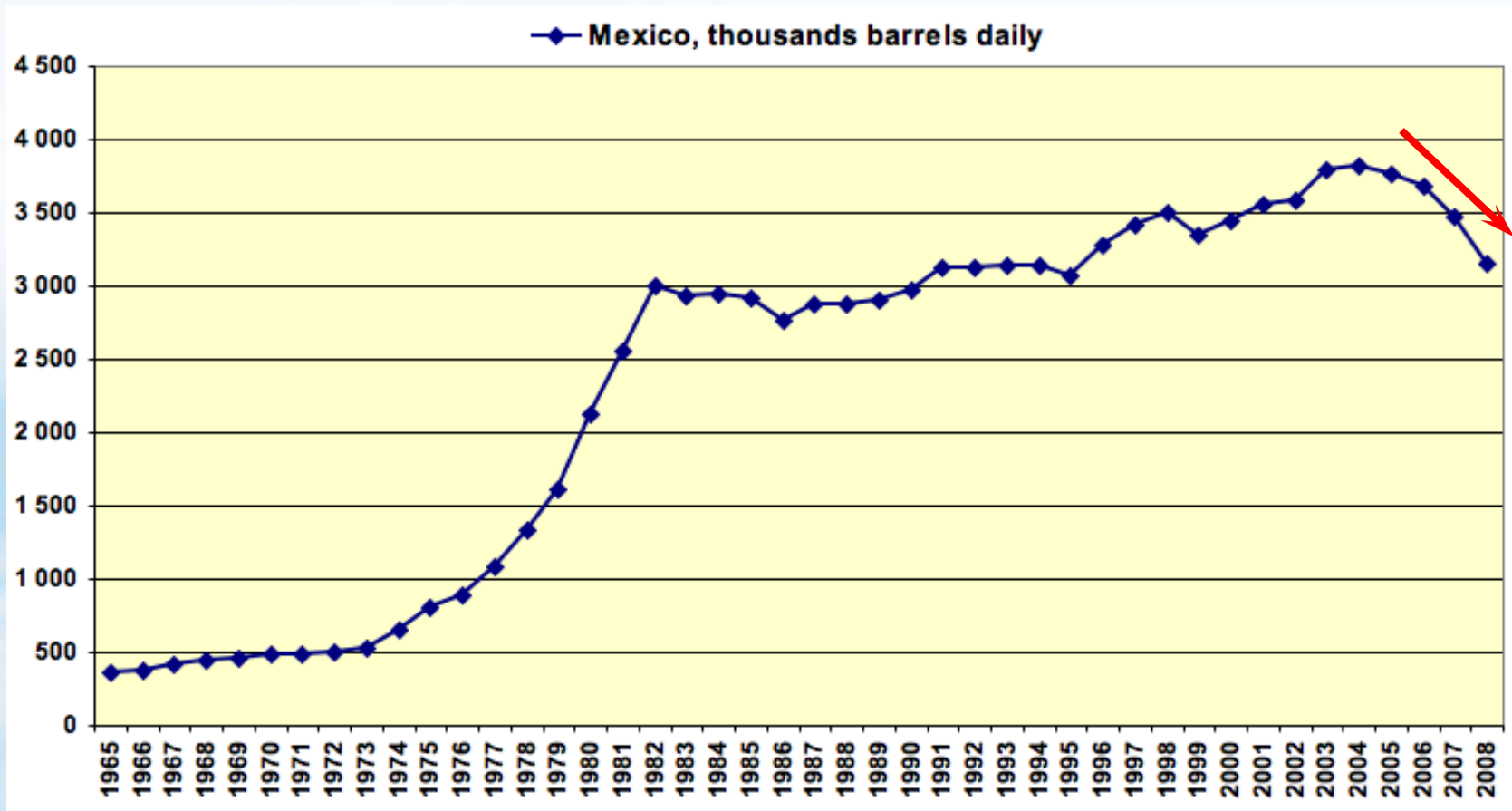


Les maths, c'est décidément détestable...





**Production de pétrole du champ de Cantarell (Mexique). Source Matthews Simmons, Simmons & cy, 2009**

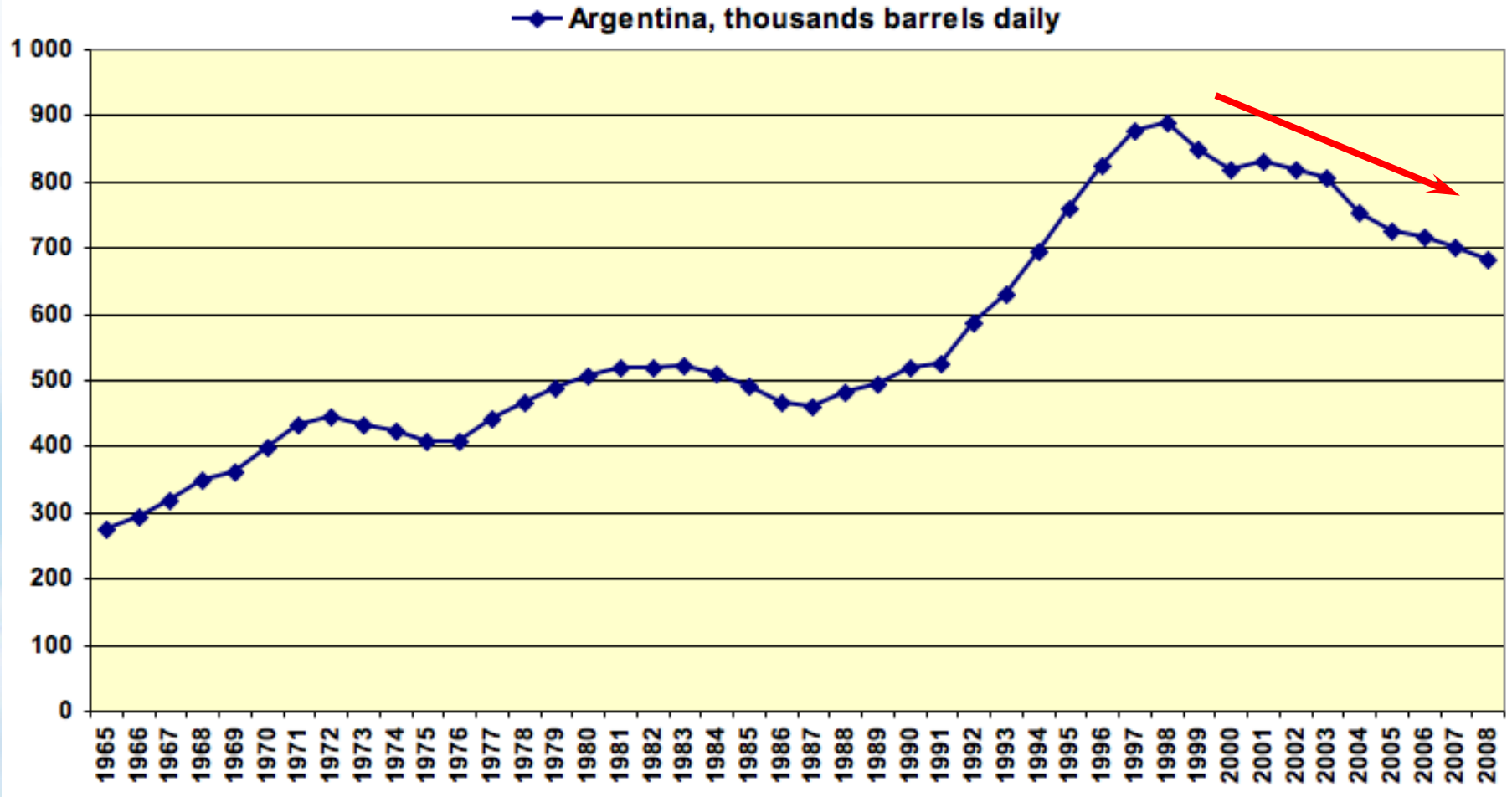


Production de pétrole au Mexique ( $\approx 4\%$  de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Pic en 2004

Source BP Statistical Review, 2009



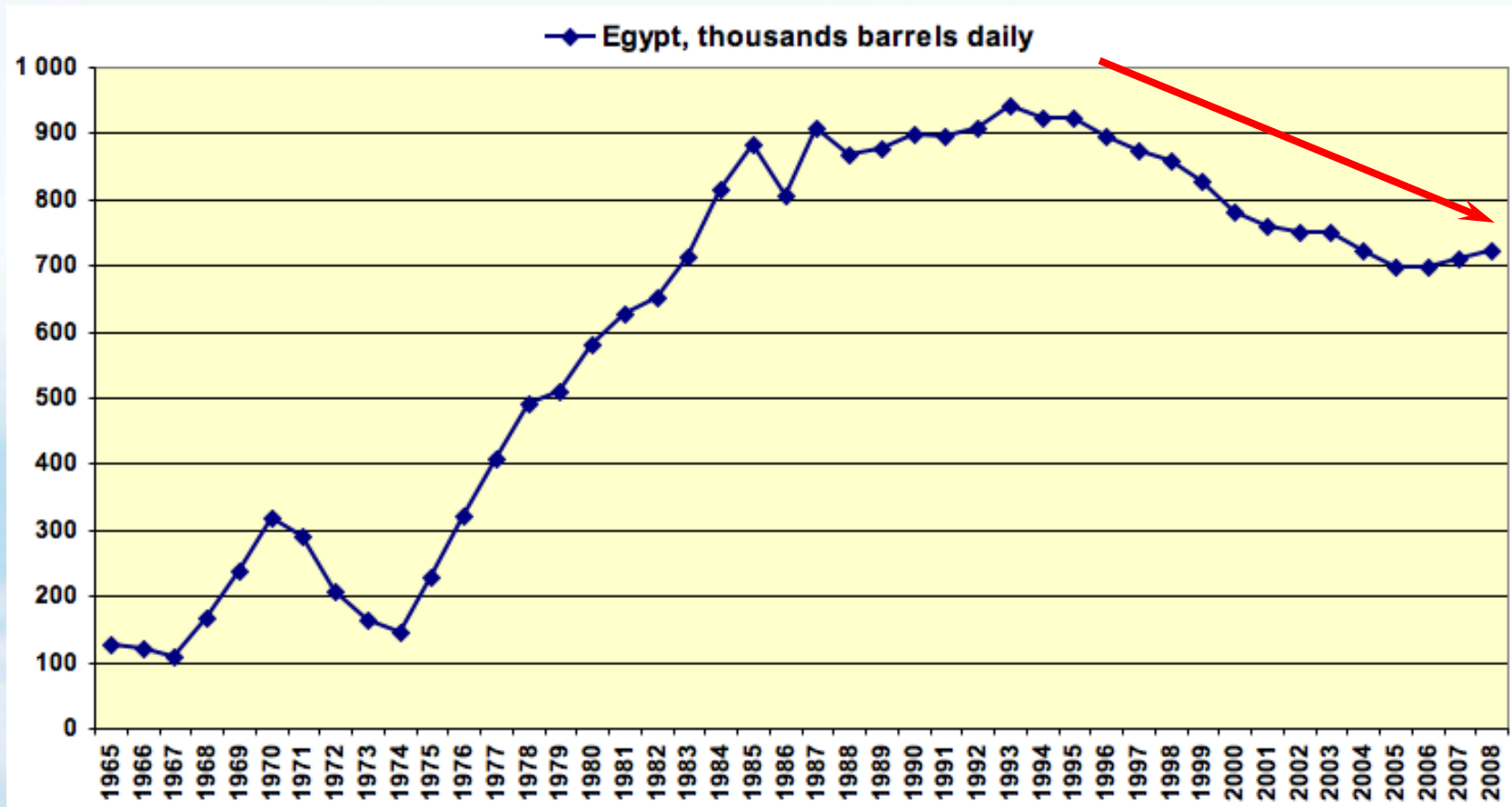
# Stock non renouvelable => pic et pic et...



Production de pétrole en Argentine (< 1% de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Pic en 1998.

Source BP Statistical Review, 2009

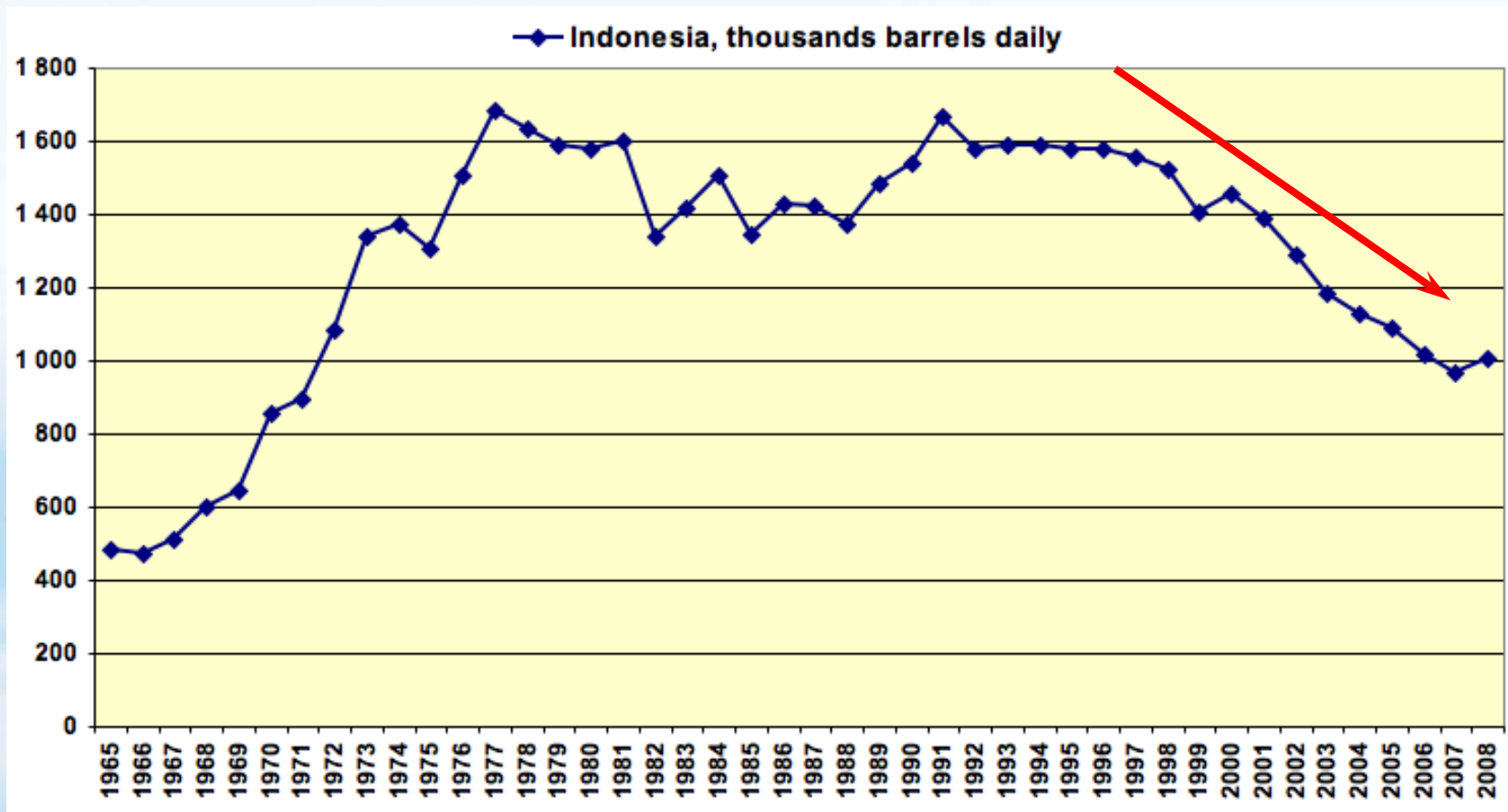
# Le pic, une réalité déjà fréquente - 2



Production de pétrole en Egypte (< 1% de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Pic en 1993.

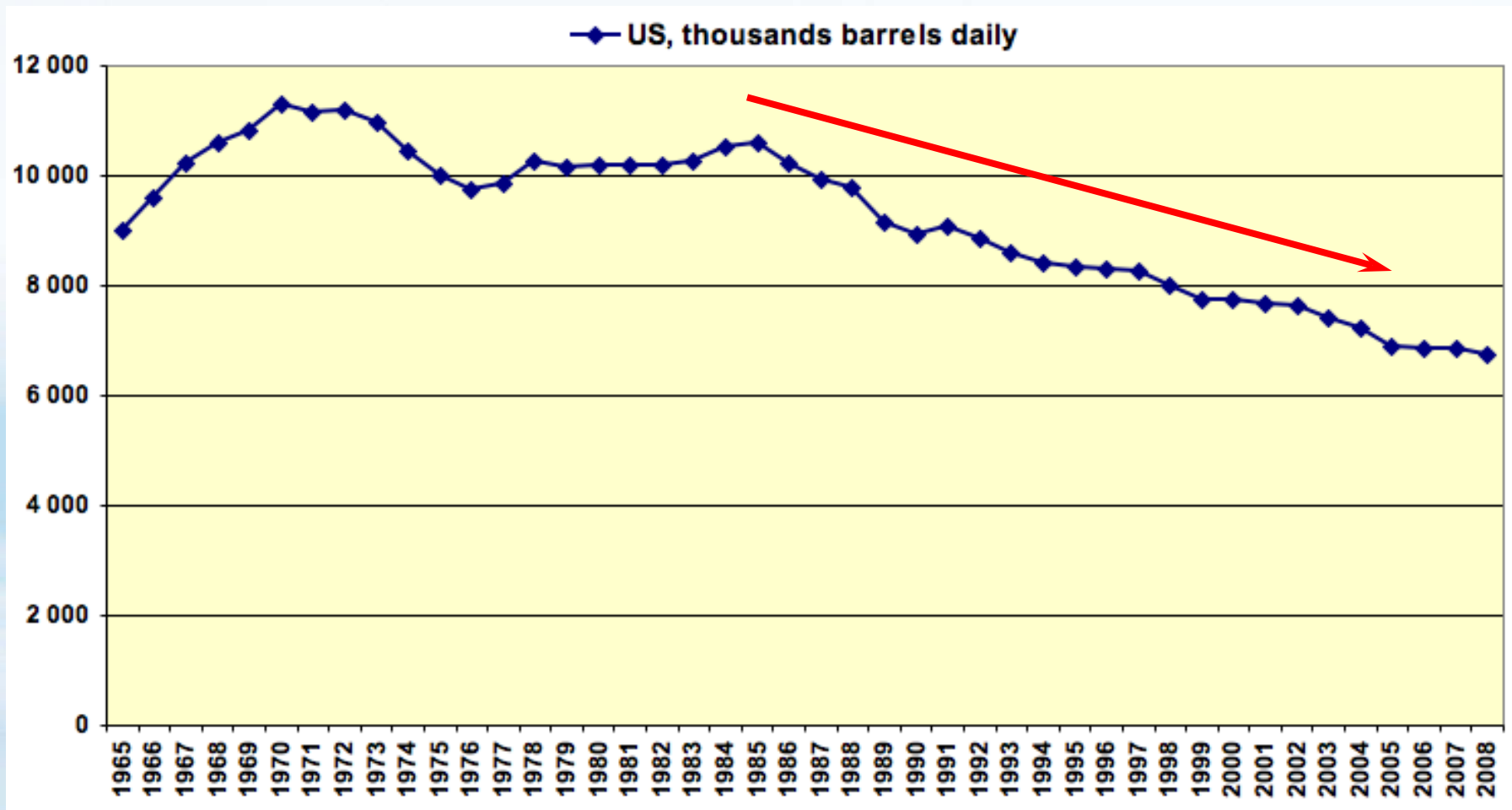
Source BP Statistical Review, 2009

# Le pic, une réalité déjà fréquente - 3



Production de pétrole en Indonésie (< 2% de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Pic en 1977, pic secondaire en 1991.

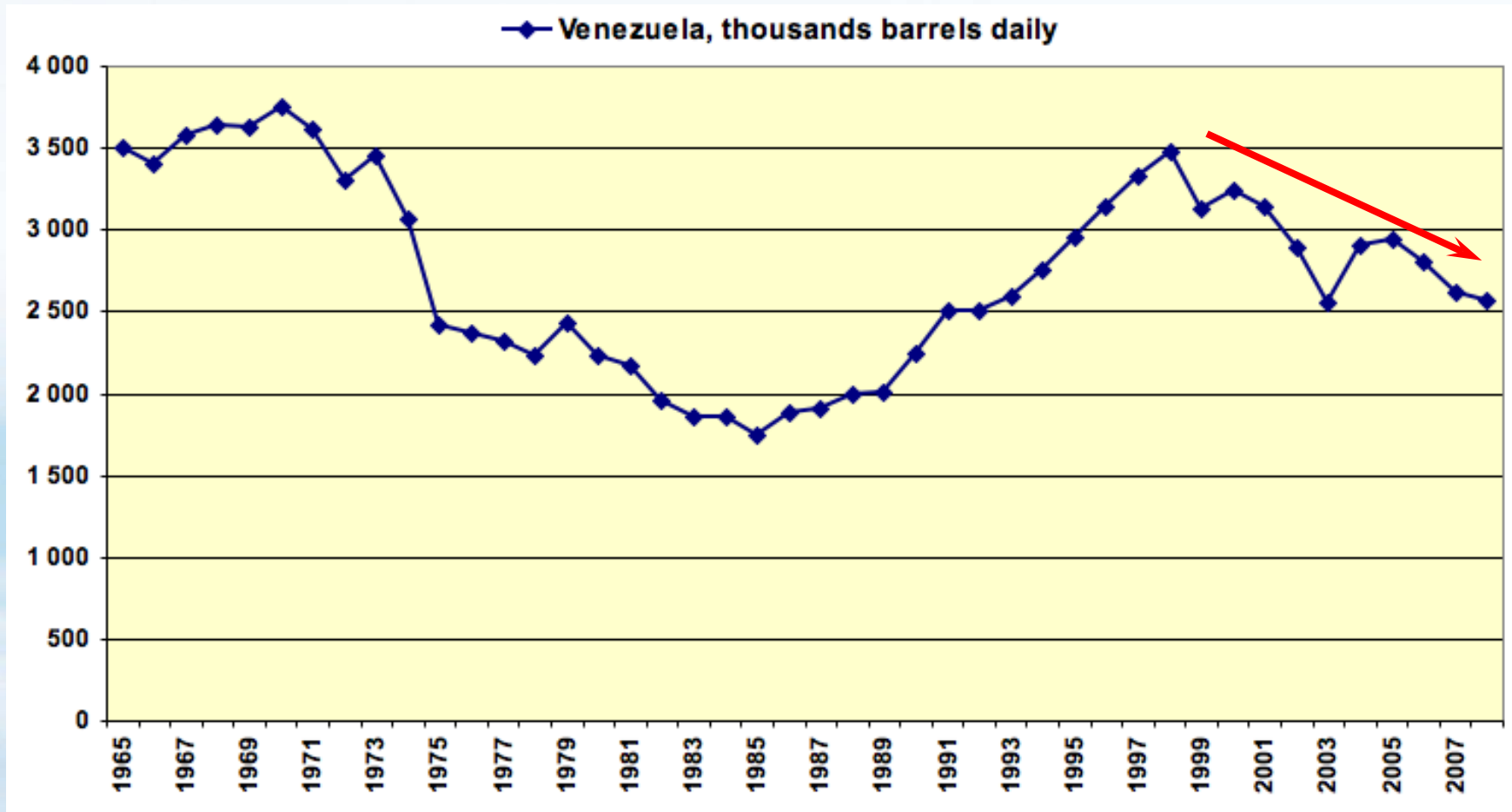
Source BP Statistical Review, 2009



Production de pétrole aux USA ( $\approx 8\%$  de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Pic en 1970.

Source BP Statistical Review, 2009

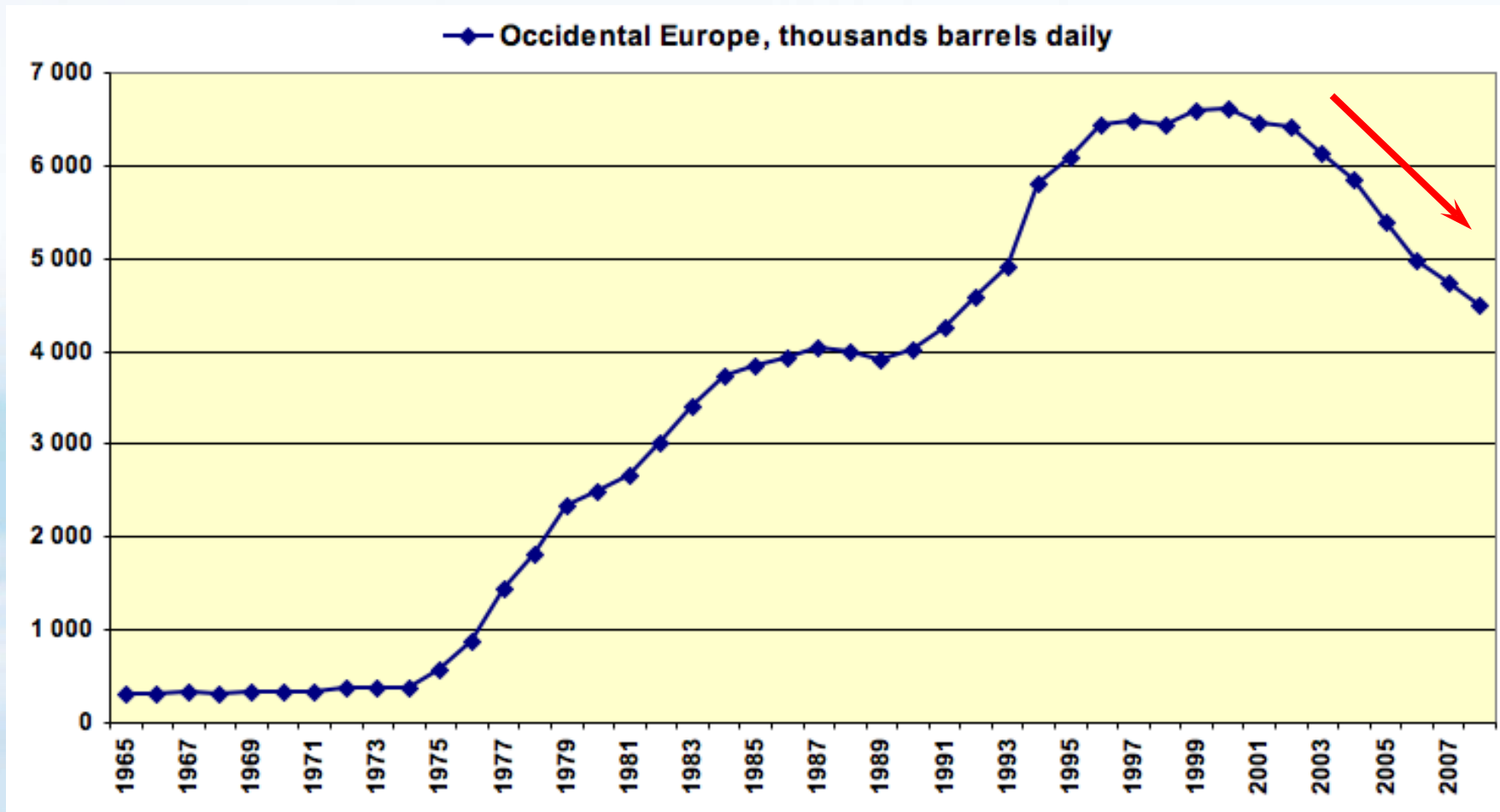
# Le pic, une réalité déjà fréquente - 6



Production de pétrole au Venezuela ( $\approx 3\%$  de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Pic en 1970, pic secondaire en 1997.

Source BP Statistical Review, 2009

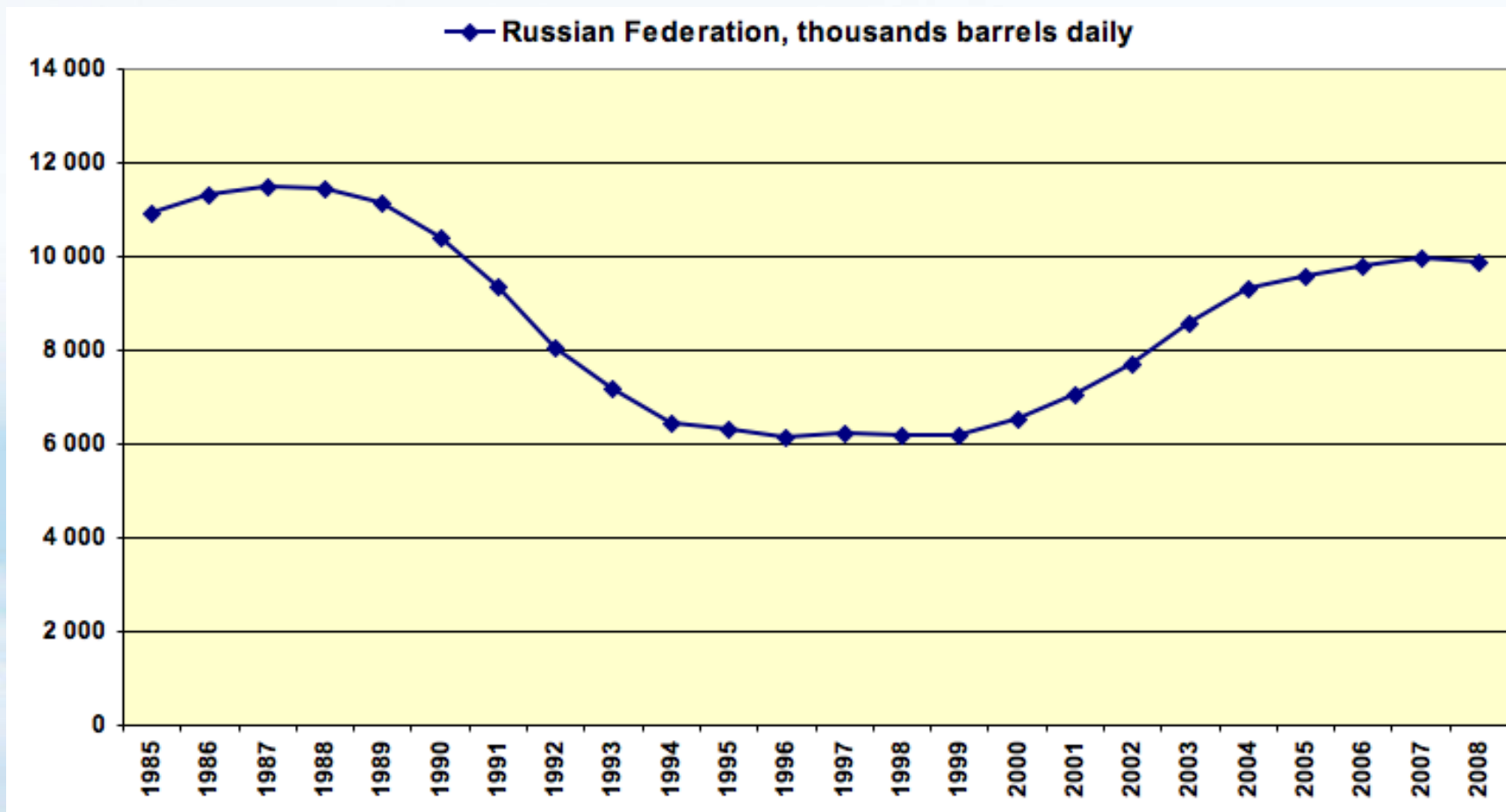
# Au grand jeu du pic, les Européens sont excellents



Production de pétrole en Europe ( $\approx 6\%$  de la production mondiale), en milliers de barils/jour. Pic en 2000.

Source BP Statistical Review, 2009

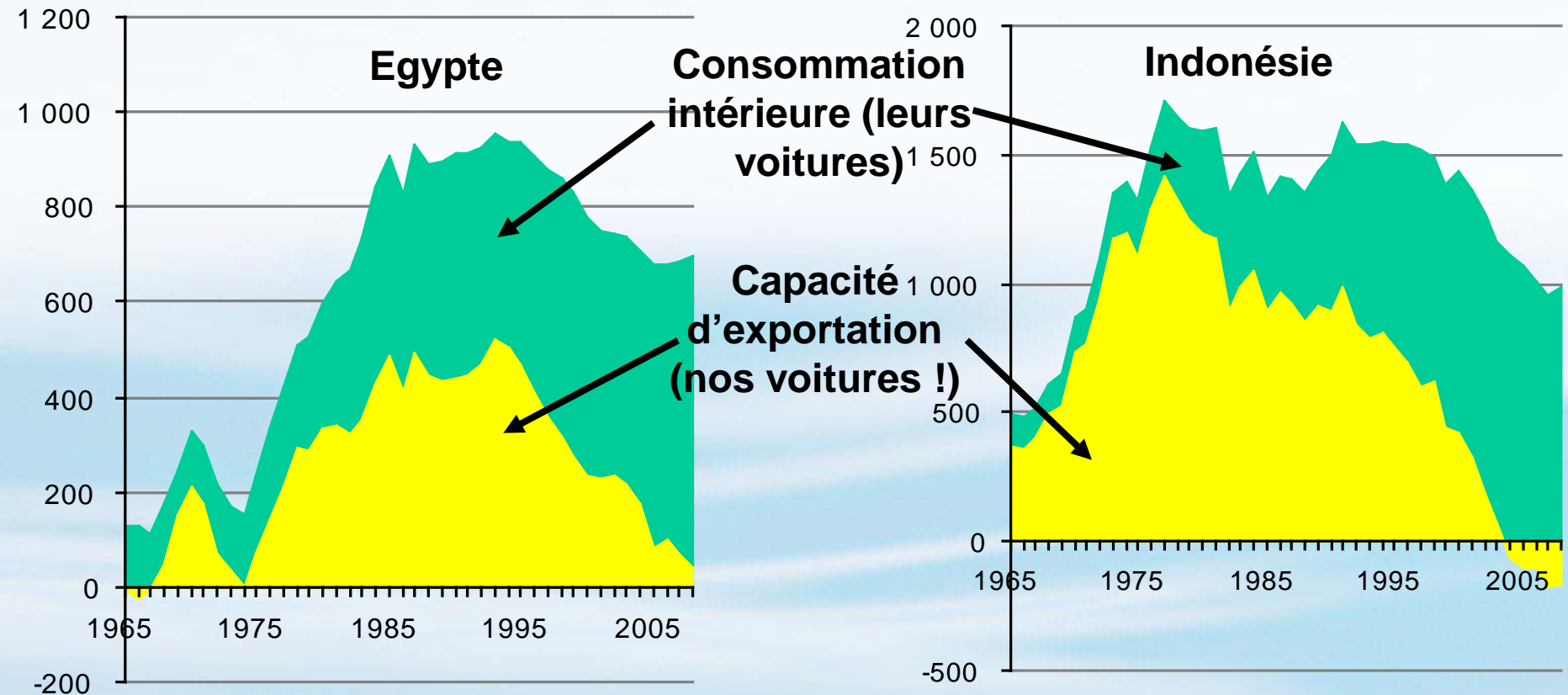
# Le pic, une réalité même chez Poutine...



Production de pétrole en Russie ( $\approx 12\%$  de la production mondiale, 2<sup>e</sup> producteur mondial), en milliers de barils/jour. Pic à la fin des années 1980, pic secondaire en cours.

Source BP Statistical Review, 2009

# Pic de la production... et pic des exportations !

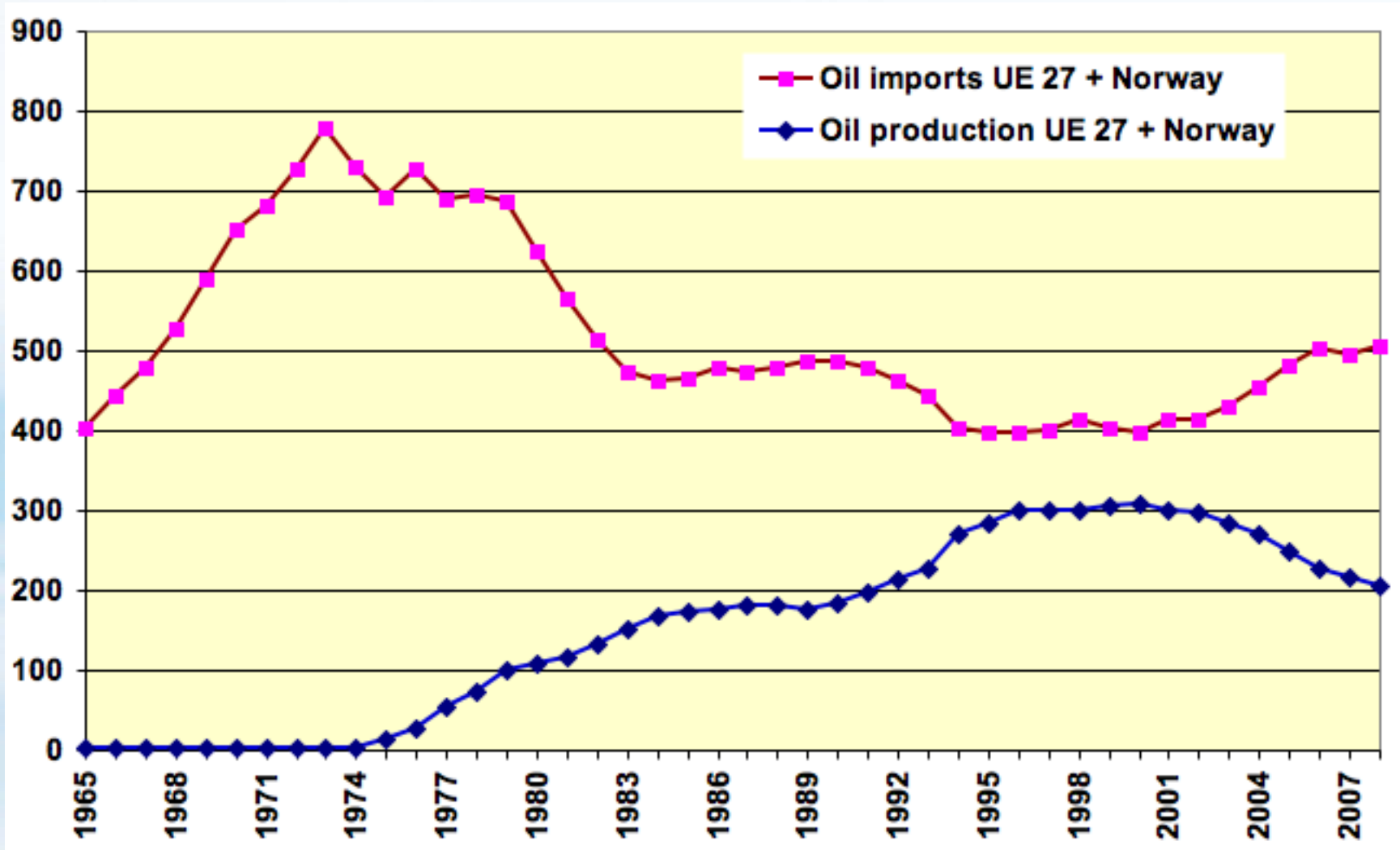


**Production (total des deux aires), consommation intérieure (en vert) et capacité d'exportation (en jaune) de deux producteurs de pétrole. Echelle verticale en milliers de barils par jour**

**D'après BP Statistical Review 2009**

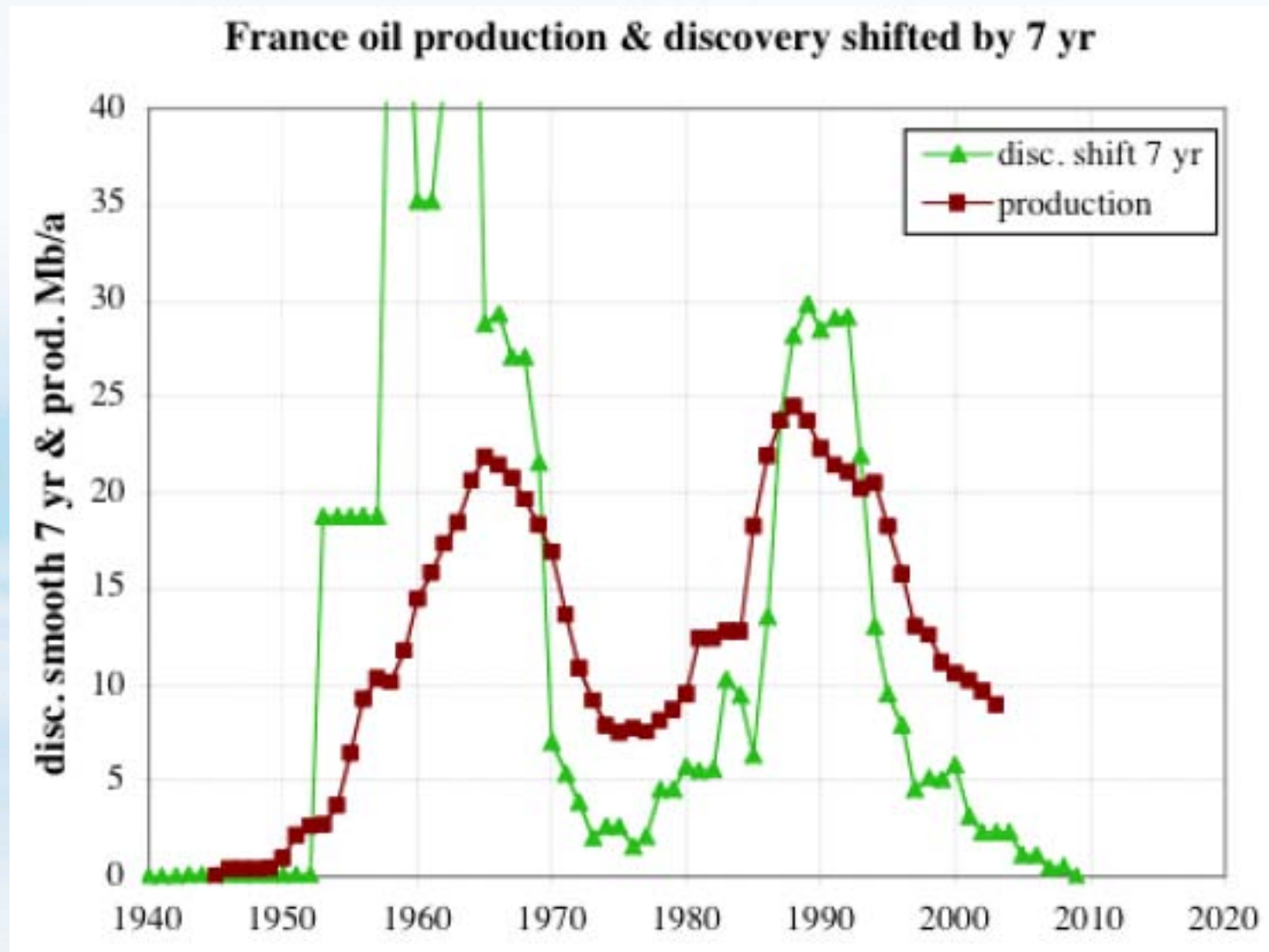


# L'automobiliste européen va le sentir passer



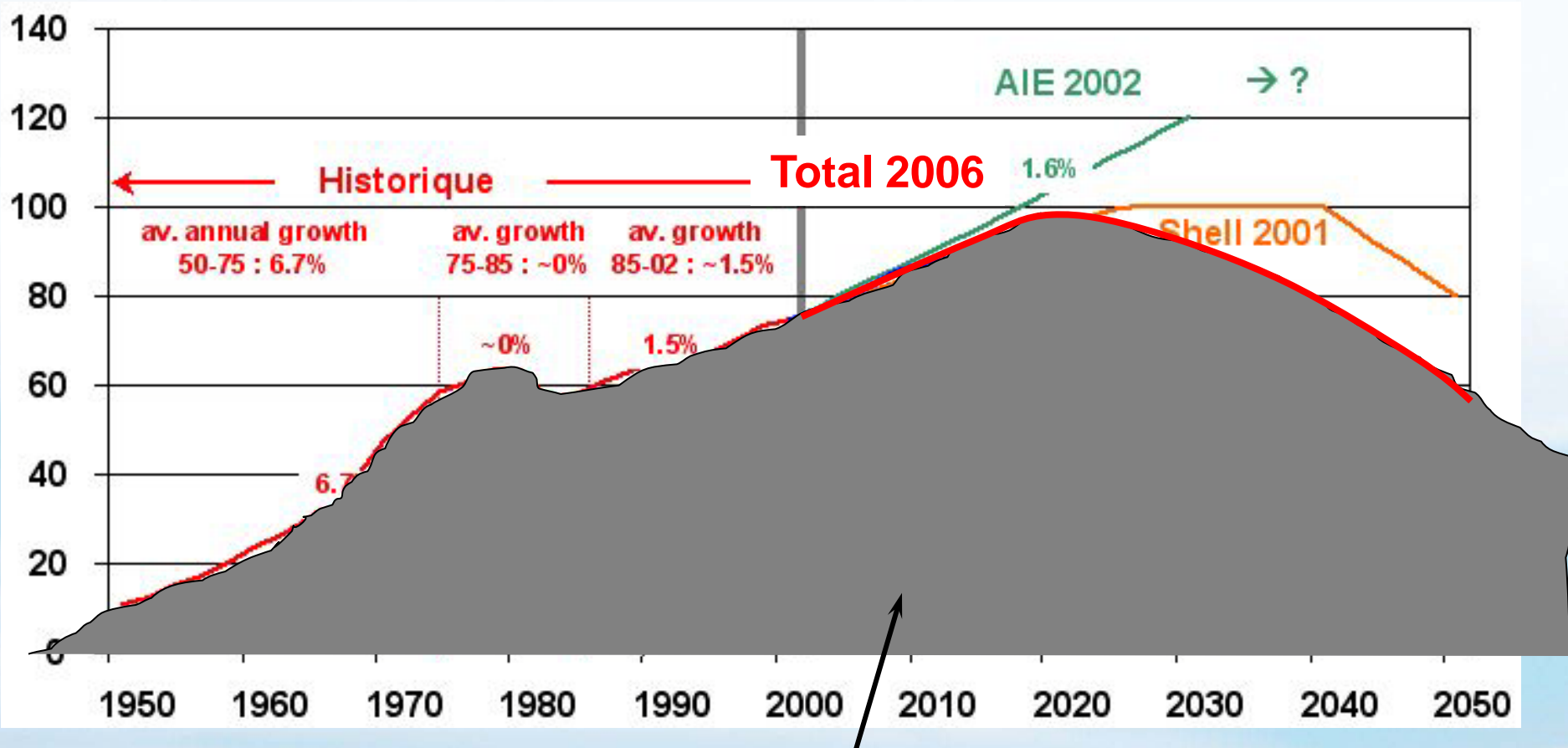
Production domestique et importations annuelles de pétrole, en millions de tonnes. Source BP Statistical Review 2009

# En France, peu de pétrole, mais deux pics !



Découvertes décalées de 7 ans et production en France. Source Laherrère

# De plus en plus de pétrole, pour combien de temps ?



Production cumulée < découvertes cumulées de pétrole récupérable = réserves ultimes

Source : Total, 2004

**Desmarets, 2004 : « nos confrères » envisagent un pic entre 2020 et 2030 ; nous on ne se prononce pas**

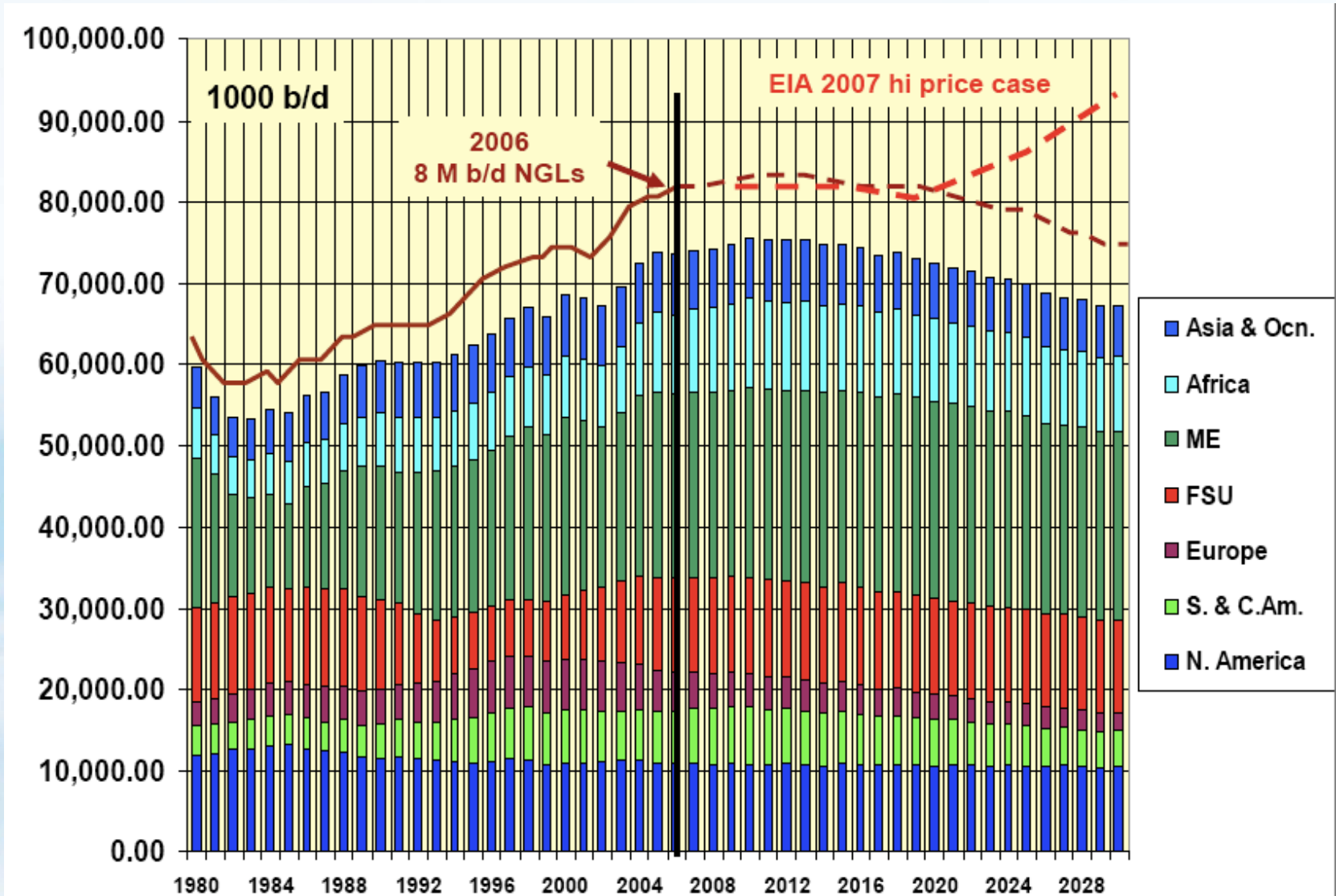
**Le même, 2006 : pic en 2020, à moins de 100 millions de barils/jour**

**De Margerie, 2007 : pic avant 2015, à moins de 95 millions de barils jour**

**De Margerie, 2009 : pic avant 2015, à moins de 90 millions de barils jour**

**...et en 2008 nous étions à 87 millions de barils jour !**

# Les insiders sont-ils fiables ?



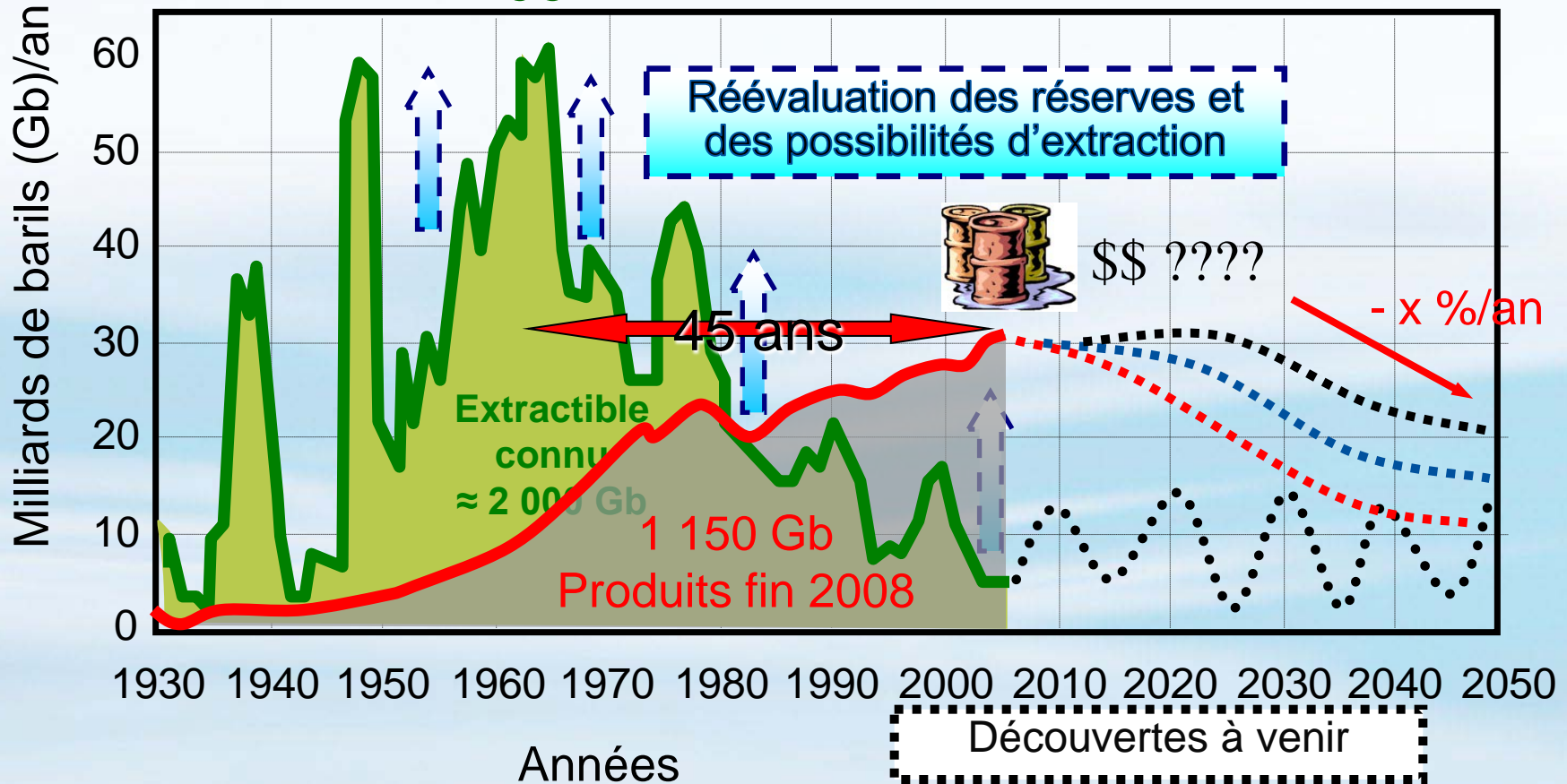
**Projection de la production pétrolière mondiale, discriminée par zone de production.**  
**Source : Dr. Sadad I. Al Hussein (ancien cadre dirigeant de la Saudi Aramco), Oil and Money Conference, October 30, 2007**

# Des idées et pas de pétrole, voilà le résultat

Découvertes annuelles de pétrole

Production annuelle de pétrole

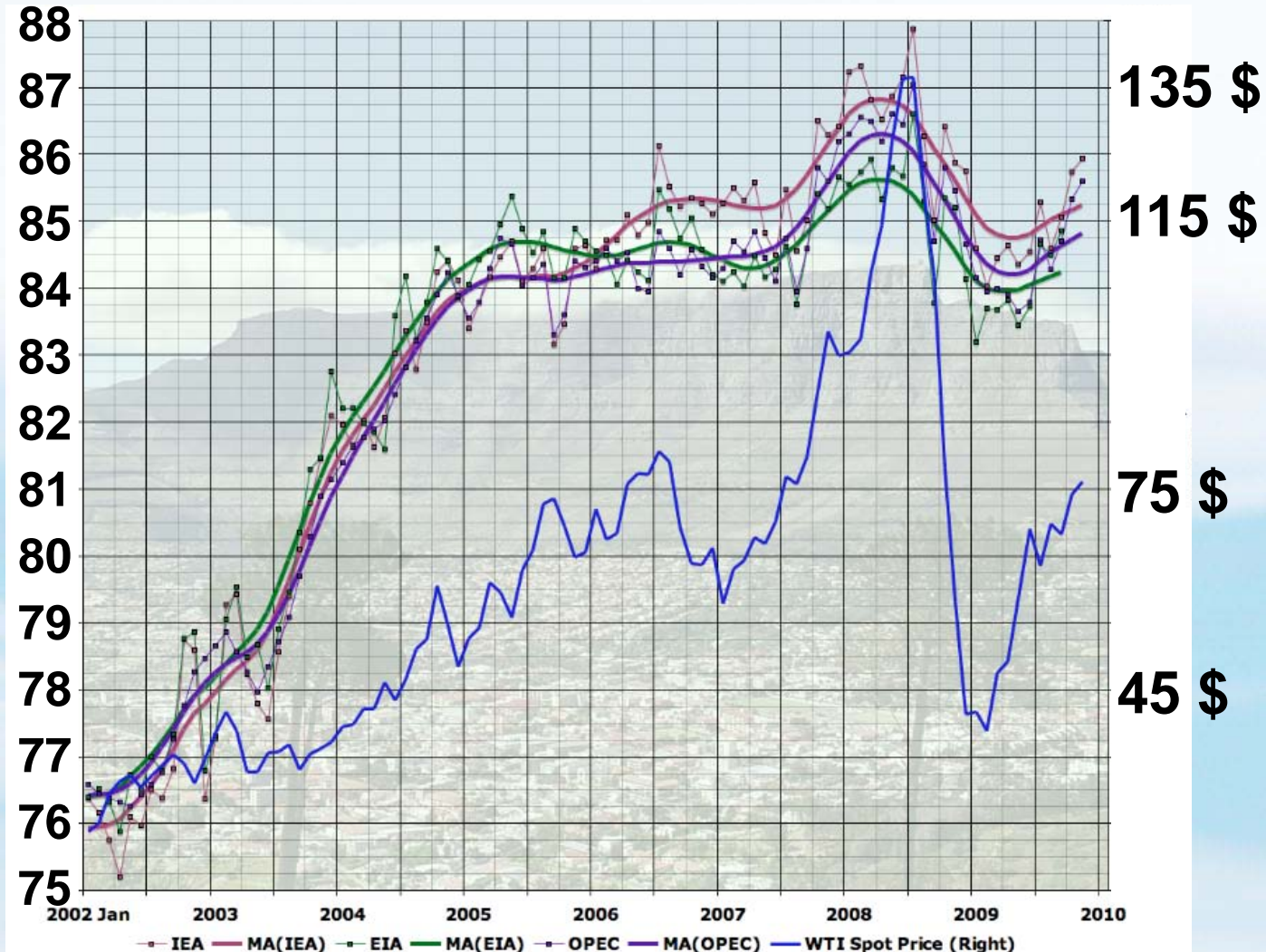
1964



Institut Français du Pétrole, Direction Géologie-Géochimie-Géophysique

Yves MATHIEU Combloux 2009

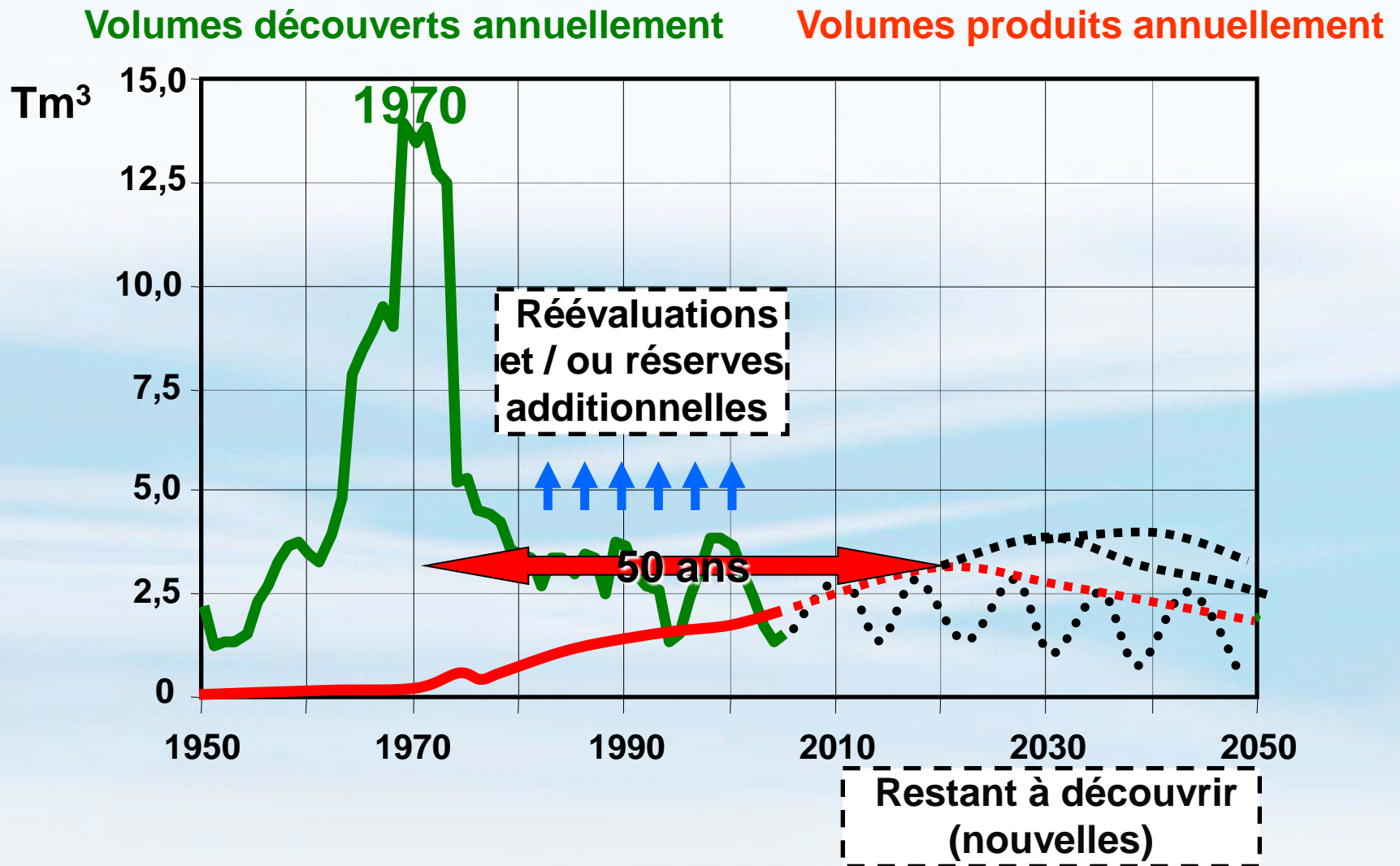
# Peak oil et... peak price ?



Production pétrolière mondiale selon les sources (échelle de gauche) et prix (échelle de droite)

Sources diverses

# Plus de pétrole ? Mettons la croissance sur le gaz !

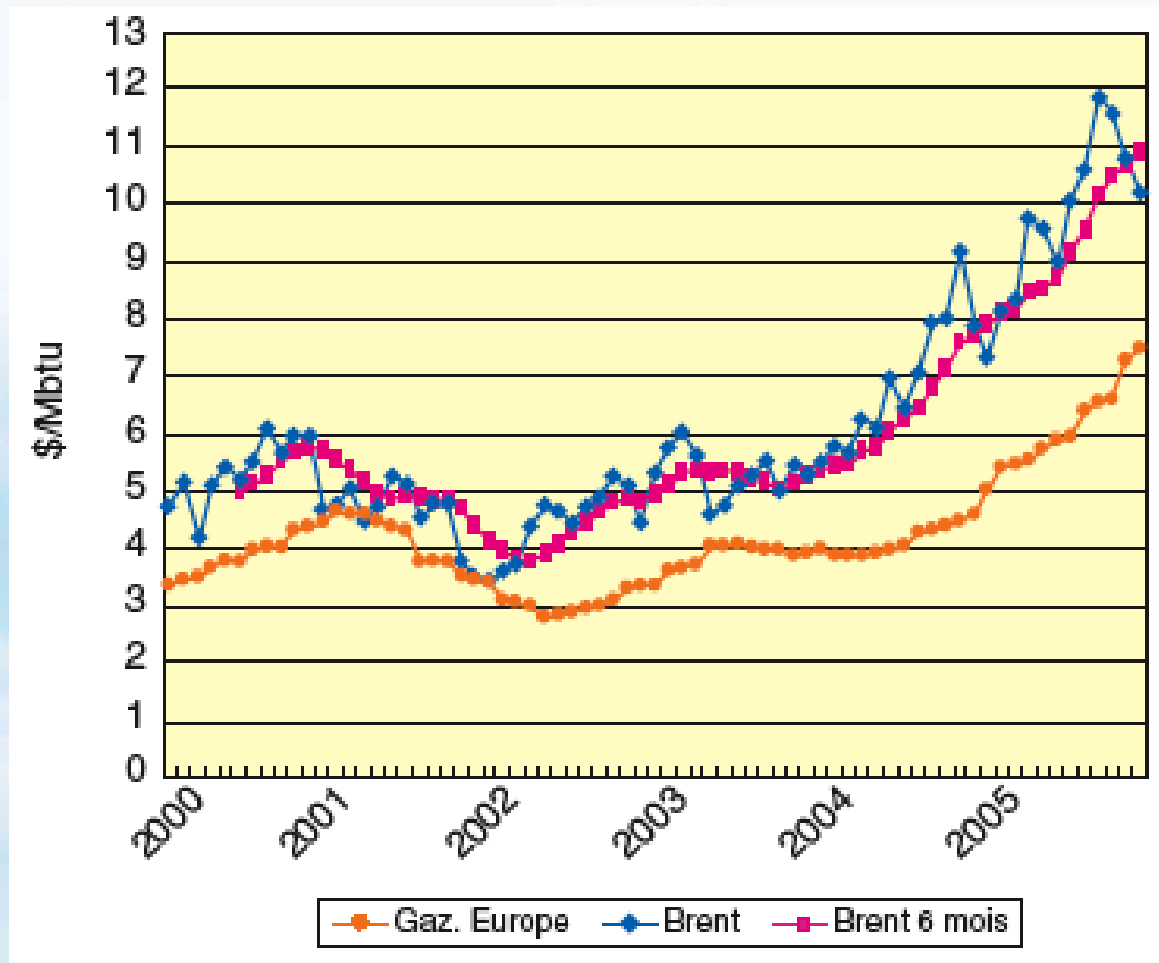


Direction Géologie-Géochimie-Géophysique

Yves MATHIEU Combloux 2009

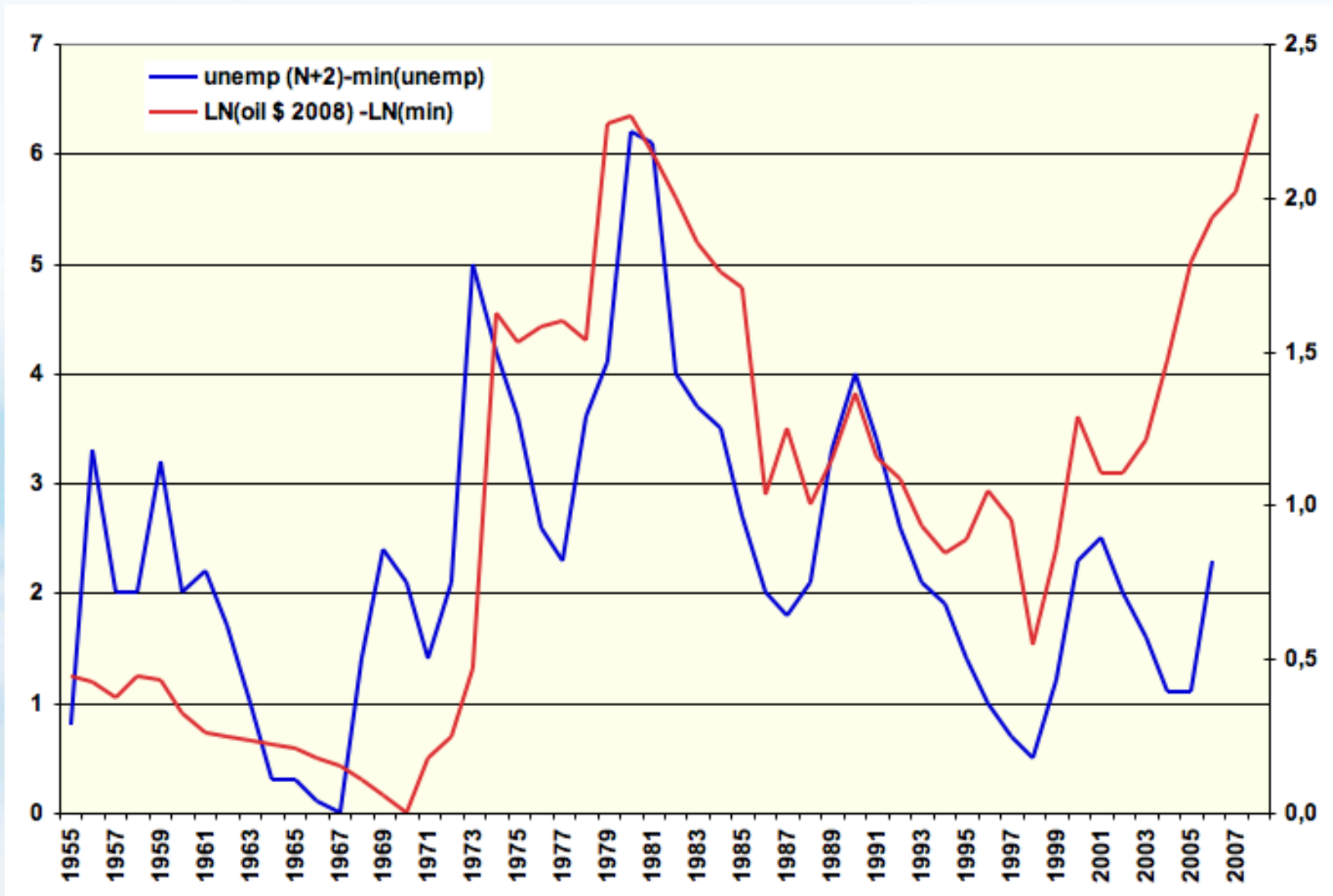


# Pétrole et gaz marchent main dans la main



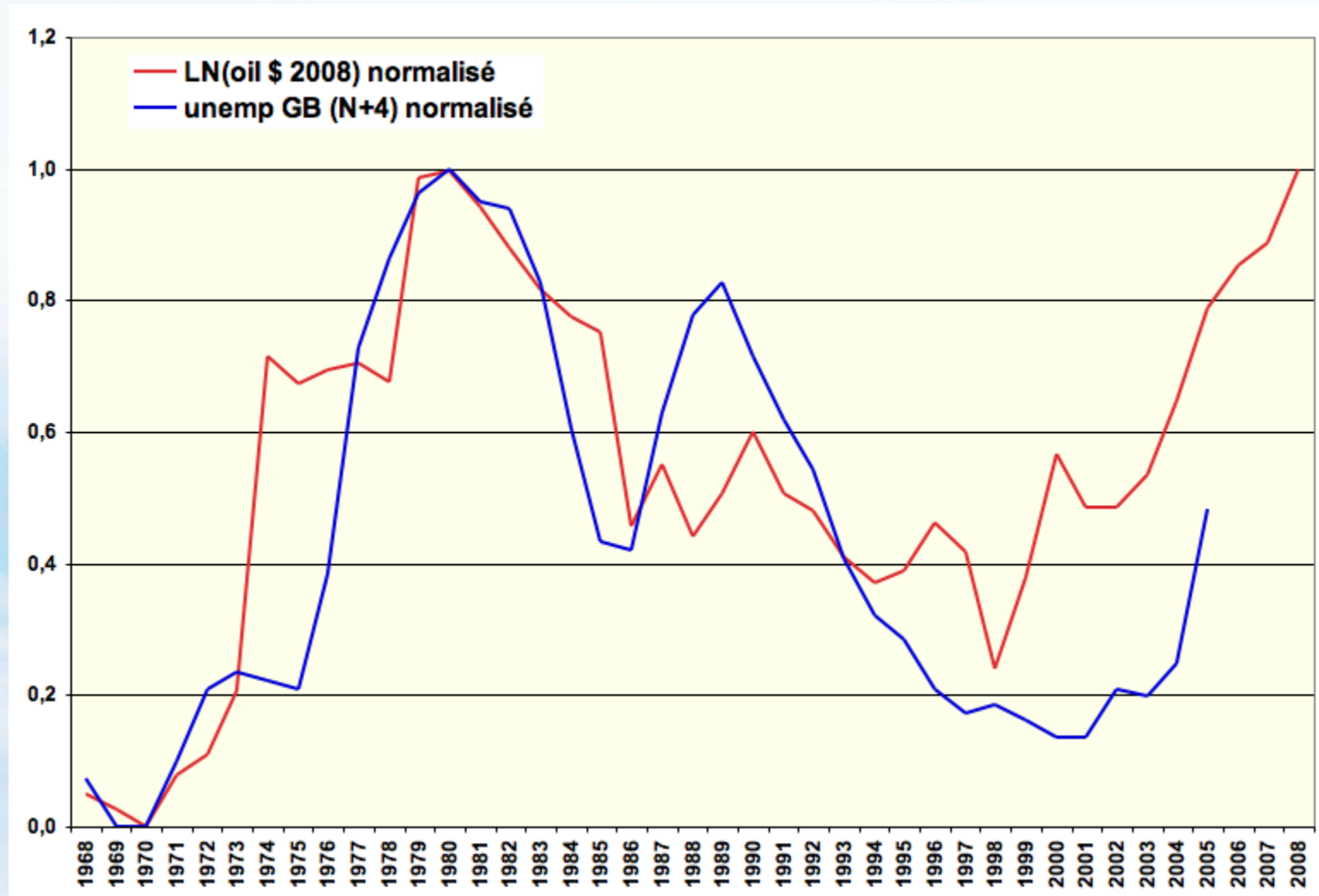
Evolution respective des prix du pétrole et du gaz en Europe, en \$/MMBTU, de 2000 à 2005. Source IFP, Panorama 2006

# Le chômage : les banques, ou le pétrole ?



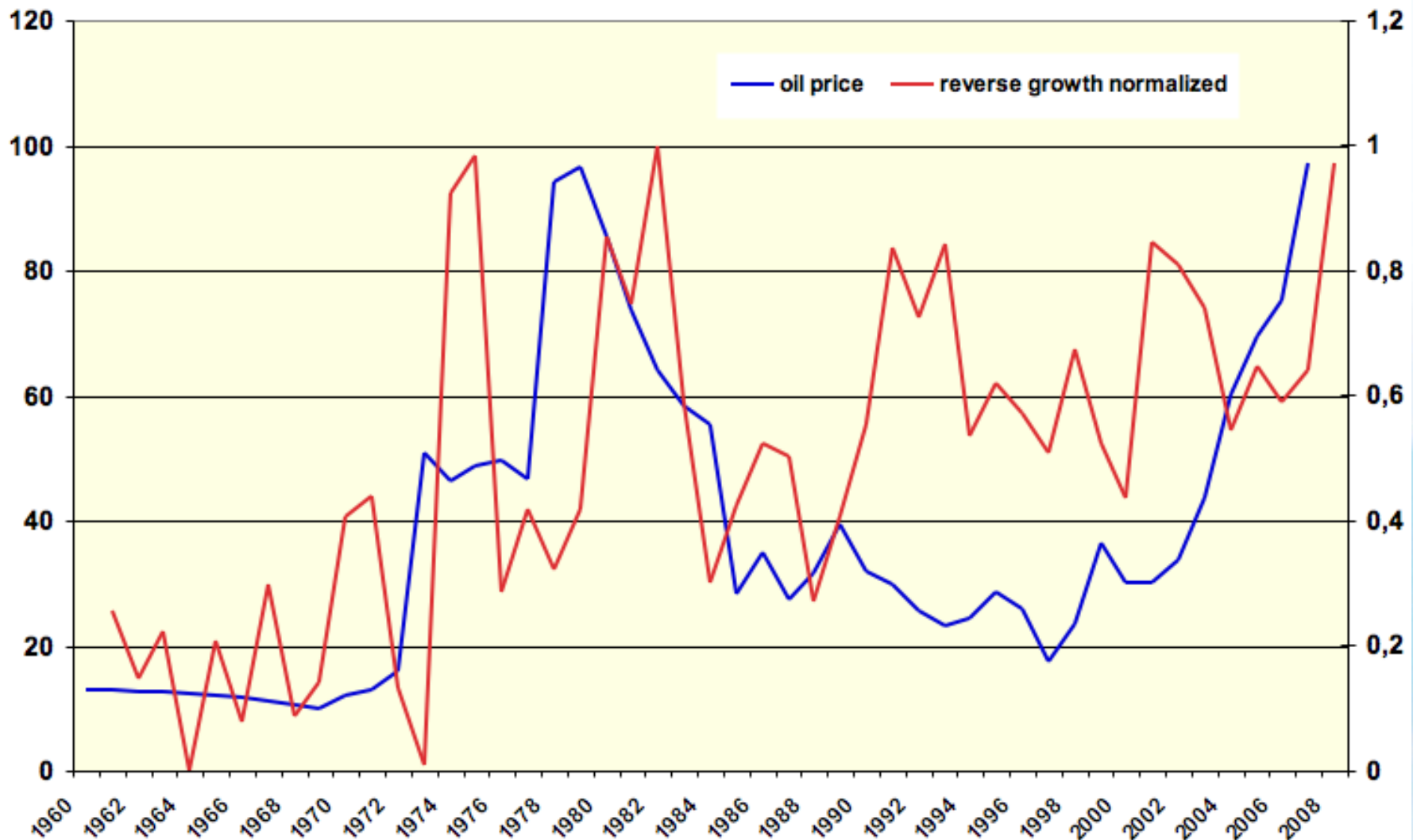
Corrélation aux US entre prix du pétrole année N, et chômage année N+2. Prix du baril source BP Stat 2009, chômage source OCDE.

# Le chômage : les banques, ou le pétrole ?



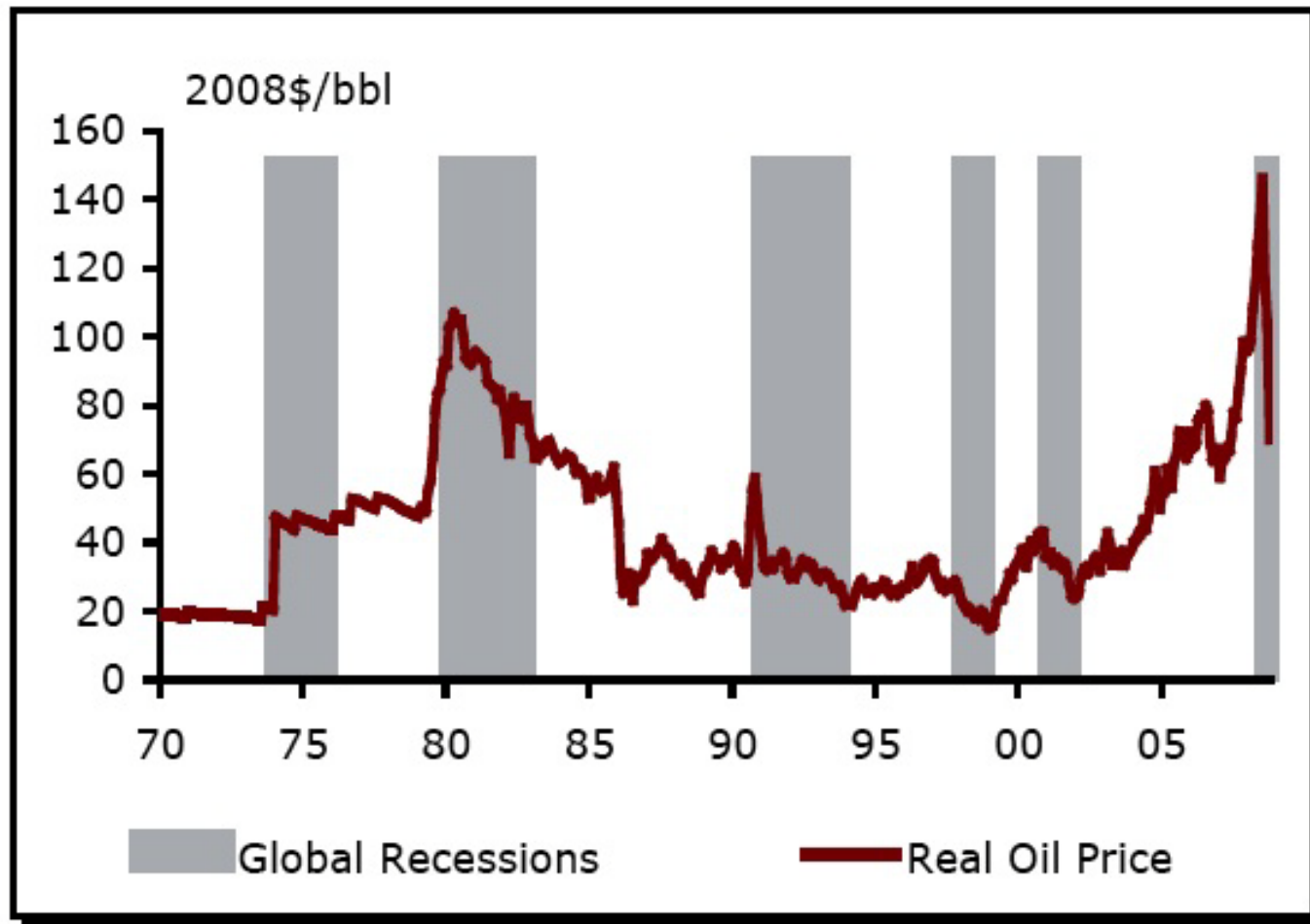
Corrélation en Grande Bretagne entre prix du pétrole année N, et chômage année N+4. Prix du baril source BP Stat 2009, chômage source OCDE.

# La croissance : les élus, ou le pétrole ?



« croissance inversée », normalisée, pour la zone OCDE, et évolution du prix du pétrole.

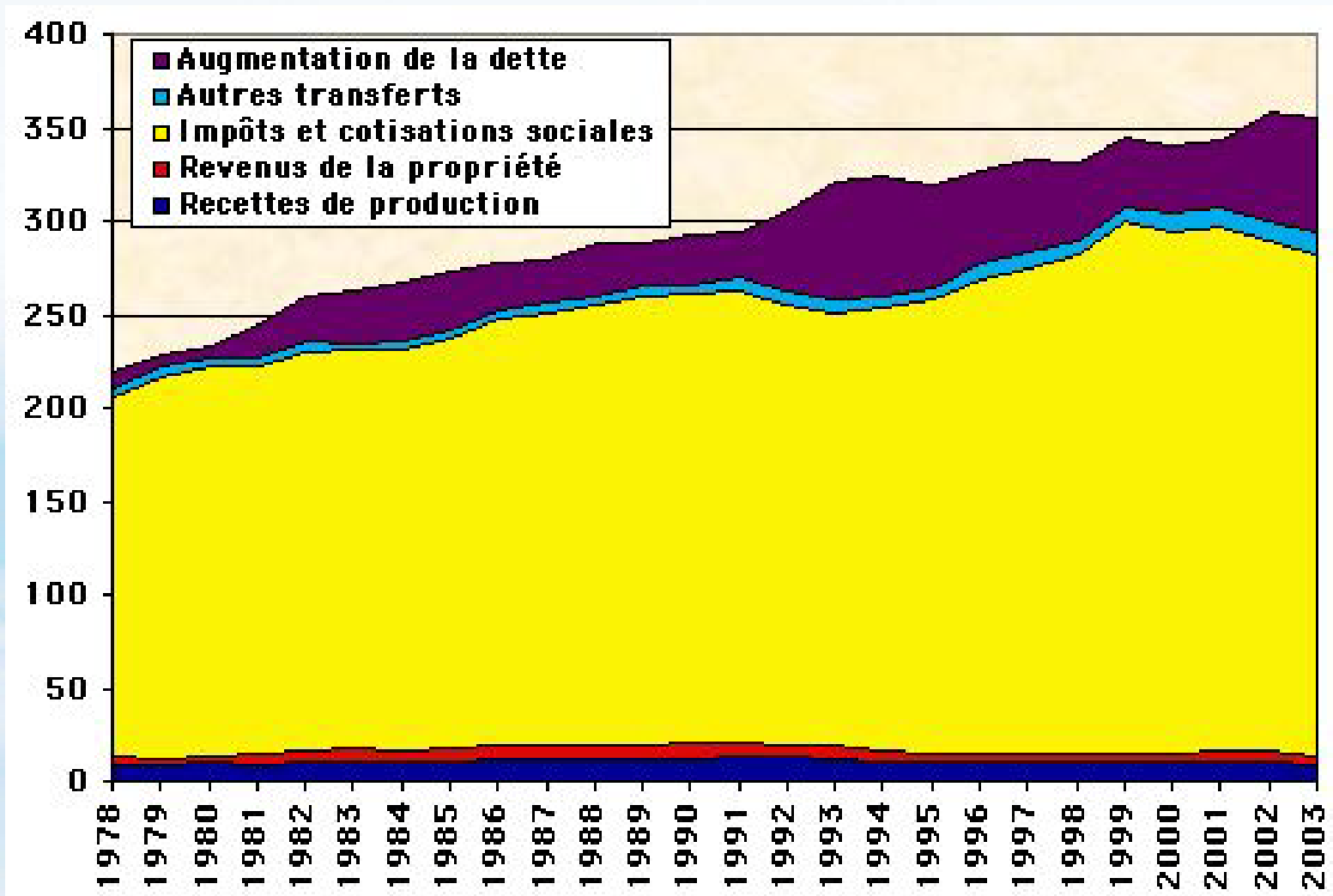
# La crise : les banques, ou le pétrole ?



Depuis 1970, chaque hausse de prix du baril est suivi d'une récession, et inversement le pétrole baisse surtout en période de récession.

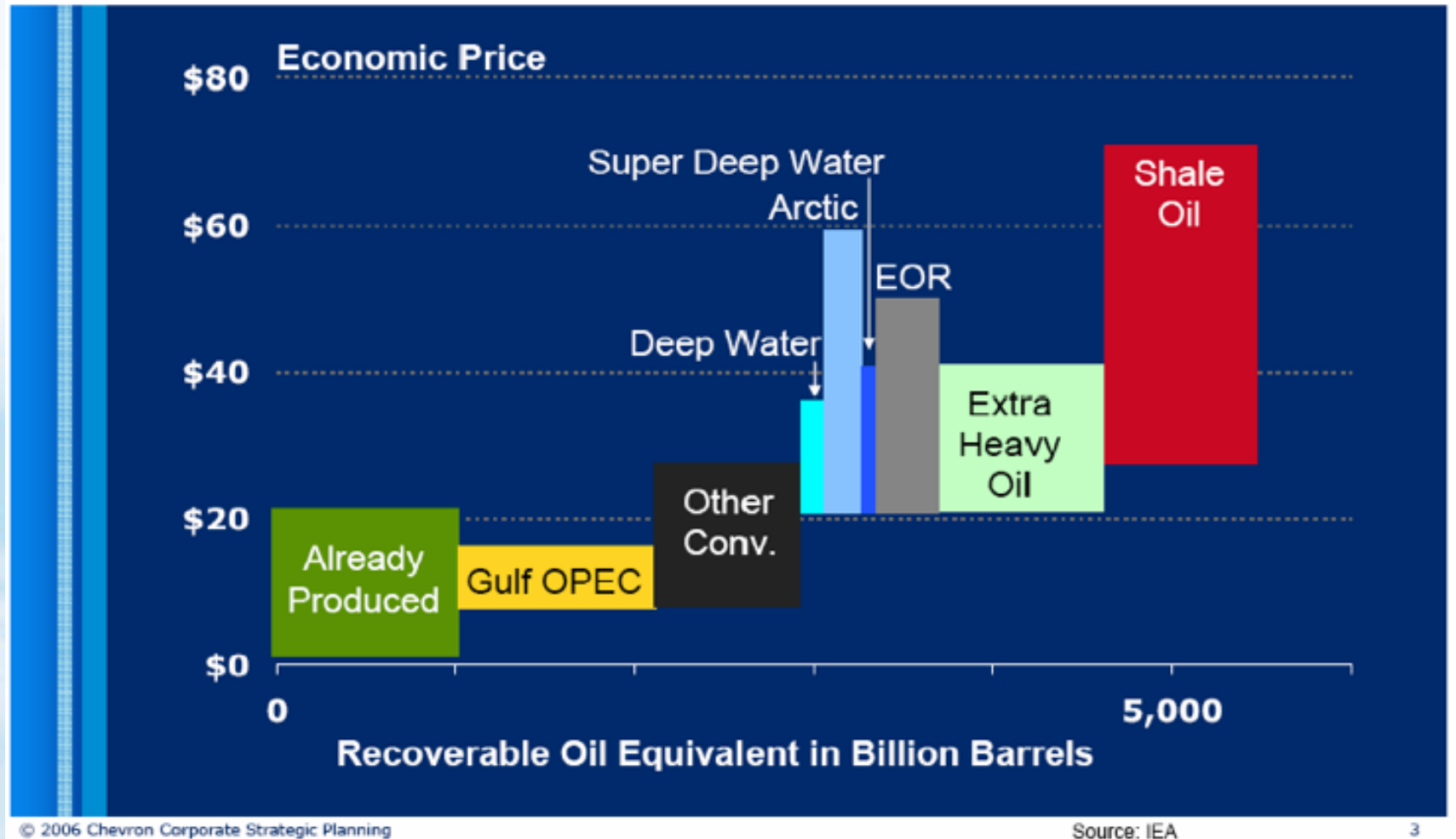
Source CIBC World Markets, octobre 2008

# Le déficit budgétaire : l'incurie des politiques, ou le pétrole ?



Revenus de l'Etat depuis 1978 par nature de contribution : le recours à l'endettement date... du premier choc pétrolier, et augmente à chaque récession. Source INSEE/comptes de la Nation, 2004.

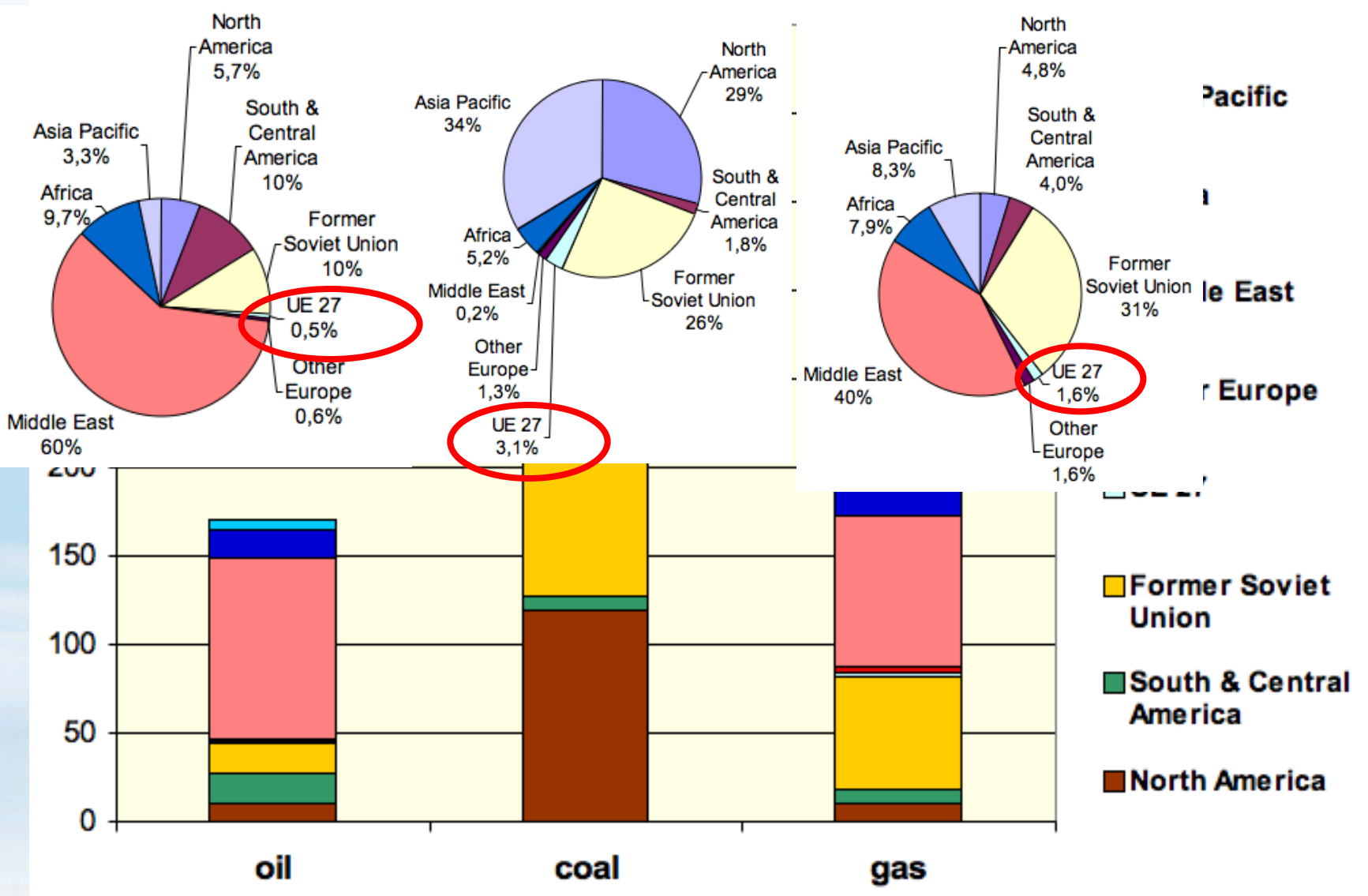
# Il reste du carbone ailleurs, hélas ou heureusement



Réserves ultimes de pétrole conventionnel et non conventionnel, et prix d'extraction en dollars par baril.

Source Chevron/AIE, 2006

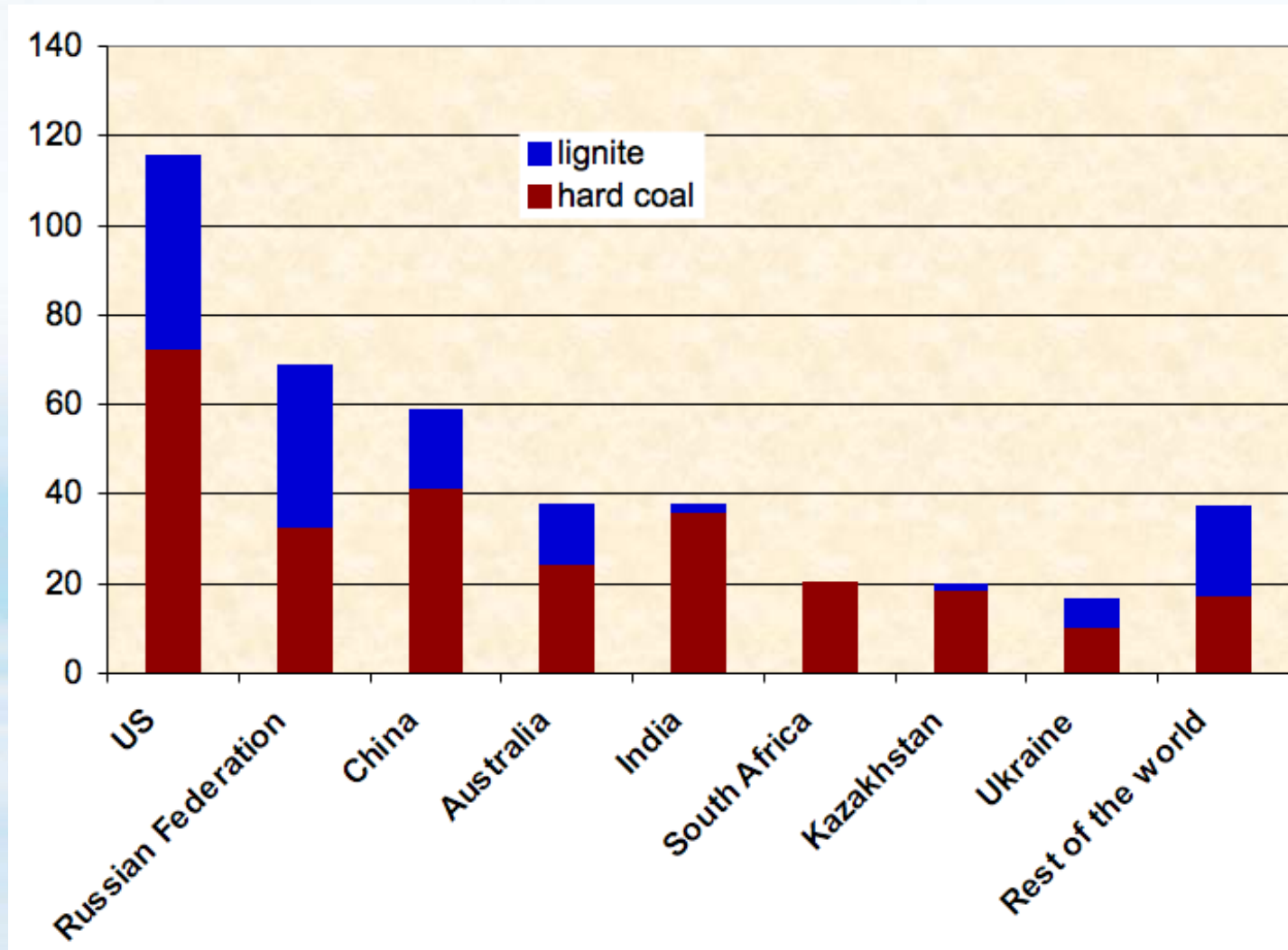
# Le problème se complique beaucoup : le carbone est ailleurs



Réserves de combustible fossile par nature (BP Statistical Review, 2009).  
Avec ou sans climat, l'Europe devrait sérieusement se gratter la tête...



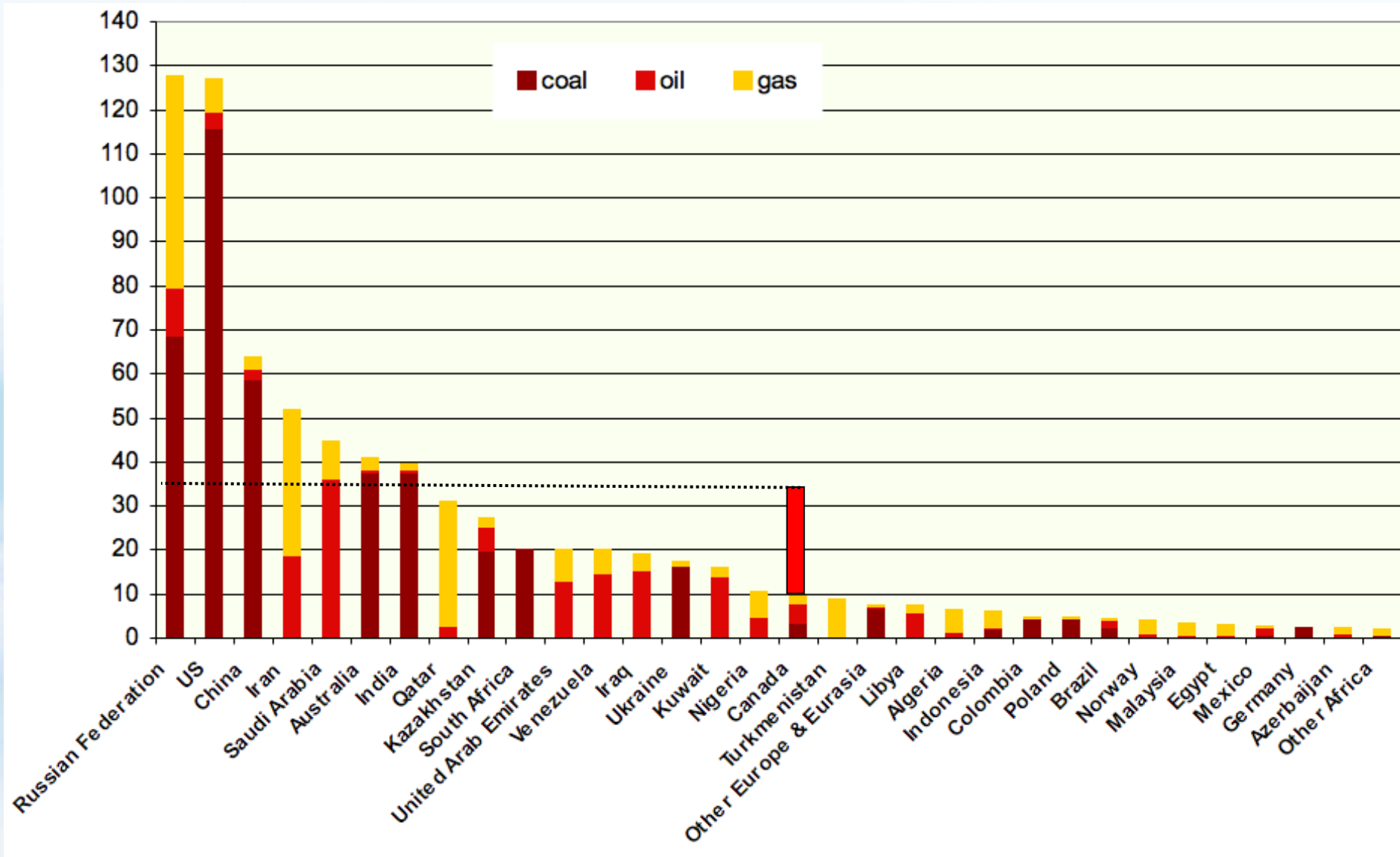
# Le problème se complique encore !



Réserves de charbon par pays (BP Statistical Review, 2009).

**8 pays possèdent plus de 90% du charbon mondial !**

# Et qui arrive en tête des réserves de carbone?

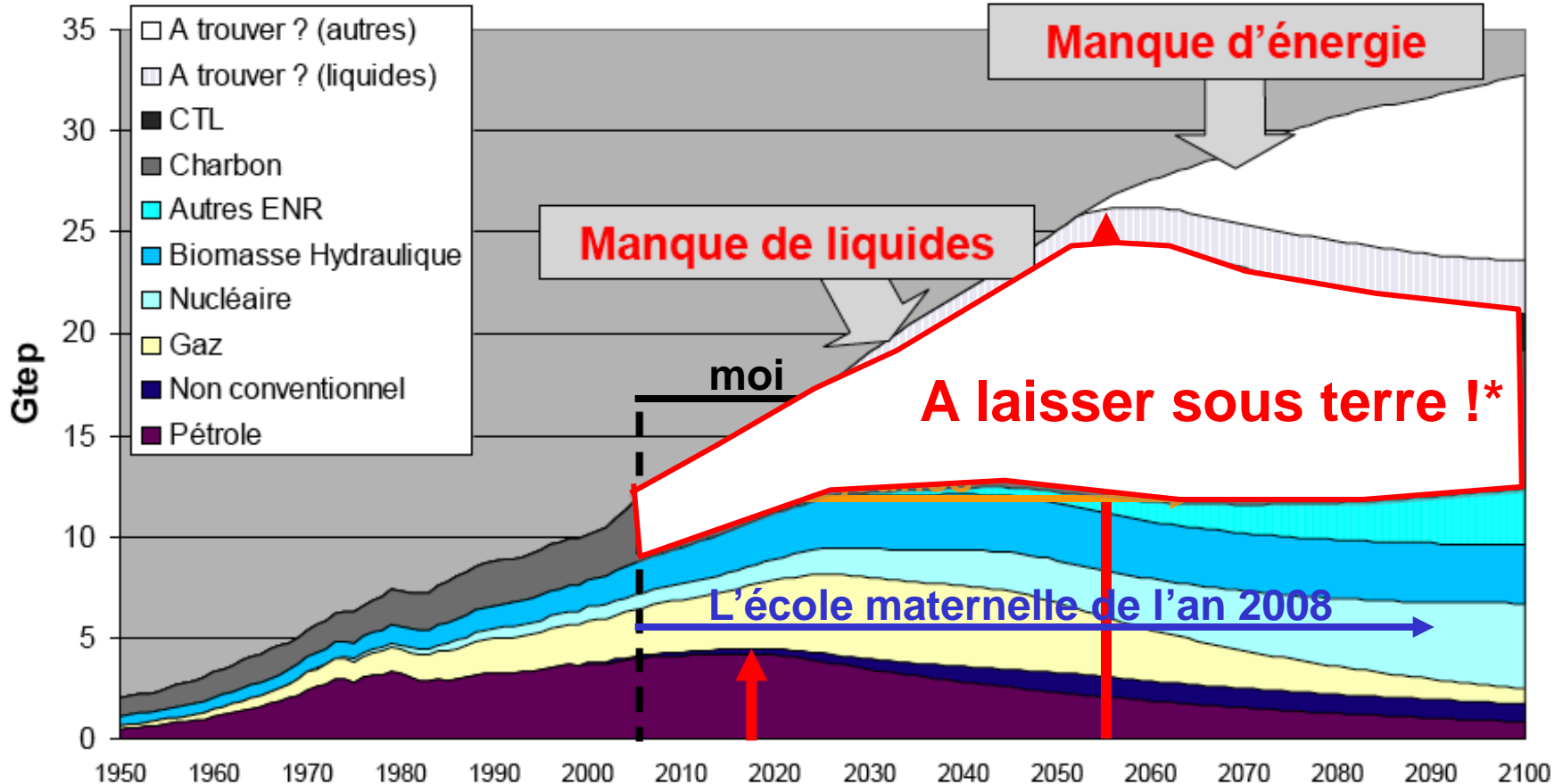


Réserves prouvées gaz+pétrole+charbon. Source BP Stat, 2009

# Cramer tout le charbon : 30 à 40 ans de rab...

## Quelles énergies pour demain ?

(demande tendancielle)



\*Sauf pour la partie faisant l'objet d'un captage stockage...

Source du graphique : Bernard Rogeaux, EDF, décembre 2007

# Du pétrole vers le charbon : de Charybde en Scylla...

Concentration atmosphérique en CO <sub>2</sub> au moment de la stabilisation	Concentration atmosphérique tous gaz à effet de serre au moment de la stabilisation en CO <sub>2</sub> -équivalent	Période de survenance du maximum des émissions de CO <sub>2</sub>	Augmentation de température globale à l'équilibre, par rapport à la température de 1850
350 à 400 ppm	445 à 490 ppm	2000 à 2015	2,0 à 2,4 °C
400 à 440 ppm	490 à 535 ppm	2000 à 2020	2,4 à 2,8 °C
440 à 485 ppm	535 à 590 ppm	2010 à 2030	2,8 à 3,2 °C
485 à 570 ppm	590 à 710 ppm	2020 à 2060	3,2 à 4,0 °C
570 à 660 ppm	710 à 855 ppm	2050 à 2080	4,0 à 4,9 °C
660 à 790 ppm	855 à 1130 ppm	2060 à 2090	4,9 à 6,1 °C

**450 ppm de CO<sub>2</sub> à stabilisation : nous avons « encore droit » à 250 Gt de carbone, soit les réserves pétrolières et gazières prouvées et RIEN DE PLUS**

**Source IPCC, novembre 2007**