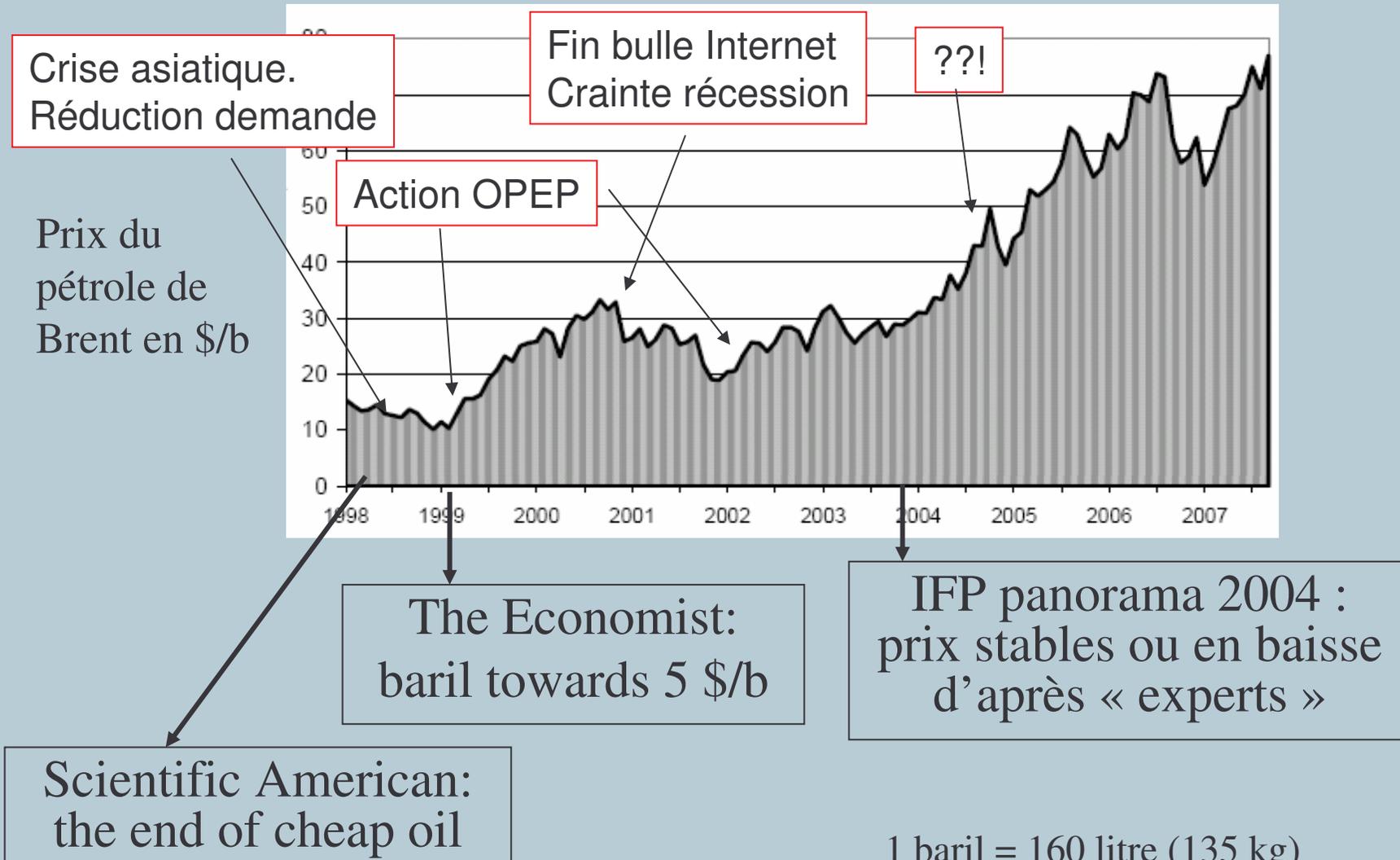


# Le pétrole et le pic de Hubbert



# En 2004

- Peu de perturbations politiques et climatiques ; au contraire :  
Production OPEP (sauf Irak et Venezuela) : + 15% en 2003 + 5% en 2004 !
- forte croissance économique en 2004  
=> forte consommation de pétrole + 4%/a  
(moy. depuis 1985 : 1,5% par an).  
Mais de 1945 à 1975 7%/a en moyenne

**capacités limités**

**Fin du pétrole pas cher**

# Plan de la présentation

## **Historique et importance économique**

### **A Les données techniques sur le pétrole**

Ses caractéristiques chimiques et physiques

Son origine

Sa prospection

Son exploitation

### **B Productions et réserves dans le monde**

Modèles de prévision de la production

Production de la mer du Nord

Production en Arabie Saoudite

Production mondiale

# Bibliographie

- M. K. Hubbert, nuclear energy and the fossil fuels, pub. n°95, Shell development company, june 1956.
- A. Perrodon, quel pétrole demain ?, ed. Technip, 1999.
- X. Boy de la Tour, le pétrole au-delà du mythe, ed. Technip, 2004.
- [Aspofrance.org](http://Aspofrance.org) > documents > X. Chavanne  
ASPO : Association for the Study of Peak Oil and gas (2001)  
Étude du maximum de production pétrolière et gazière  
ASPO-France depuis 2005 avec 25 autres antennes nationales

# L'historique du pétrole

**Antiquité, Moyen Age** : bitume pour calfeutrer  
huile de lampe

**Fin XIXe** : début production industrielle (Bakou, Etats-Unis d'A)

**Raffinage** : séparation des fractions du pétrole

Utilisation pour chauffage et éclairage

Moteurs à explosion et combustion interne : **carburants**

**1862** : début de la fortune de J. D. Rockefeller. Il fonde en 1870 la Standard oil company. La compagnie est démembrée en 1911.

# L'histoire du pétrole

**1907** : fusion de Shell et Royal Dutch oil pour l'exploitation du pétrole en Asie. D'autres compagnies voient le jour.

**1927** : pacte entre les sept plus grandes compagnies pétrolières. Elles domineront le marché du pétrole jusqu'en 1970. Limitation de la production.

Début des grandes découvertes au Moyen Orient.

**1945** : une puissance du pétrole (EUd'A) l'emporte sur une puissance du charbon (l'Allemagne)

# L'historique du pétrole

**Années 60** : le pétrole supplante le charbon comme première ressource énergétique. Croissance de 7 % par an.

**1970 - 80** :

les grandes compagnies pétrolières perdent leur pouvoir.

Emergence de l'OPEP

Crises pétrolières

**Maximum naturel de production aux Etats-Unis d'A.**

**1985** : contre-choc pétrolier

# L'industrie pétrolière depuis 1985

Industrie = Compagnies multinationales, nationales et sociétés de service

- Cours du pétrole à 20\$/b en moyenne ; parfois 10\$/b (en 1998)
- Producteurs endettés (pays, compagnies)

Remarque : 1945-1970 cours moyen à 12\$/b (\$2004)  
et compagnies riches.

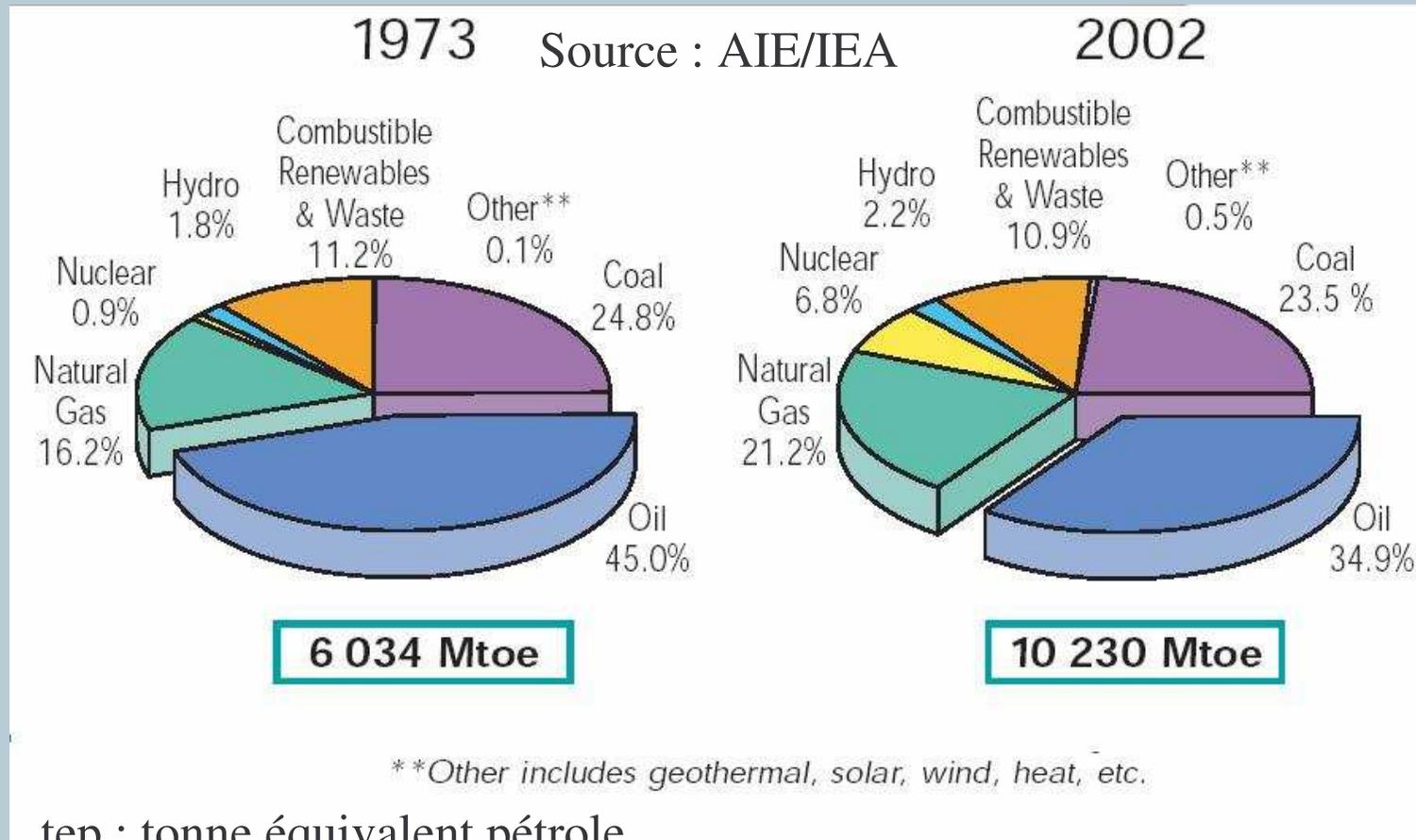
- Economies préjudiciables à long terme : matériel, personnel...
- Explosion des coûts en E&P : investissements 10 à 50 fois plus élevés sur nouveaux gisements + hausse des coûts sur les anciens !

Prix du baril plus cher depuis 2003 => nouveaux investissements

Remarque : 80 \$/b => 0,07 euros le verre ! Pas si cher

# Importance économique

# Energies primaires dans le monde



**Pétrole : 1973 : 2,7 Gtep ou 20 Gb**

**2002 : 3,6 Gtep ou 26 Gb**

0,71 tep/pers /an

0,55 tep/pers/an

AIE : Agence Internationale de l'énergie

© X. Chavanne - IUP env. - 8 oct. 2007

# Consommation d'énergie primaire

en Mtep,  
après correction du climat

## (France)

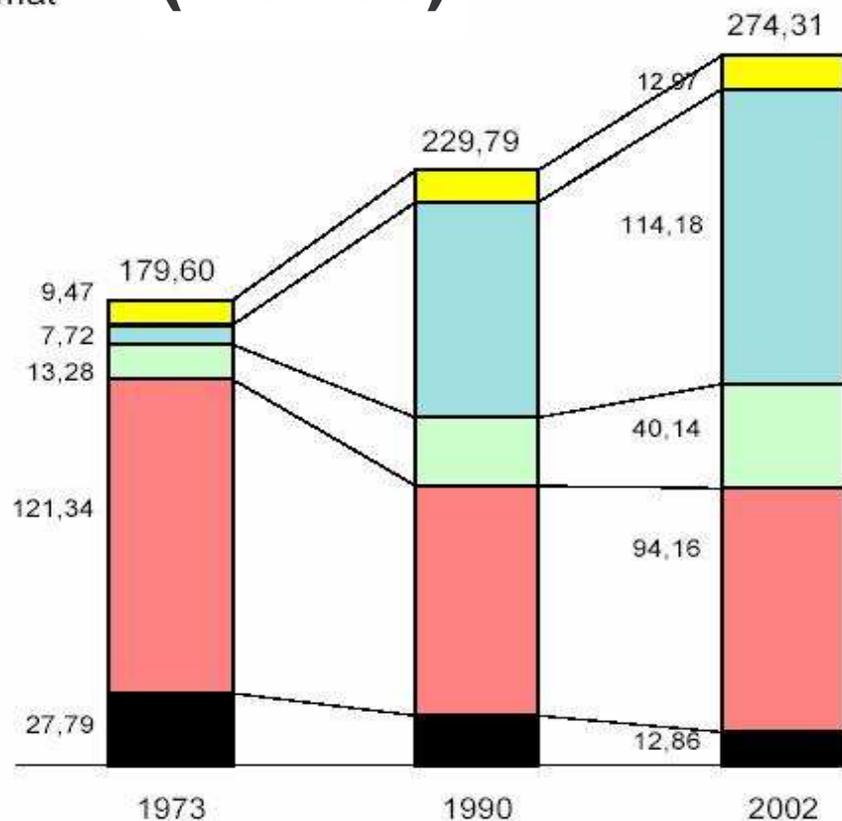
■ Autres renouvelables

■ Électricité primaire

■ Gaz

■ Pétrole

■ Charbon



Source : Observatoire de l'énergie

**2002 : 95 Mtep**  
**1,6 tep/pers/an**

# Les applications

En 2002 dans le monde :

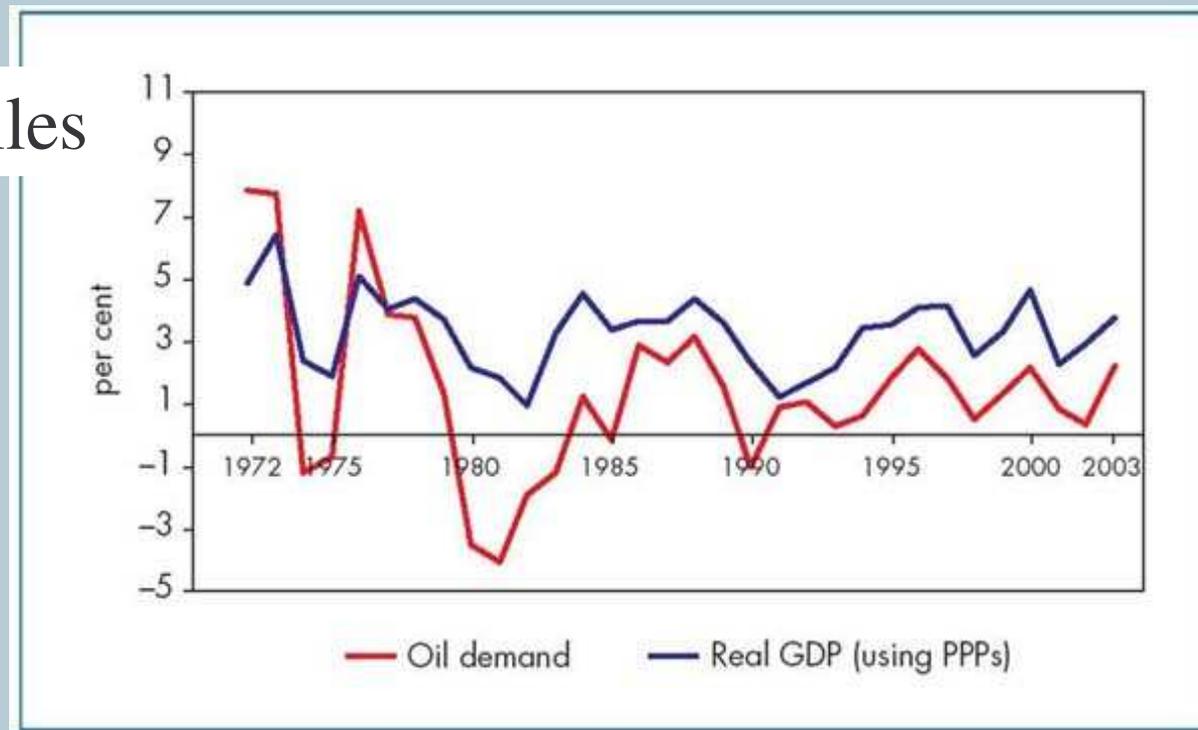
- carburants (55 %),
- pétrochimie, synthétiques (8 %),
- lubrifiants, paraffines, bitumes (8 %),
- chauffage, production électrique (reste).

Dernier usage en diminution car seul substituable

# Le pétrole et la croissance économie

Forte corrélation entre la production de pétrole et le Produit Intérieur Brut

Variations annuelles



Source : AIE, WEO 2004

# A Données techniques

# Qu'est ce que le pétrole ?

Mélange complexe d'hydrocarbures (H et C) sous  
forme liquide

Identification de ces corps utile pour :

Exploitation (changement de phases, viscosité),  
Raffinage,  
Utilisations,  
Pollution ...

Composition élémentaire (moyenne)

En masse : 85 % C, 12,5 % H, 1,5 % S, N, O ...

En atome : 1 C pour 1,8 H

# Qu'est ce que le pétrole ?

## Composition chimique

### Champ

+(gaz naturel

+liquides de  
gaz naturel

+condensat

+pétrole brut

### Molécules

méthane, éthane)

propane, butane,  
isobutane (n = 3, 4)

pentane à octane

### Utilisation

Pétrochimie,  
chauffage, carburants

Pétrochimie,  
carburants, solvants

Raffinerie

# Qu'est ce que le pétrole ?

<u>raffinerie (brut)</u>	<u>molécules</u>	<u>Utilisation</u>
<i>Distillation atmosphérique</i>		
gaz de pétrole liquéfié	propane, butane, isobutane (C <sub>3</sub> à C <sub>5</sub> ).	Pétrochimie, chauffage, carburants
naphta	C <sub>6</sub> à C <sub>10</sub> (alcane, cycloalcane, aromatiques).	Pétrochimie, carburants, solvants.
kérosène	C <sub>11</sub> à C <sub>13</sub>	Carburants avion
gazole, fioul léger	C <sub>14</sub> à C <sub>19</sub>	Carburants, chauffage.
huiles lourds, bitumes		<i>Distillation sous vide :</i> Gazole, lubrifiant, fioul lourd, paraffines...

# Qu'est ce que le pétrole ?

## Les résidus

Les molécules complexes : résines, asphaltènes, carbènes

Masses moléculaires importants (entre 500 et 10 000)

H/C entre 1 et 1,3 en atomes, présence importante de S, N, V  
...(de 5 à 18 % en masse), dense, couleur noire.

Formation de macrostructures (précipitations, viscosité)

- > problème d'exploitation sur les champs
- > trop abondants par rapport aux usages
- > traitements lourds : craquage catalytique,

hydrocraquage, désulfuration...

# Qu'est ce que le pétrole ?

## Propriétés physiques

Densité : masse volumique ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) rapportée à celle de l'eau

condensats : 0,74

extra lourd : 1,03

moyenne : 0,83

étalon (tep) : 0,857

viscosité : en mPa.s (ou cPo) **dans la roche réservoir.**

Dépend de la composition et de la température

Entre 0,5 et 10 mPa.s pour brut classique

Jusqu'à 100 Pa.s (extralourd), voir 100 000 (bitume)

Plus élevée que celle de l'eau

# Qu'est ce que le pétrole ?

## Propriétés physiques

Tension de surface : faible mouillabilité avec la roche  
tension avec l'eau => immiscible à l'eau.  
Composés HC solubles entre eux  
(problème des molécules complexes : asphaltène)

Changement de phase : dépend de P et T réservoir  
+ composition (gaz dissous, paraffine ...)  
P et T augmente avec profondeur.  
P diminue avec exploitation

# Qu'est ce que le pétrole ?

## Contenu énergétique

Dans plus de 85 % des applications le pétrole converti en chaleur par combustion (chauffage, moteur thermique).

Le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI):



S indésirable (SO<sub>2</sub> corrosif, pluies acides)

O comburant

# Qu'est ce que le pétrole ?

## Conversion quantités produites/énergie

### Masse/énergie :

Pétrole étalon ( $\text{CH}_{1,8}$ ) : 42 GJ/t (**tep**)

Entre 44 GJ/t (condensat) et 40 GJ/t (extra lourd)

### Volume/énergie :

unité des pétroliers : le baril ( $0,159 \text{ m}^3$ ) : Mb, Gb, kb

conversion à partir des densités :

France, AIE : 5,71 GJ (PCI, 0,857) = 0,136 tep

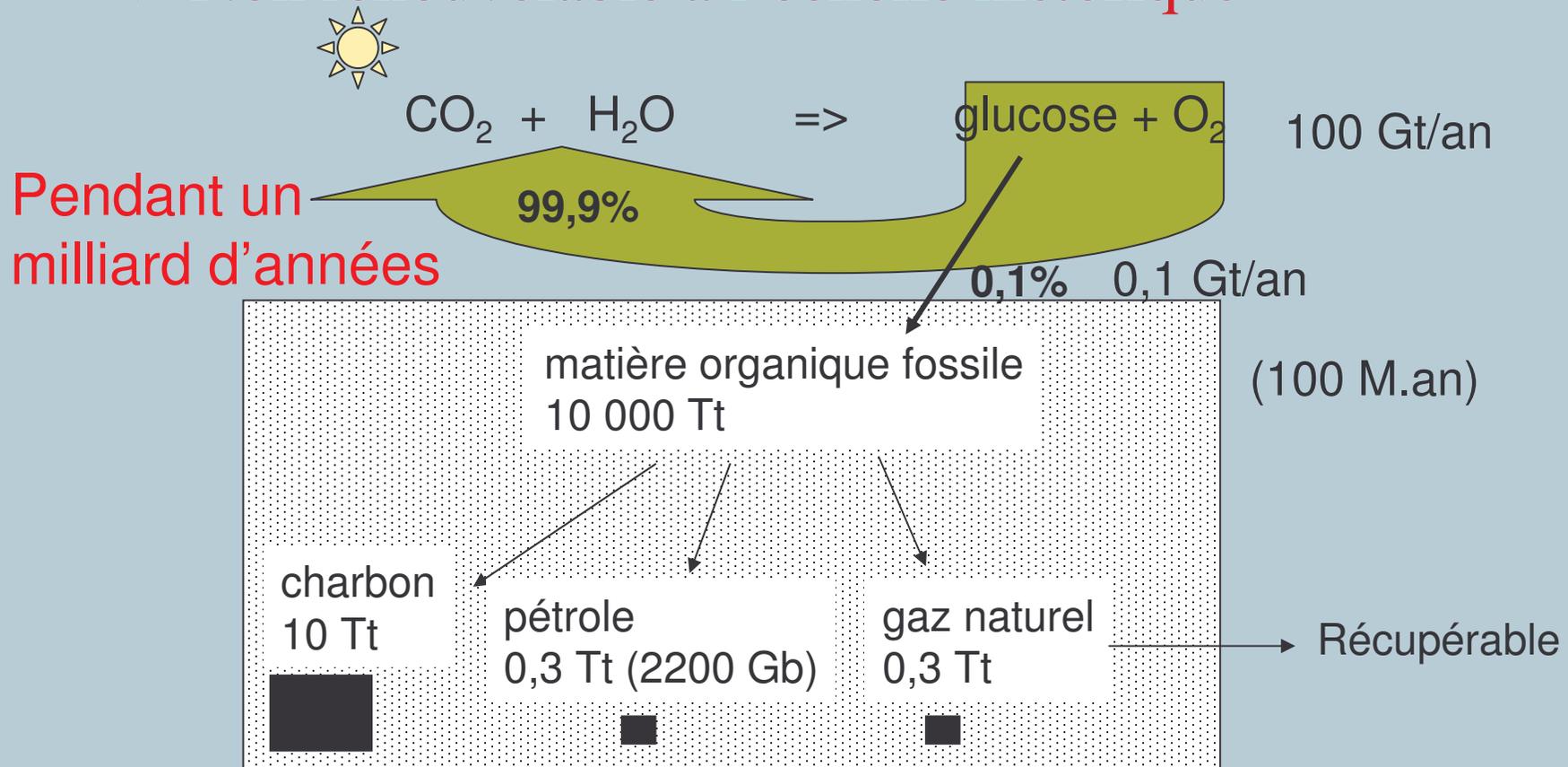
EUD'A : 6,12 GJ (**PCS**, 0,857)

Entre 4,9 GJ/b (condensat) et 6,9 GJ/b (extra lourd)

# Origine du pétrole

Origine organique (tectonique, géochimie, géologie...)

=> **Non renouvelable à l'échelle historique**

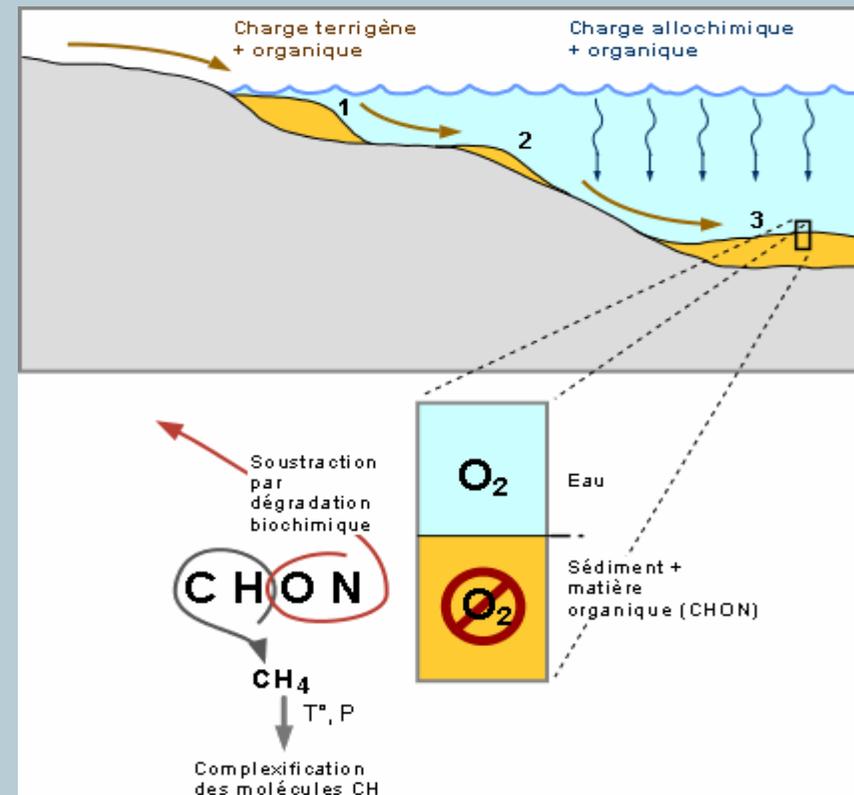


T t =  $10^{12}$  tonnes. Source : B. Durand, Mém. Soc. Géol. France 1987.

# D'où vient le pétrole ?

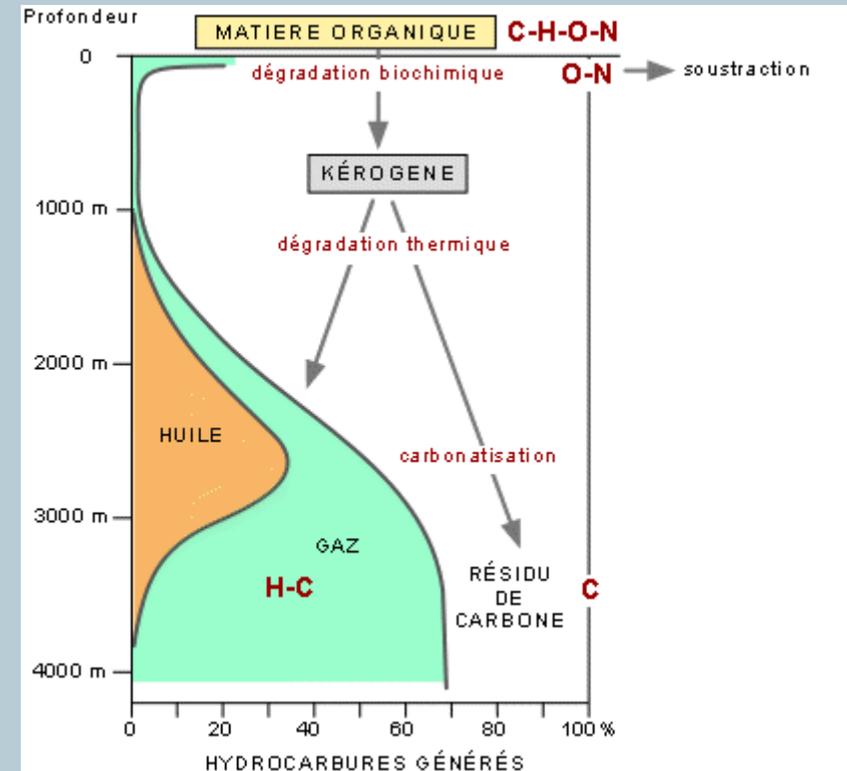
Succession d'étapes, chacune avec une faible probabilité.  
L'ensemble a une très faible probabilité.

- Dépôt important d'organismes marins ou lacustres avec produits d'érosion ;
- Dégradation anaérobie ;
- Subsidence et dépôts successifs d'autres sédiments ; tassement ; formation d'un bassin sédimentaire.



# D'où vient le pétrole ?

- enfouissement profond ;  
T > 90 °C dans roche mère :  
craquage ; formation de pétrole
- sortie et remontée des parties HC  
légères (pétrole et gaz)
- piégeage d'une partie dans une roche-  
réservoir



© P-A Bourque Uni. Laval Québec

# Comment trouve-on le pétrole ?

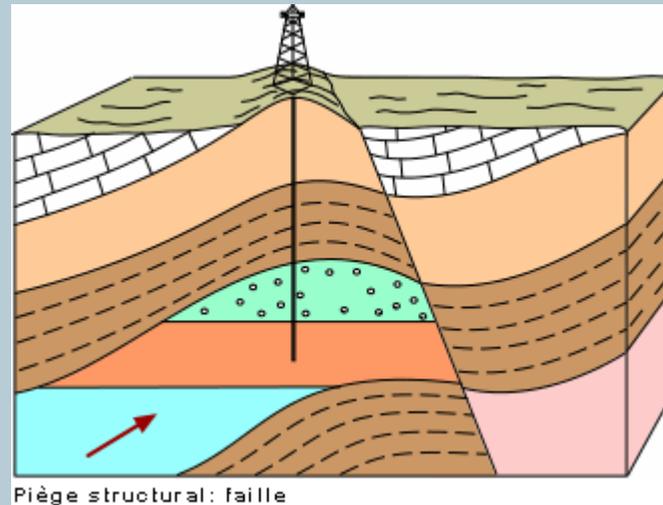
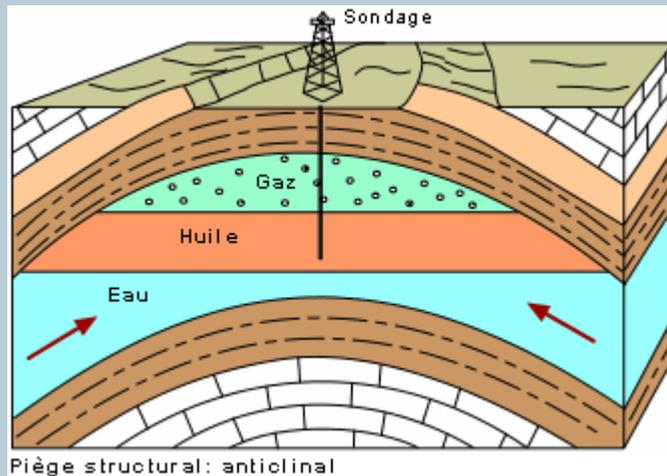
## prospection

- Recherche de bassins sédimentaires (plus de 600) ;
- Etude de terrain : couches géologiques ; pièges structurales ? Suintements? ;
- Forages de reconnaissance : stratigraphie. Roche-mère(s) ?
- Reconstitution du passé géologique et géochimique ;
- Recherche de roches-réservoirs depuis la surface : anomalies g, B, **réflexion d'ondes sismiques...** ;
- Forages prospectifs : carottages, capteurs sur les tiges.

Systeme pétrolier : roche-mère + chemins de migration  
+ roches-réservoirs

# Comment trouve-on le pétrole ?

## prospection



© P-A Bourque  
Uni. Laval Québec

Forages prospectifs (wildcat) mât ou derrick

succès très variable ( $< 1/2$ )

**piège ou pièges superposés  $\longleftrightarrow$  champ**

Champ = gisement dans roches poreuses

+ eau (aquifères) + calotte de gaz

# Comment exploite-on le pétrole ?

## estimation

Prélèvement de carottes (pores, saturations)  
et cartographie de la roche

⇒ Pétrole Initialement en Place (PIP).

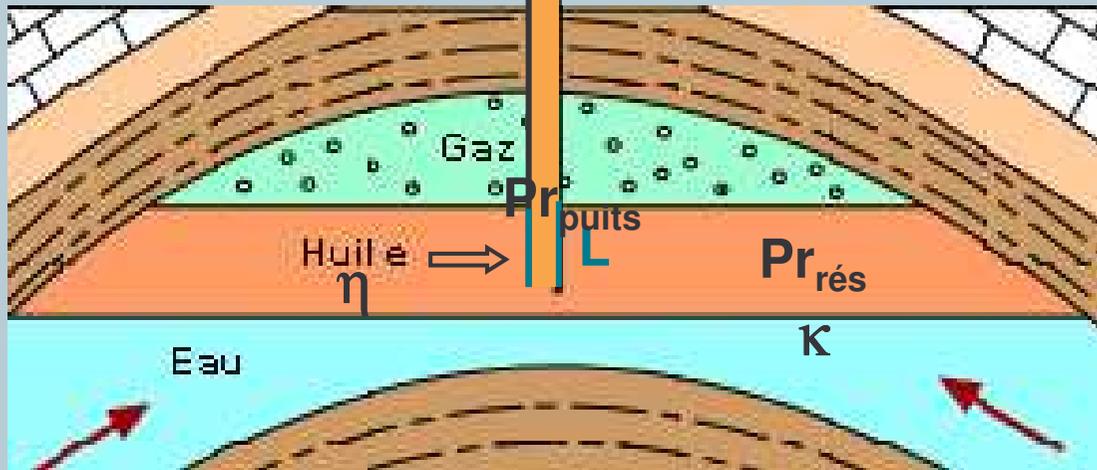
Tests en débit ; évolution pression de la roche  
⇒ Taux de récupération (TR).

⇒ Quantité récupérable ( $Q_{\text{champ}}$ ) = TR x PIP

Problème des estimations (complexités naturelles et humaines)  
TR varie de 2 à 95 % suivant champ.

# Comment exploite-on le pétrole ?

exploitation



Loi de Darcy

$$d_{\text{puits}} = Lk/\eta (Pr_{\text{rés}} - Pr_{\text{puits}})$$

Drainage dans un milieu poreux

$$P_{\text{champ}} = \sum d_{\text{puits}}$$

$L$  : facteur géométrique lié au puits (m);

$k$  : perméabilité effective (taille des pores , tortuosité, saturation des fluides ...) (darcy ou  $(\mu\text{m})^2$ );

$\eta$ : viscosité dynamique (mPa.s)

$Pr$  : pression (bar)

# Comment exploite-on le pétrole ?

Objectif : récupérer le maximum de pétrole au meilleur débit

$$d_{\text{puits}} = L\kappa/\eta (Pr_{\text{rés}} - Pr_{\text{puits}})$$

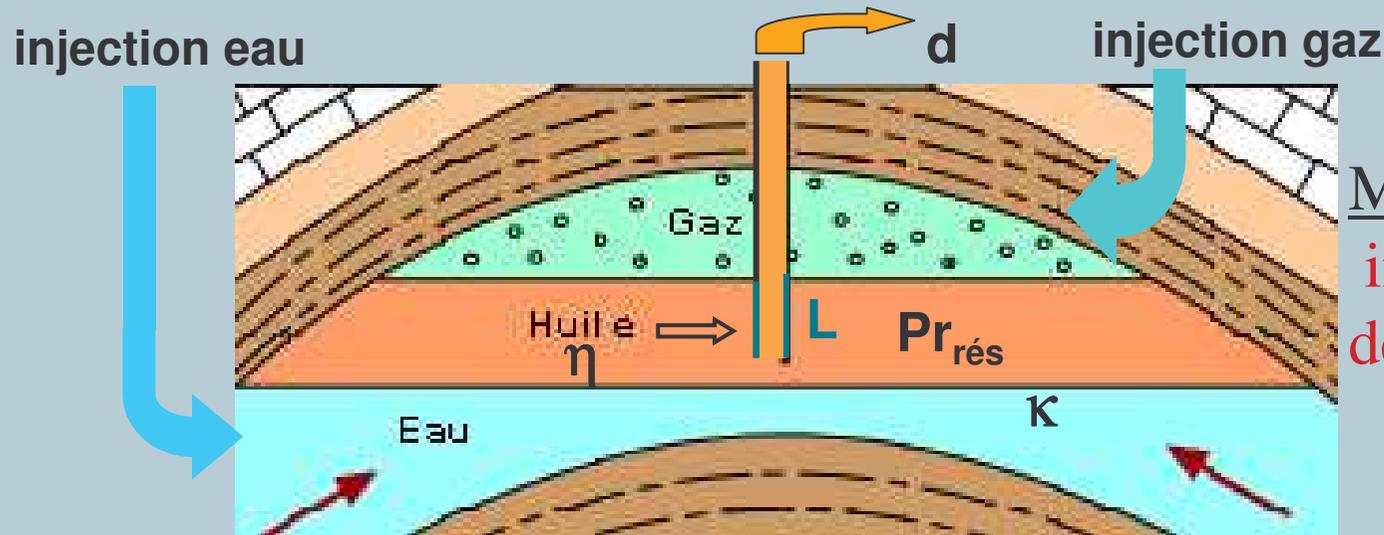
Augmenter L : densité plus grande de puits ; technique des puits horizontaux, puits multibranches ...

Augmenter k : attaque à l'acide, fracturation ;

Augmenter  $Pr_{\text{puits}}$  : pompes, injection de gaz dans puits ...

# Comment exploite-on le pétrole ?

## Méthodes de récupération secondaire



Maintenir  $Pr_{rés}$  :  
injection d'eau ou  
de gaz.

- Depuis les années 40 > routine (60 % production) ;
- Coûts (compression, injection, séparation) ;
- Grande mobilité eau et gaz > **instabilité du front**
- Huile résiduelle à cause des effets capillaires.

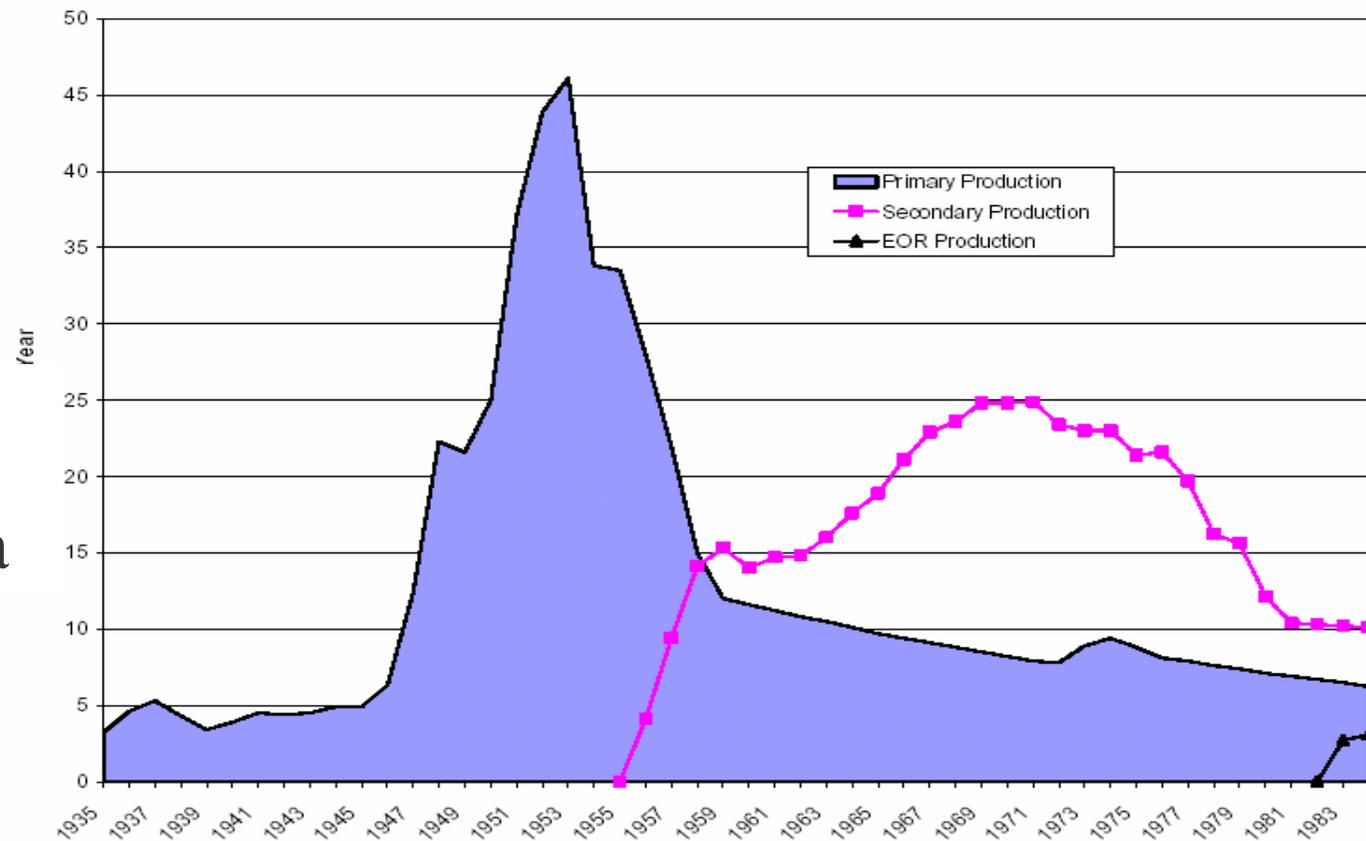
**Limiter le débit (en pratique P annuel quelques % de R)**

# Comment exploite-on le pétrole ?

## Méthodes de récupération secondaire

Injection d'eau sous pression par puits séparés :

Figure A-2. Growth of Ultimate Recoverable Reserves in the Sho-Vel-Tum field (Ref. 2)



Source :  
US DOE

P(a)

Mb/a

# Comment exploite-on le pétrole ?

## Méthodes de récupération tertiaire

Modifier propriétés eau et/ou pétrole (« EOR »).

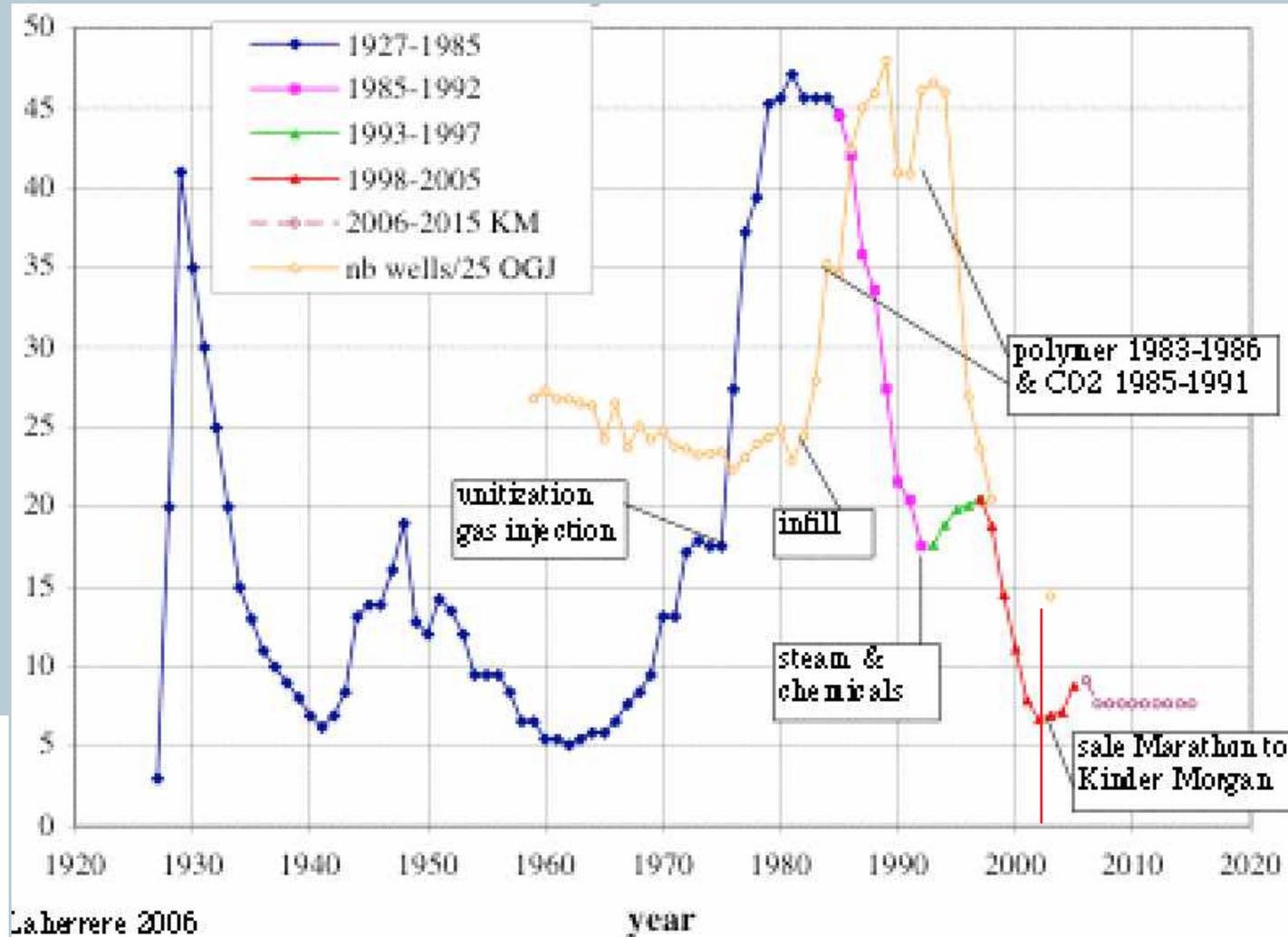
Modifier propriétés de l'eau : ajout polymères ou tensioactifs (meilleur entraînement).

Diminuer  $\eta$  pétrole : émulsion avec des gaz ( $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ )  
**chauffer avec vapeur** ou combustion *in situ*

- Conditions de T et P *in situ*,  $\eta$  et/ou  $\kappa$  ;
- Coûts production vapeur ;
- depuis les années 60 ;
- Env. 2 Mb/j surtout par vapeur (sur 81 Mb/j en 2005).

# Le champ Yates (Texas)

P(a) Mb/a



Source :  
railroad  
commission  
of Texas via

# Comment exploite-on le pétrole ?

## Exploitation sous marine

Plus de 30 % de la production mondiale.

Opérer à distance. Tête de puits sous 30 à 200 bars (voir 300) et T à 4°C. Risque de bouchage, de pollution. Accidents.

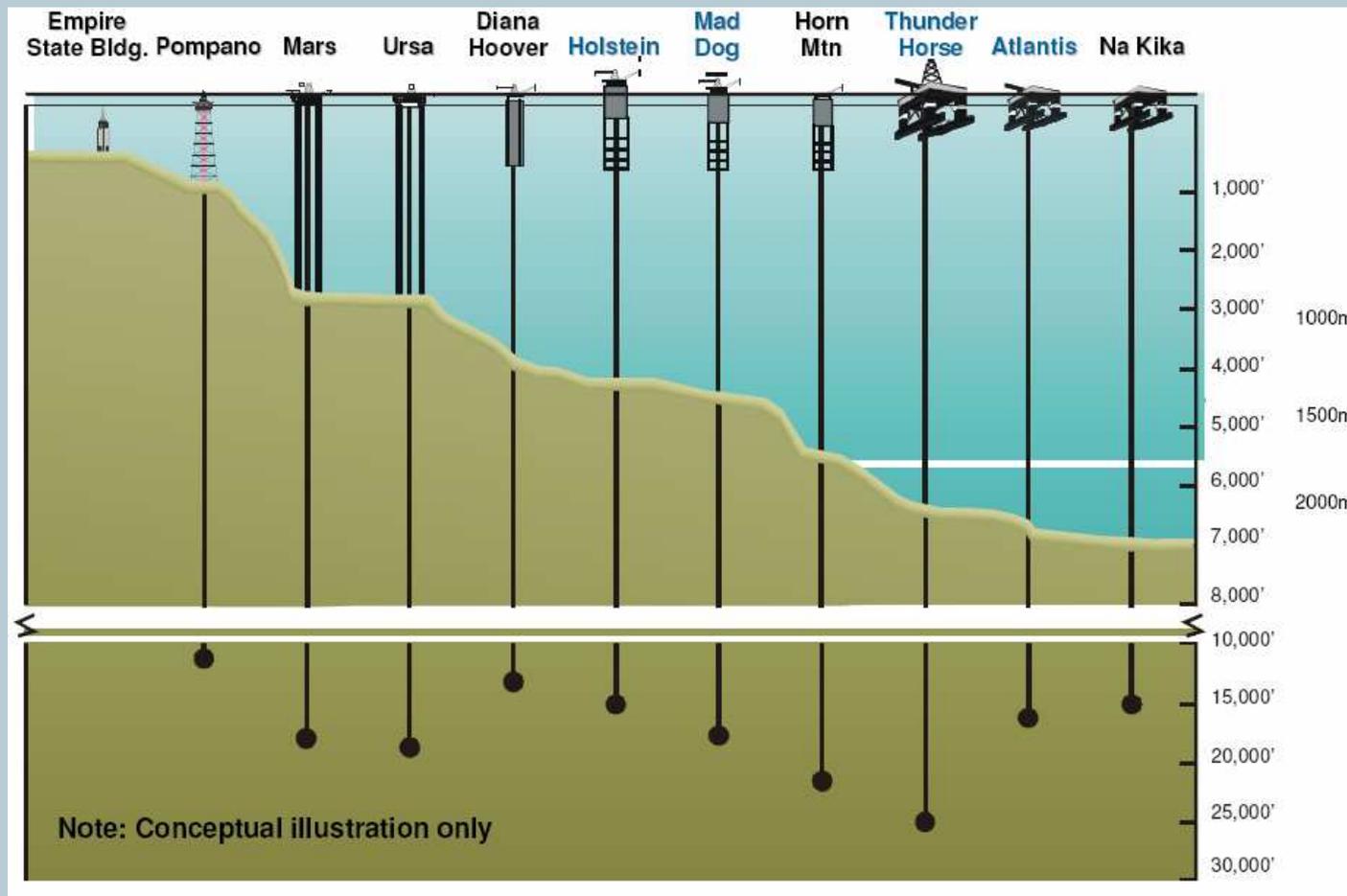
Mais pétrole brut.

Jusqu'à 500 m (Mer du Nord, Golfe du Mexique, ...)  
plateformes fixes ; depuis les années 60.

Au delà de 500 m (Golfe du Mexique, Atlantique sud...)  
gisements sur le talus continental.  
structures mobiles guidées ; depuis les années 90.

# Comment exploite-on le pétrole ?

## Exploitation sous marine profonde



© X. Chavanne – IUP env. - 8 oct. 2007

Source : BP

## B Productions et Réserves

Débat sur le maximum ou pic de production

Depuis 2004 : la question n'est plus « si » mais « quand »

# Modèles de prévision de production

# Production d'une région

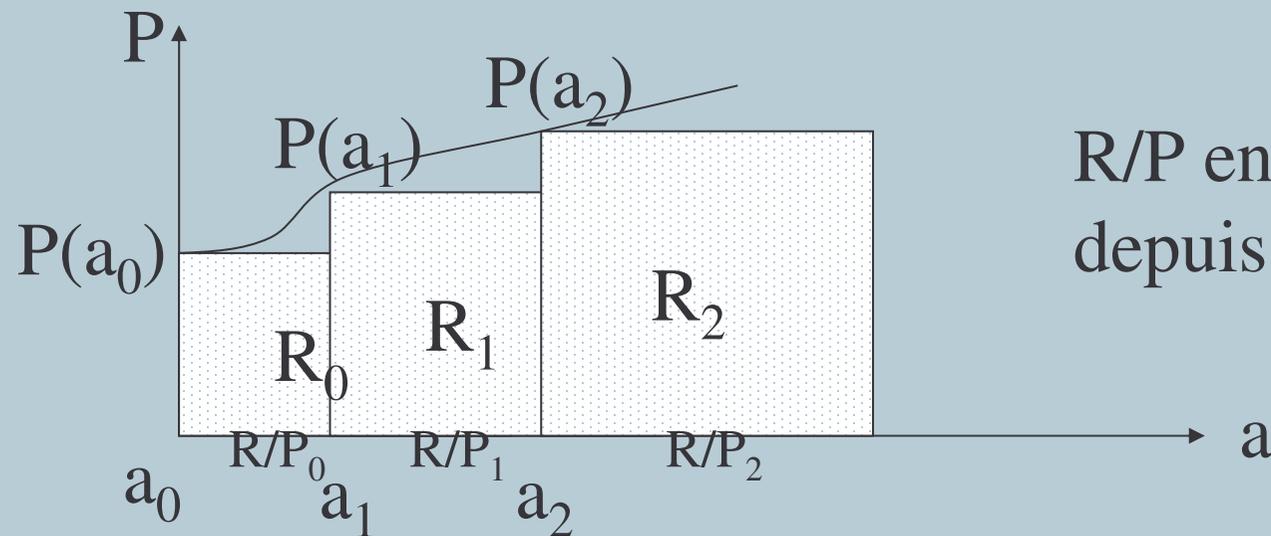
## Modèle R/P

$$\text{Durée réserves} = R / P$$

Hypothèses :

P constante

R bien connue l'année a



R/P entre 30 et 40 ans  
depuis 1970 !!

# Quid des croissances de réserves de l'OPEP ?

	Abu Dhabi	Dubai	Iran	Iraq	Kuwait	Neutral Zone	Saudi Arabia	Venezuela
1980	28.0	1.4	58.0	31.0	65.4	6.1	163.4	17.9
1981	29.0	1.4	57.5	30.0	65.9	6.0	165.0	18.0
1982	30.6	1.3	57.0	29.7	64.5	5.9	164.6	20.3
1983	30.5	1.4	55.3	41.0	64.2	5.7	162.4	21.5
1984	30.4	1.4	51.0	43.0	63.9	5.6	166.0	24.9
1985	30.5	1.4	48.5	44.5	90.0	5.4	169.0	25.9
1986	30.0	1.4	47.9	44.1	89.8	5.4	168.8	25.6
1987	31.0	1.4	48.8	47.1	91.9	5.3	166.6	25.0
1988	92.2	4.0	92.9	100.0	91.9	5.2	167.0	56.3
1989	92.2	4.0	92.9	100.0	91.9	5.2	170.0	58.1
1990	92.2	4.0	92.9	100.0	91.9	5.0	257.5	59.1
1991	92.2	4.0	92.9	100.0	94.5	5.0	257.5	59.1
1992	92.2	4.0	92.9	100.0	94.0	5.0	257.9	62.7
1993	92.2	4.0	92.9	100.0	94.0	5.0	258.7	63.3
1994	92.2	4.3	89.3	100.0	94.0	5.0	258.7	64.5
1995	92.2	4.3	88.2	100.0	94.0	5.0	258.7	64.9
1996	92.2	4.0	93.0	112.0	94.0	5.0	259.0	64.9
1997	92.2	4.0	93.0	112.5	94.0	5.0	259.0	71.7
1998	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.0	72.6
1999	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	261.0	72.6
2000	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.2	76.9
2001	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.3	77.7
2002	92.2	4.0	89.7	112.5	94.0	5.0	259.3	77.8

} Guerre des quotas

**Données officielles globales (i.e. interprétées)**

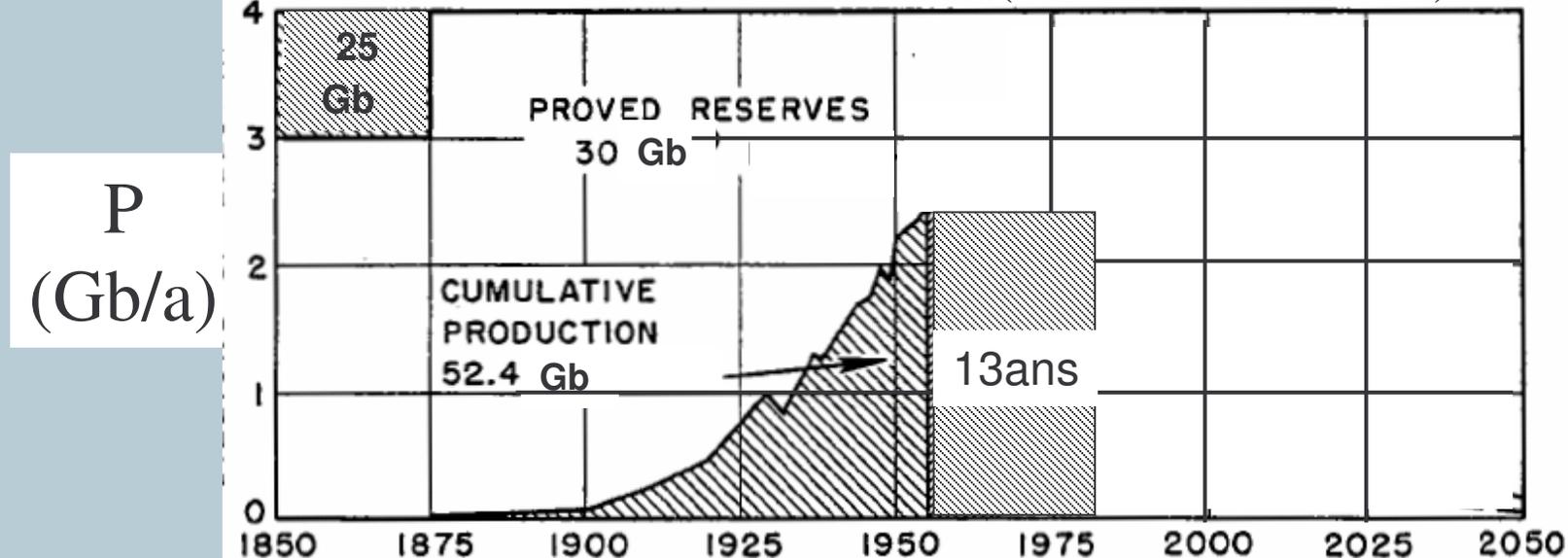
Source :  
O&GJ

**De l'importance de partir des données de base (quantité réelle de réserve par champ à l'année de découverte) ! Sociétés espions : IHS, WM.**

# Production d'une région

## Modèle de prévision R/P

Production de brut aux Etats-Unis hors Alaska (1956 M. K. Hubbert)



**Modèle R/P = nombre d'années**

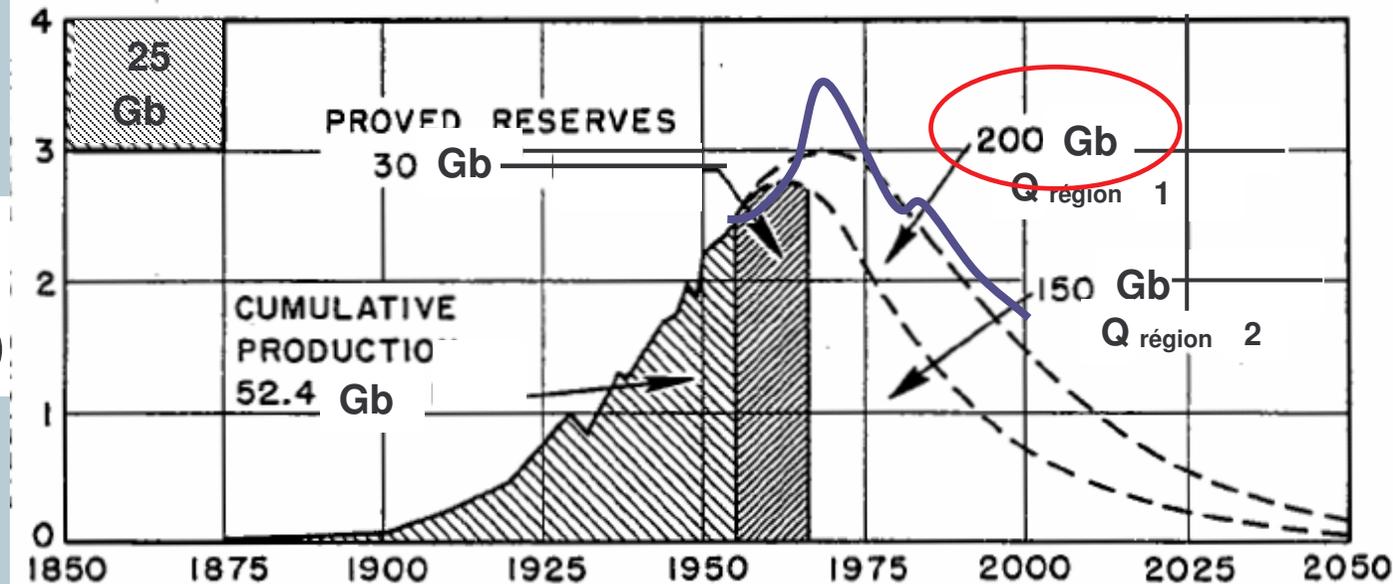
**P ? Constant à 2,3 Gb/a ?**

**Et R ? 30 Gb (découvert prouvée) ?**

# Production d'une région

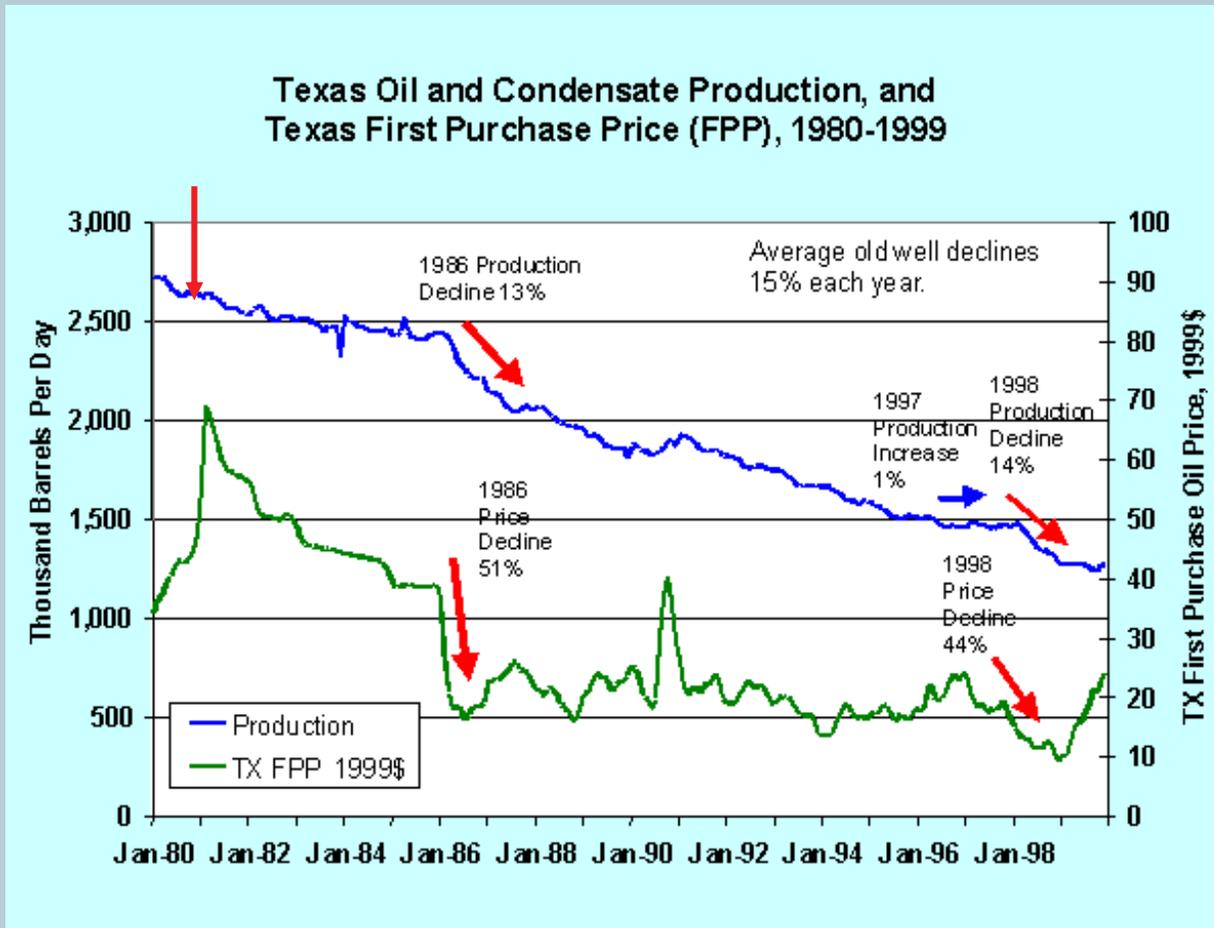
## Modèle de prévision de Hubbert

$P(a)$   
(Gb/a)



- $Q_{\text{région}} = \sum P = \sum P_a + R_a + FD_a = \sum Q_{\text{champ}}$
- profil pour  $P(a) \Rightarrow$  courbe en cloche

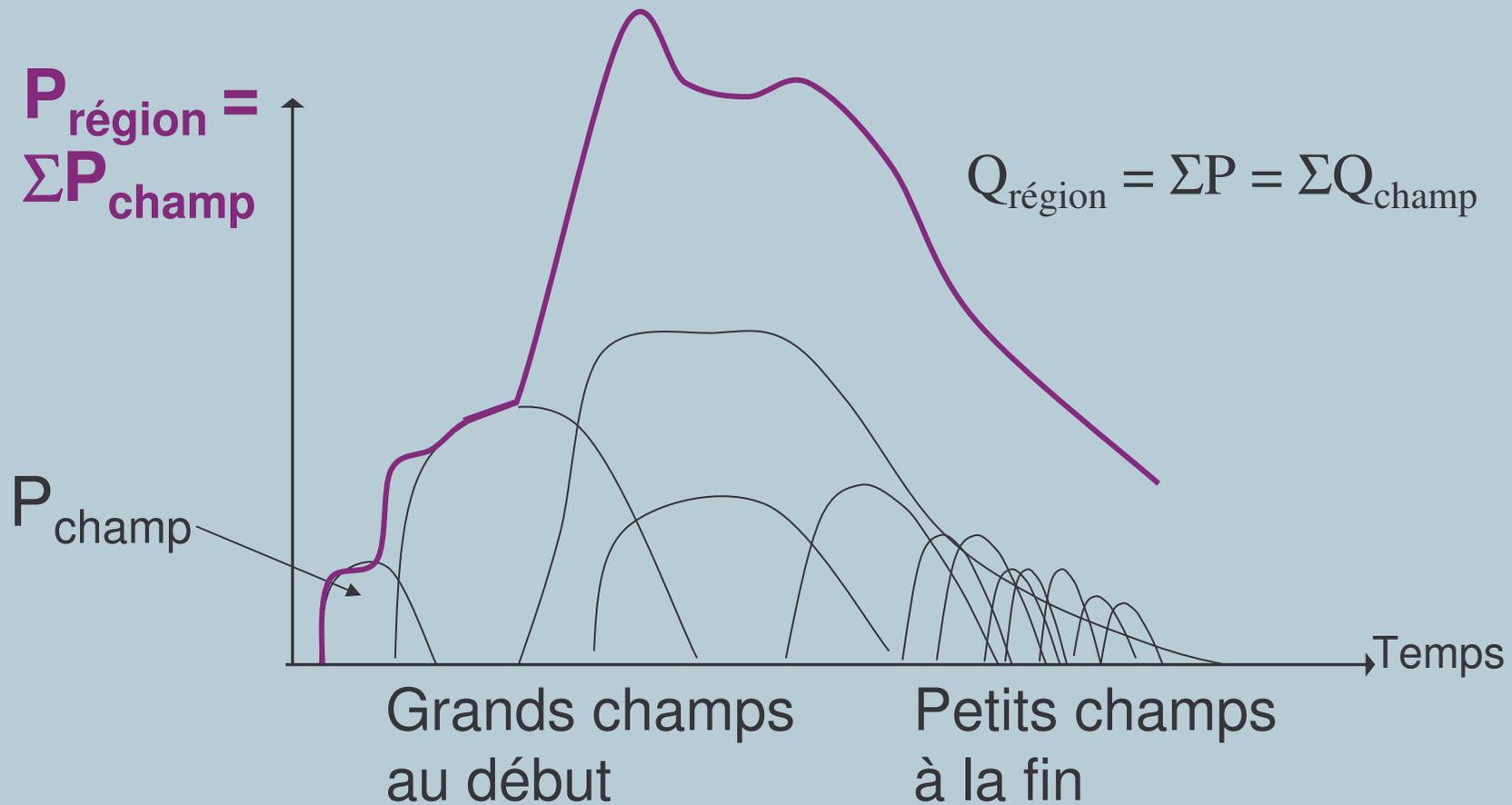
# Production et prix



Une fois déclin  
faible influence  
à la hausse

Source : US Dpt of Energy. Energy Info. Adm.

# Production d'une région



# Production en mer du Nord

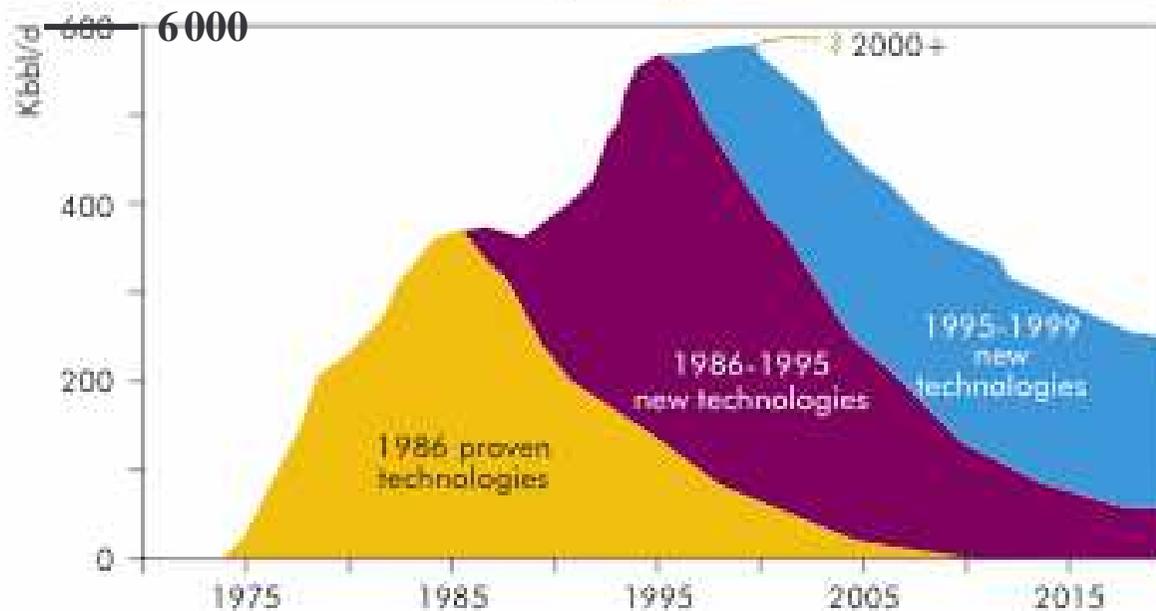
© X. Chavanne – IUP env. - 8 oct. 2007

# Prévisions pour la mer du Nord

IFP panorama 2004 : déclin évité grâce à la production des petits champs.

Source : Ressources  
to Reserve  
AIE, oct. 2005.

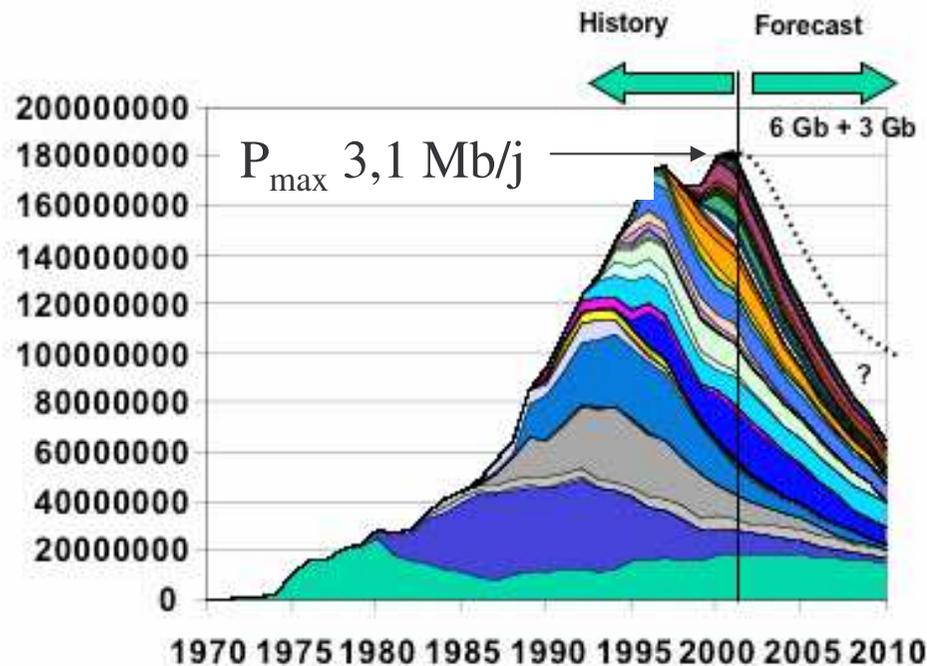
**Figure 1.20** • Impact of technology on production from the North Sea, in thousand barrels per day



Source: European Network for Research in Geo-Energy - ENERG - courtesy of Shell

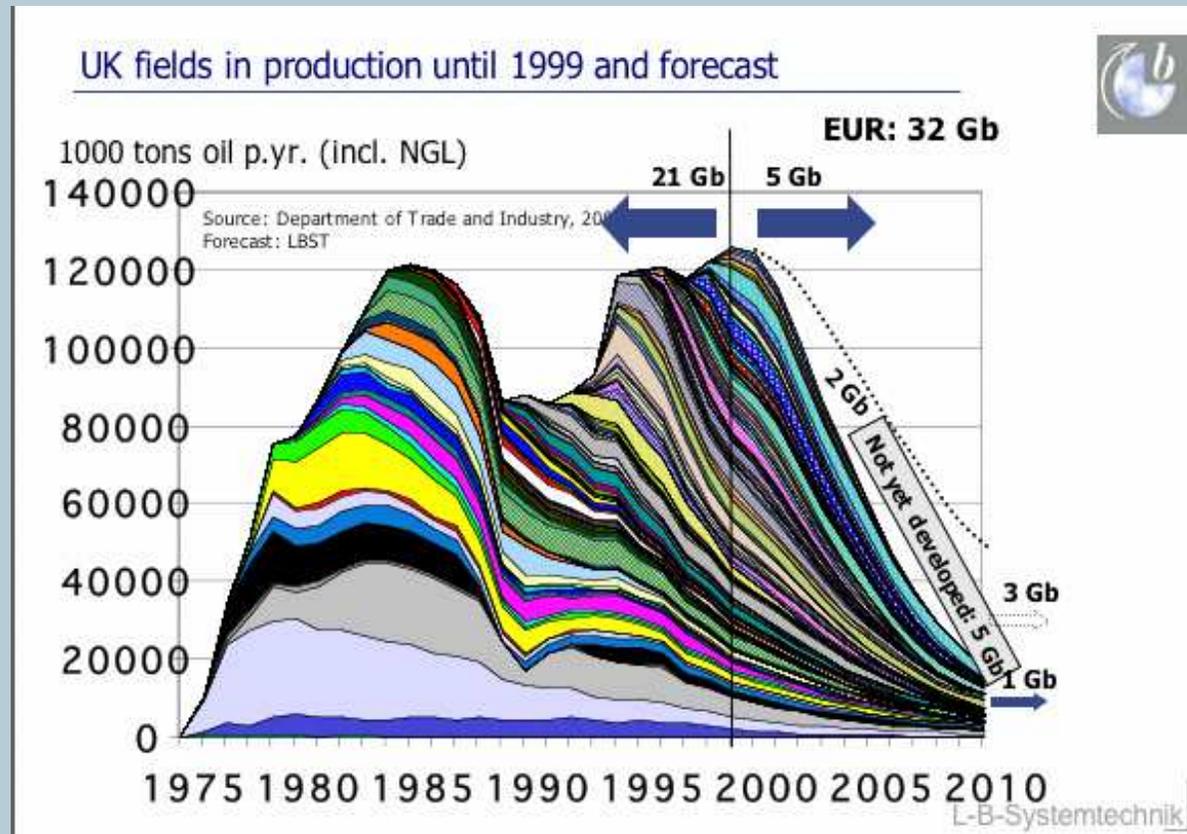
# Production de la Norvège

Norway: Crude oil production 2001 (52 fields) and forecast



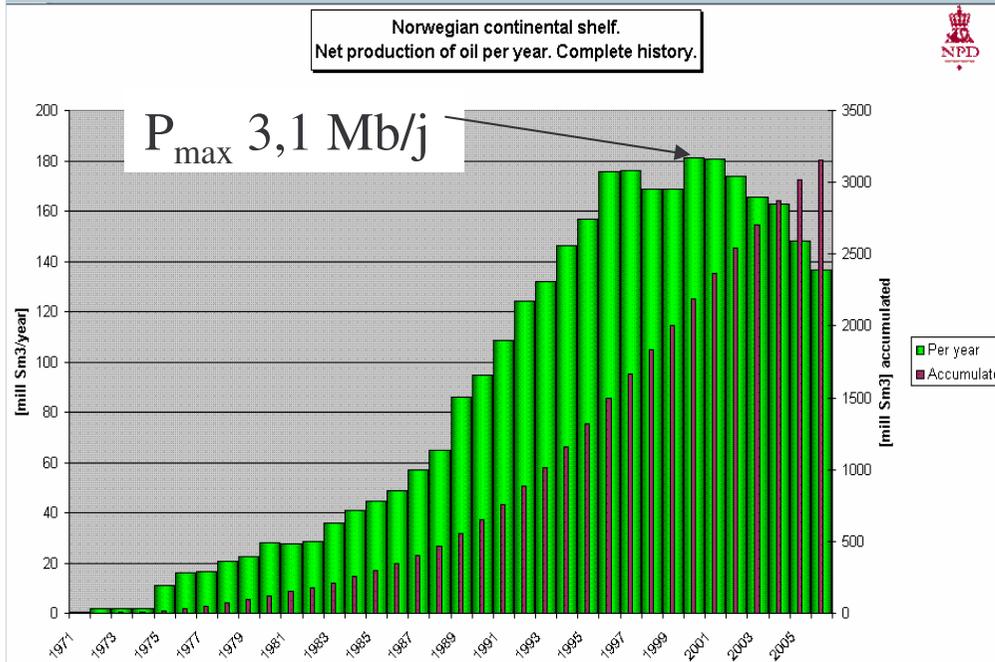
Profil de production de pétrole brut (en m<sup>3</sup>/an aux conditions ambiantes) de la Norvège sur la Mer du Nord champ par champ établi par LBST en 2002 en utilisant les données du Norwegian Petroleum Directorate (NPD, voir <http://www.npd.no/engelsk/cwi/pbl/en/index.htm>). Crédit à J. Laherrère.

# Production du Royaume-Uni

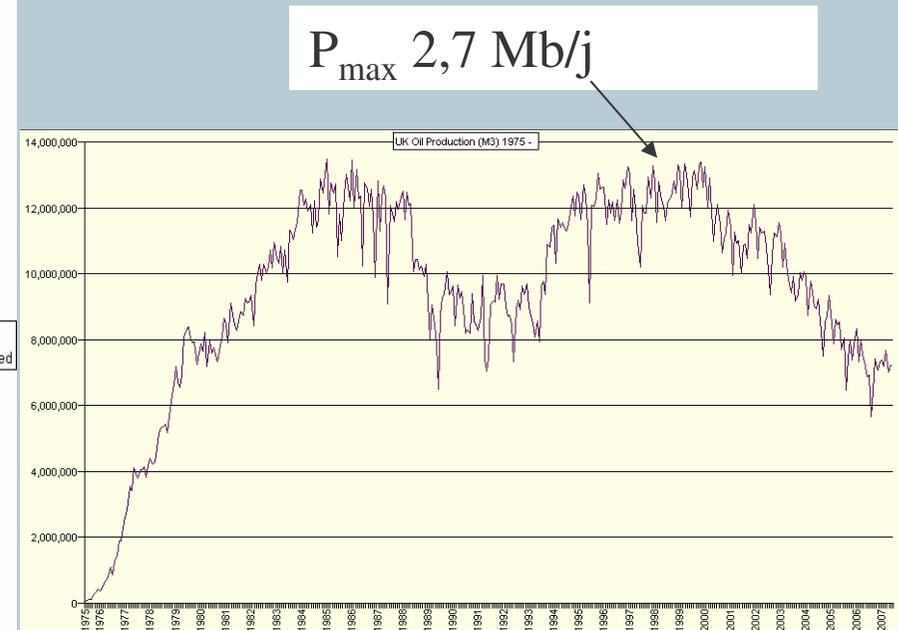


Profil de production du pétrole (en tonne par an) du Royaume-Uni sur la Mer du Nord champ par champ établi par LBST en 2002 en utilisant les données de l'UK Department Trade Industry.

# Production de la mer du Nord



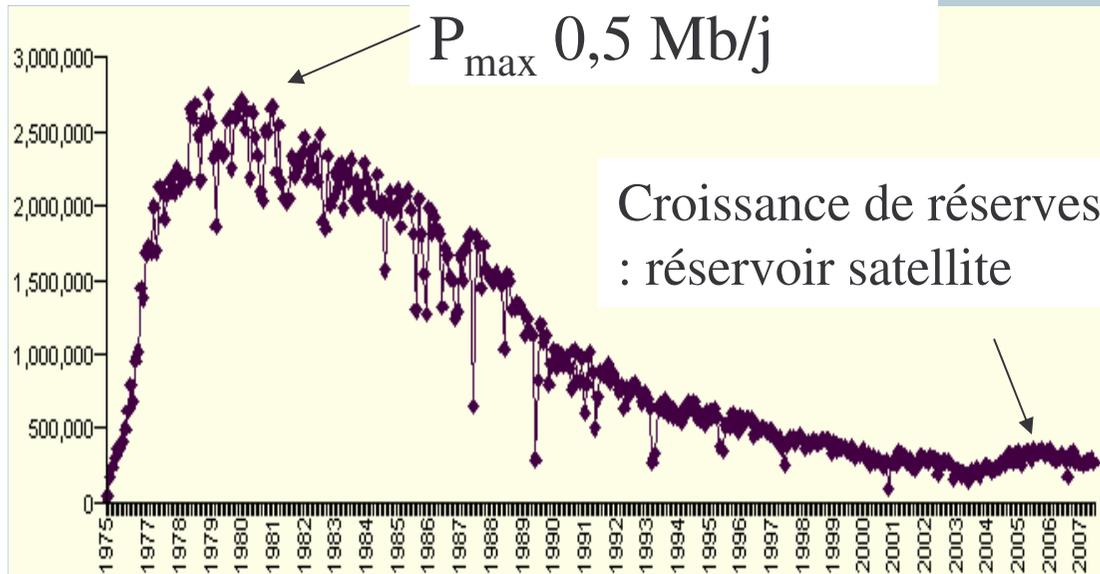
Source : NPD oct. 2007



Source : DTI oct. 2007

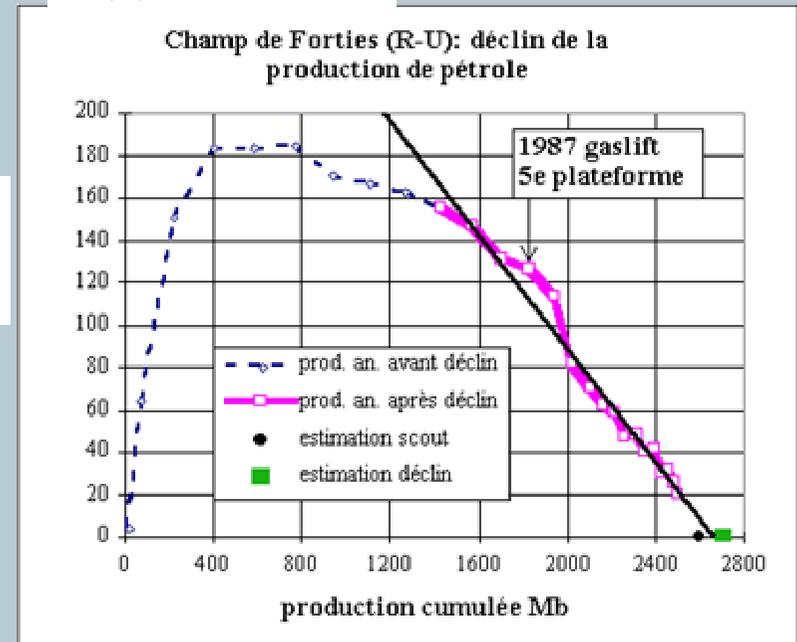
# Le champ Forties

P(a) M.m<sup>3</sup>/mois



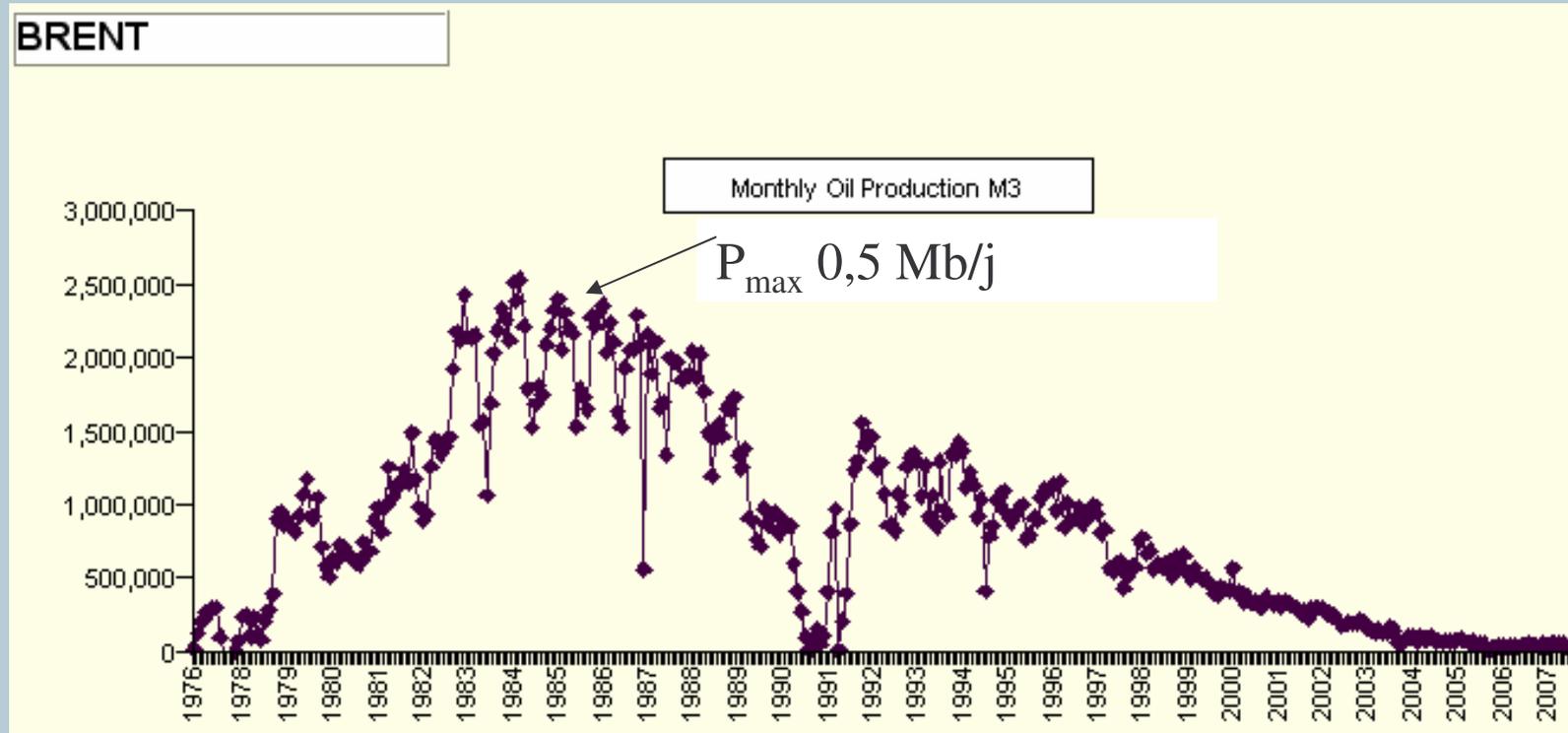
Source : DTI oct. 2007

P(a) Mb/a



Source : DTI/J. Laherrère

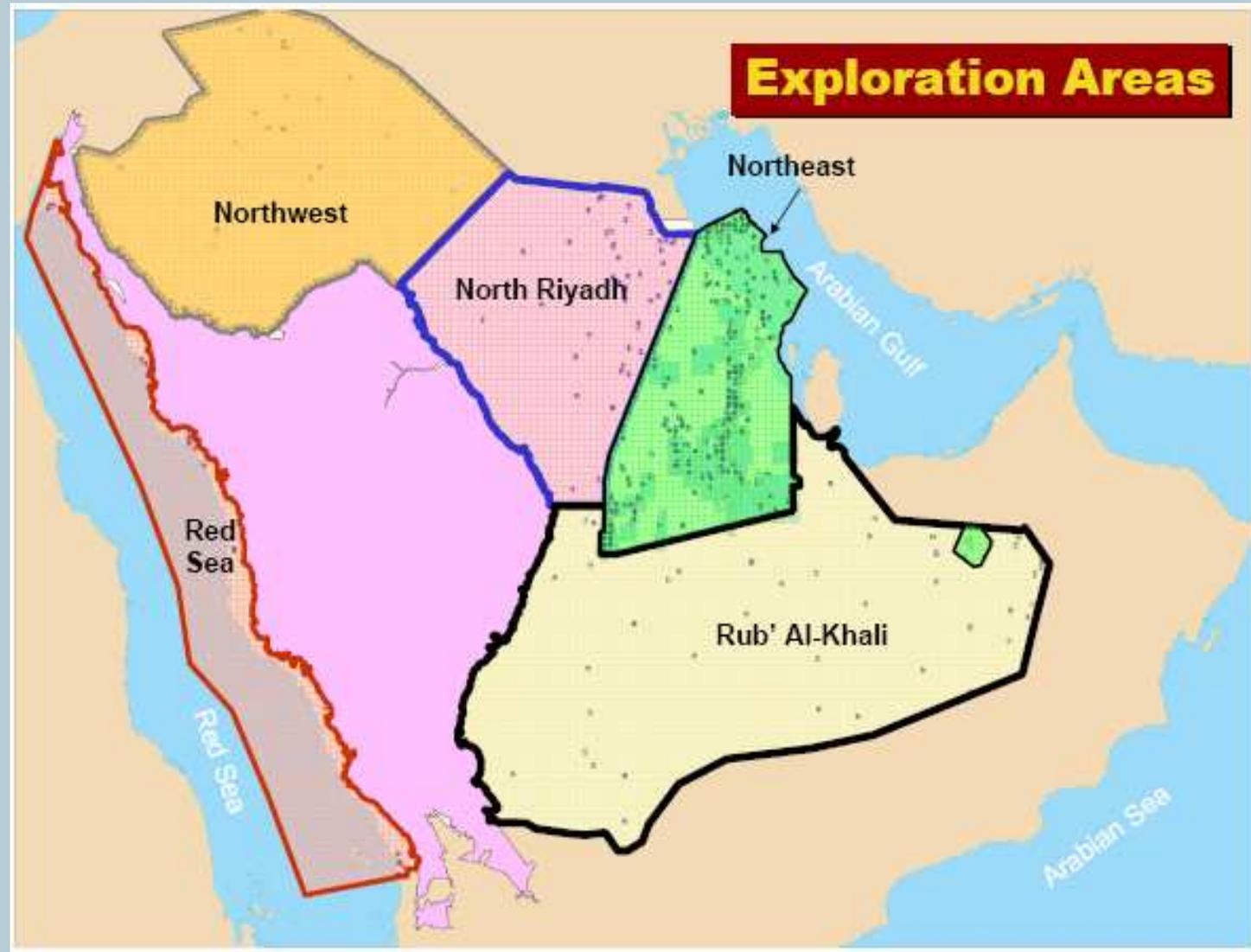
# Le champ Brent



Source : DTI oct. 2007

# Production en Arabie Saoudite

# La prospection



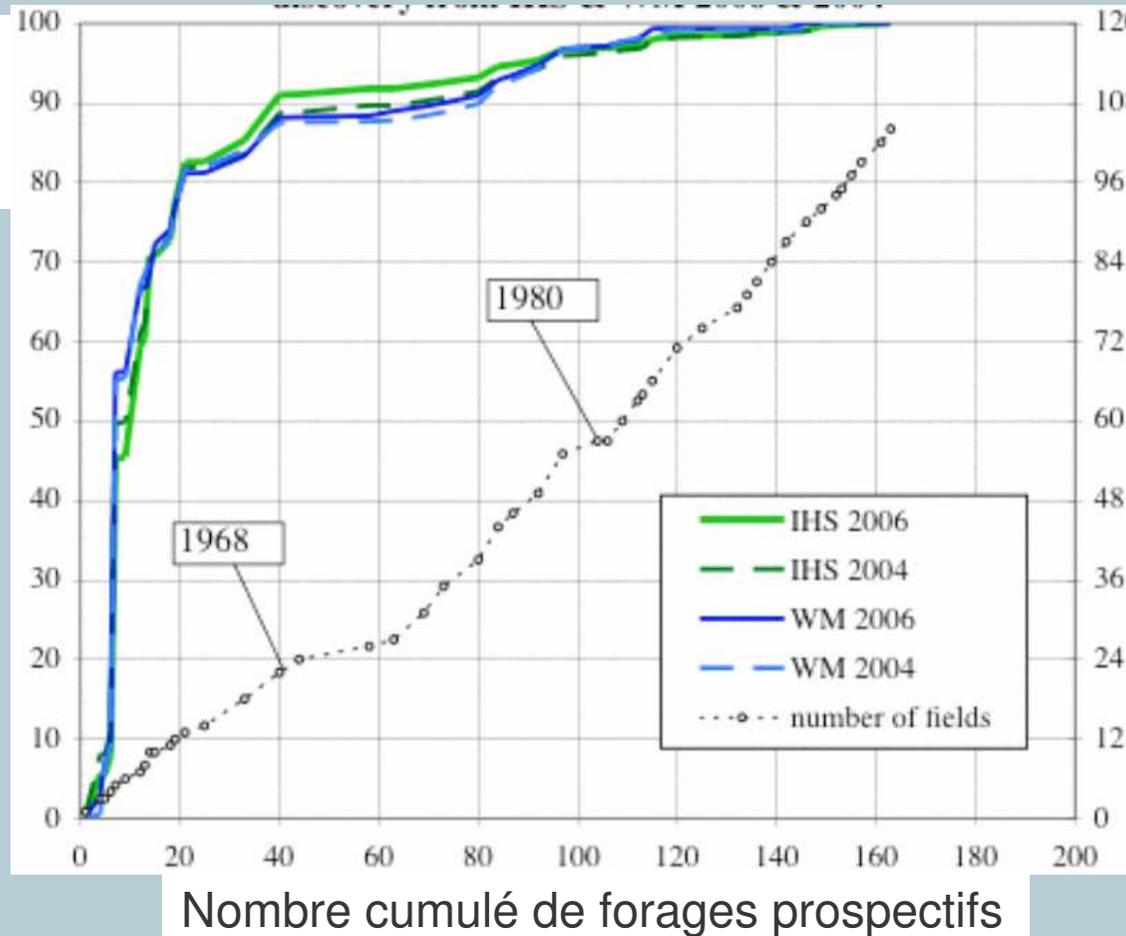
Source : Aramco Saudi  
1 may 2006 CSIS

© X. Chavanne – IUP env. - 8 oct. 2007

# Courbe d'écrémage en Arabie Saoudite

Quantités découvertes cumulées Gb

Nombre de champs découverts



Source : IHS et WM via J. Laherrère

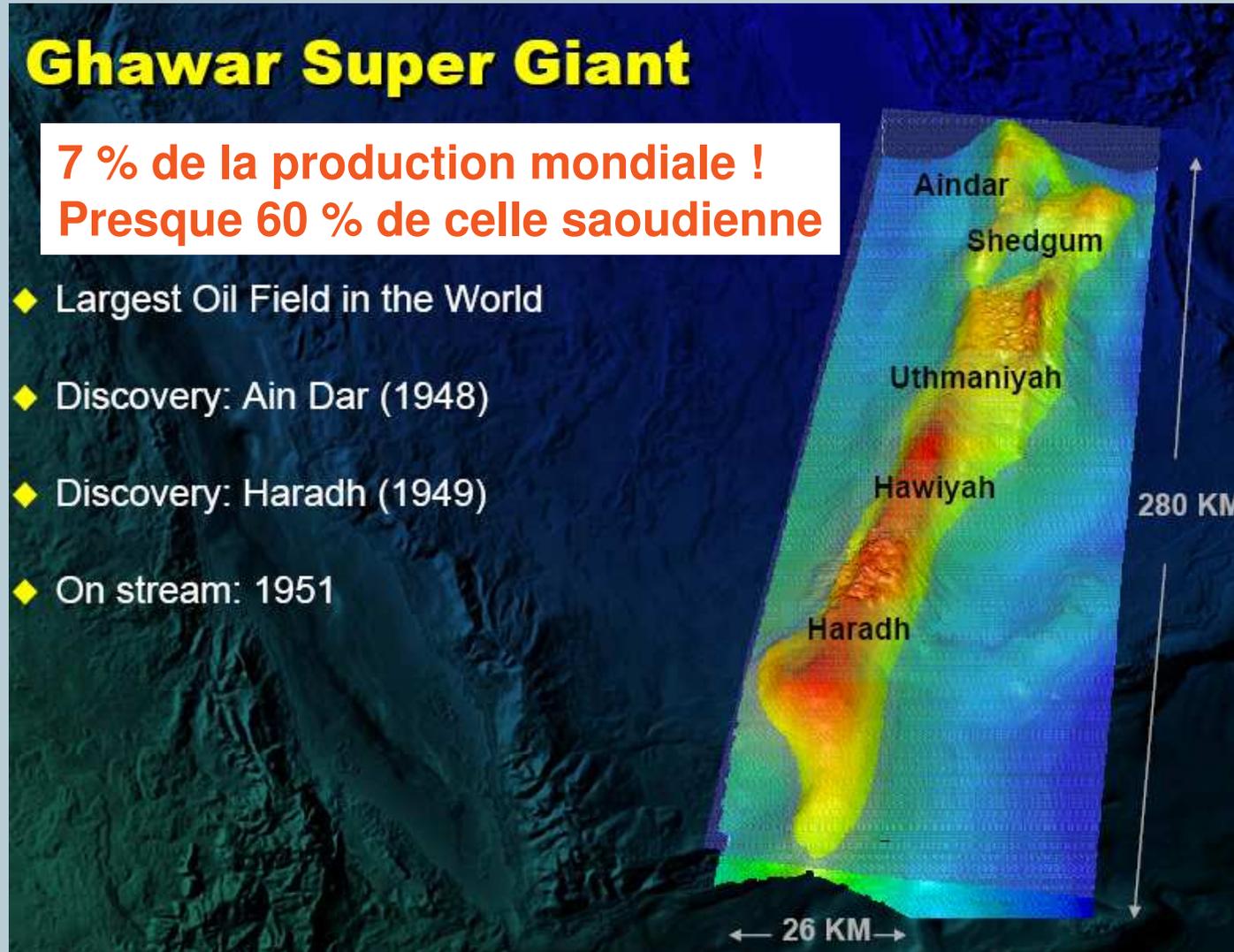
**Malgré activité de prospection tend vers une limite**

# Le champ Ghawar

## Ghawar Super Giant

**7 % de la production mondiale !  
Presque 60 % de celle saoudienne**

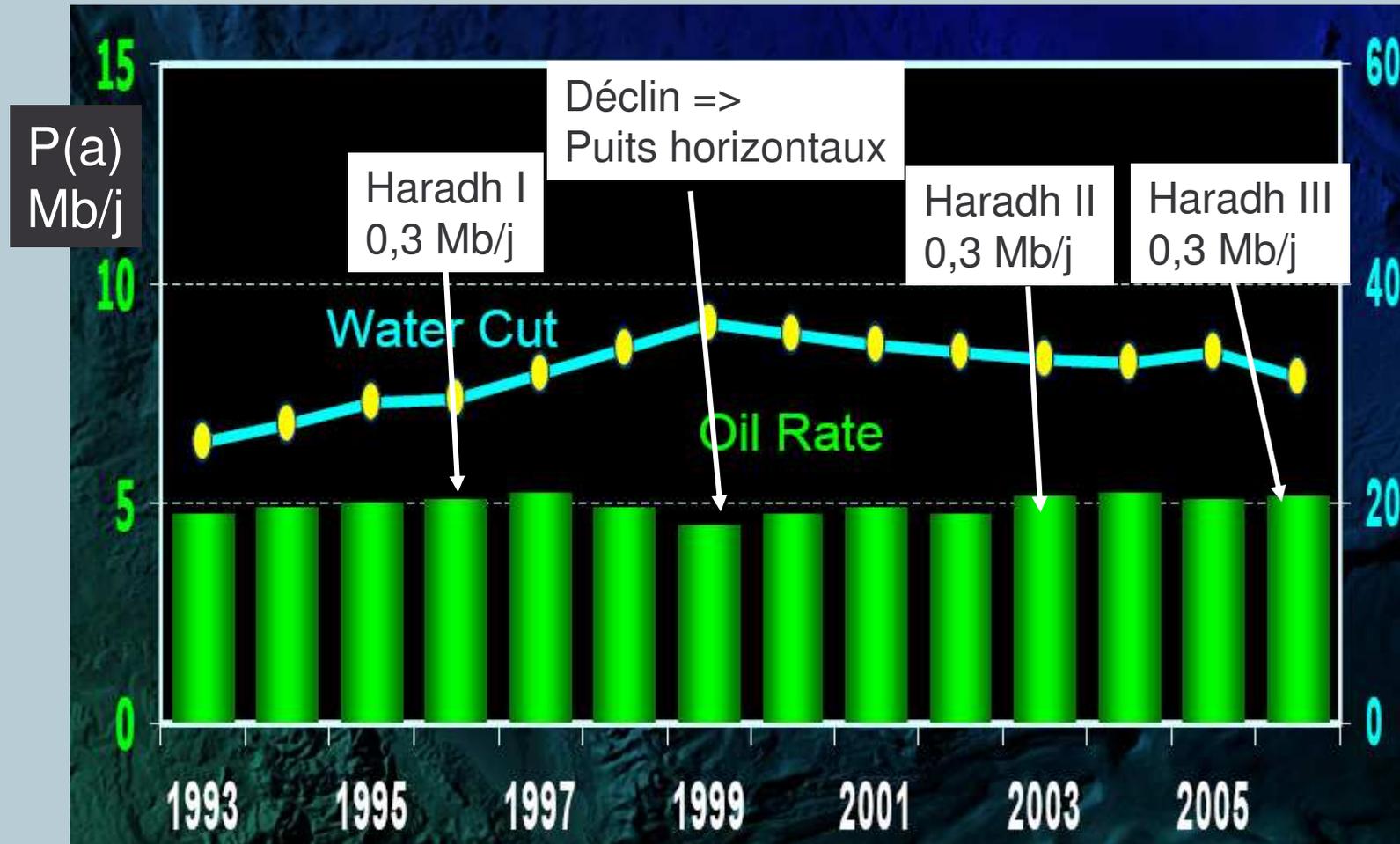
- ◆ Largest Oil Field in the World
- ◆ Discovery: Ain Dar (1948)
- ◆ Discovery: Haradh (1949)
- ◆ On stream: 1951



Source : Aramco Saudi  
1 may 2006 CSIS

© X. Chavanne – IUP env. - 8 oct. 2007

# Profil de production de brut



**Dernières technologies de puits, dernière roche réservoir. Et après ?**

Source : Aramco Saudi  
1 may 2006 CSIS

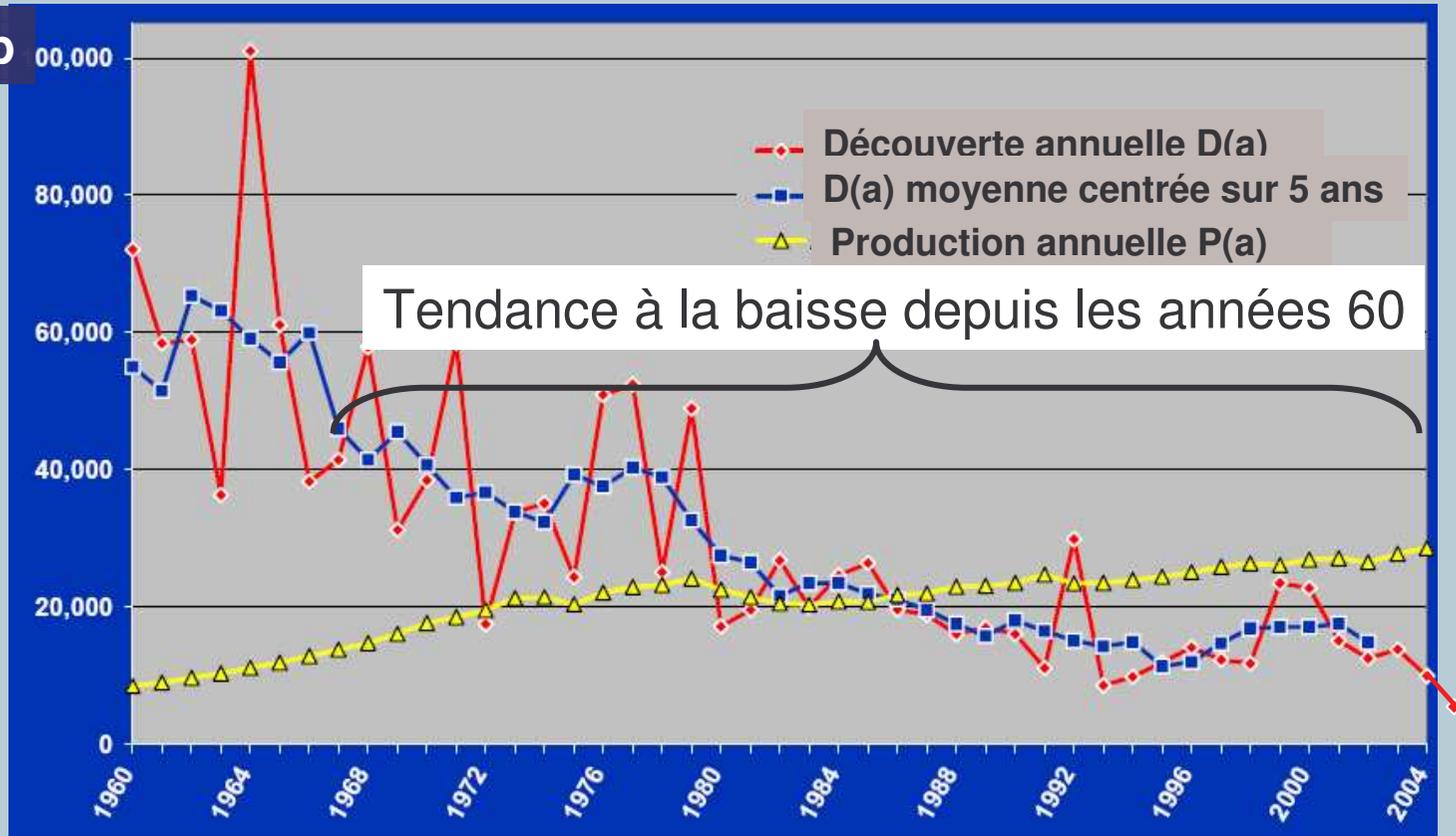
© X. Chavanne – IUP env. - 8 oct. 2007

# Production mondiale

© X. Chavanne – IUP env. - 8 oct. 2007

# Découverte versus production

D(a) et P(a) en Gb



Source :  
IHS Energy  
PEPS 2005

**Depuis les années 80 on ne renouvelle plus le pétrole produit.**

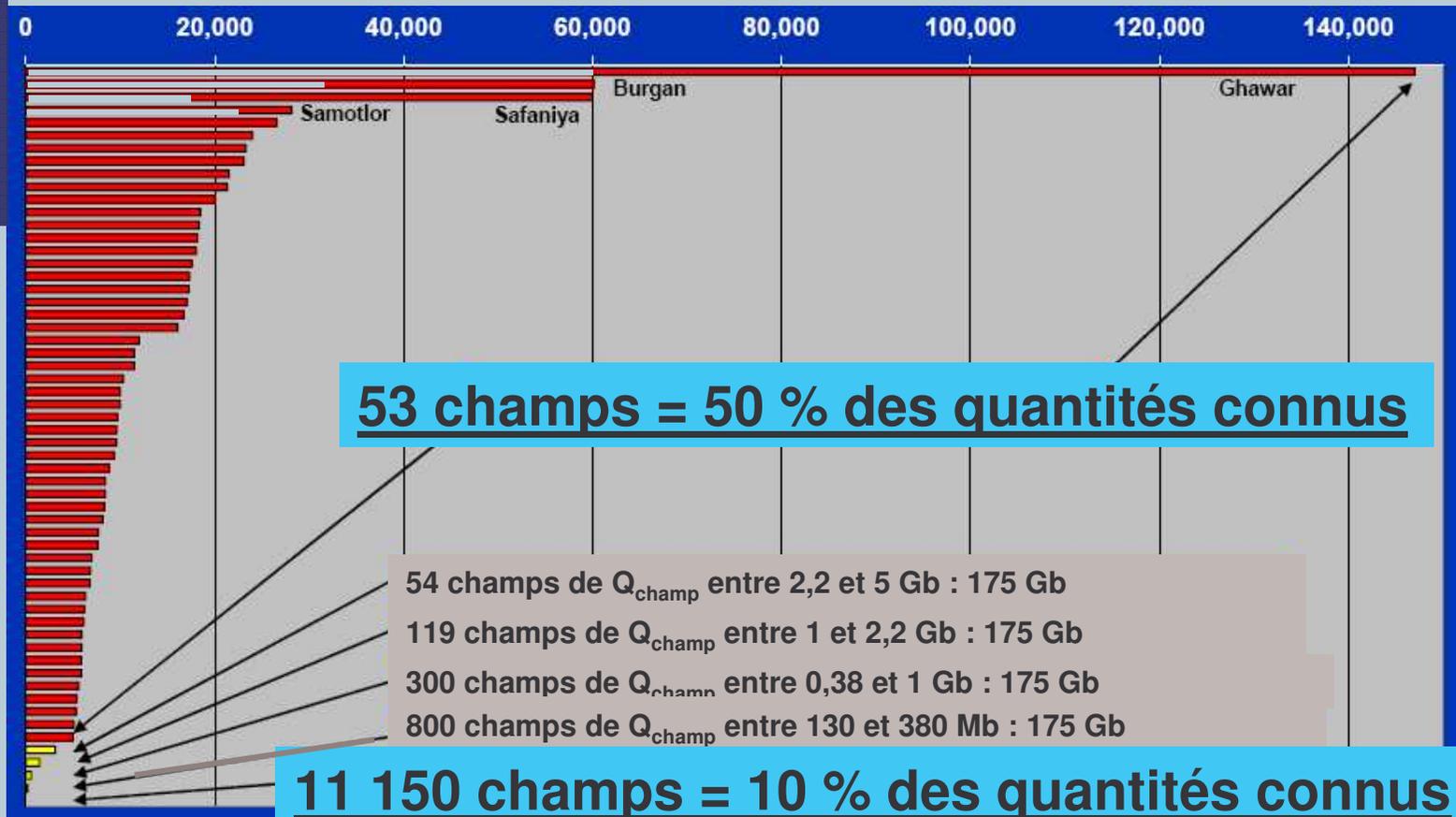
# Bilan géologique mondial

- Plus de 600 bassins sédimentaires ; moins de 100 prolifiques.
- Tous ont été prospectés avec la géophysique de surface (sismiques).
- Seuls quelques dizaines non reconnues par forage (partie de l'arctique et sous marine en eau profonde).

**Sur Terre les chances d'une nouvelle province pétrolière comme le Moyen Orient sont presque nulles**

# Distribution des réserves initiales des champs

Taille des champs en Gb (monde hors EUd'A et Canada)



Source :  
IHS Energy  
PEPS 2005

$Q_{\text{champ}}$  : quantité totale de pétrole récupérable d'un champ

# Distribution de la production des champs

En 2004 production mondiale : 29 Gb/a ou 80 Mb/j.

120 champs produisent presque 50 % de la production  
Les 14 plus gros produisent 20 % dont :

Ghawar (Arabie Saoudite) 1,8 Gb/a ou 5 Mb/j.

Cantarell (Mexique) 0,78 Gb/a ou 2,2 Mb/j.

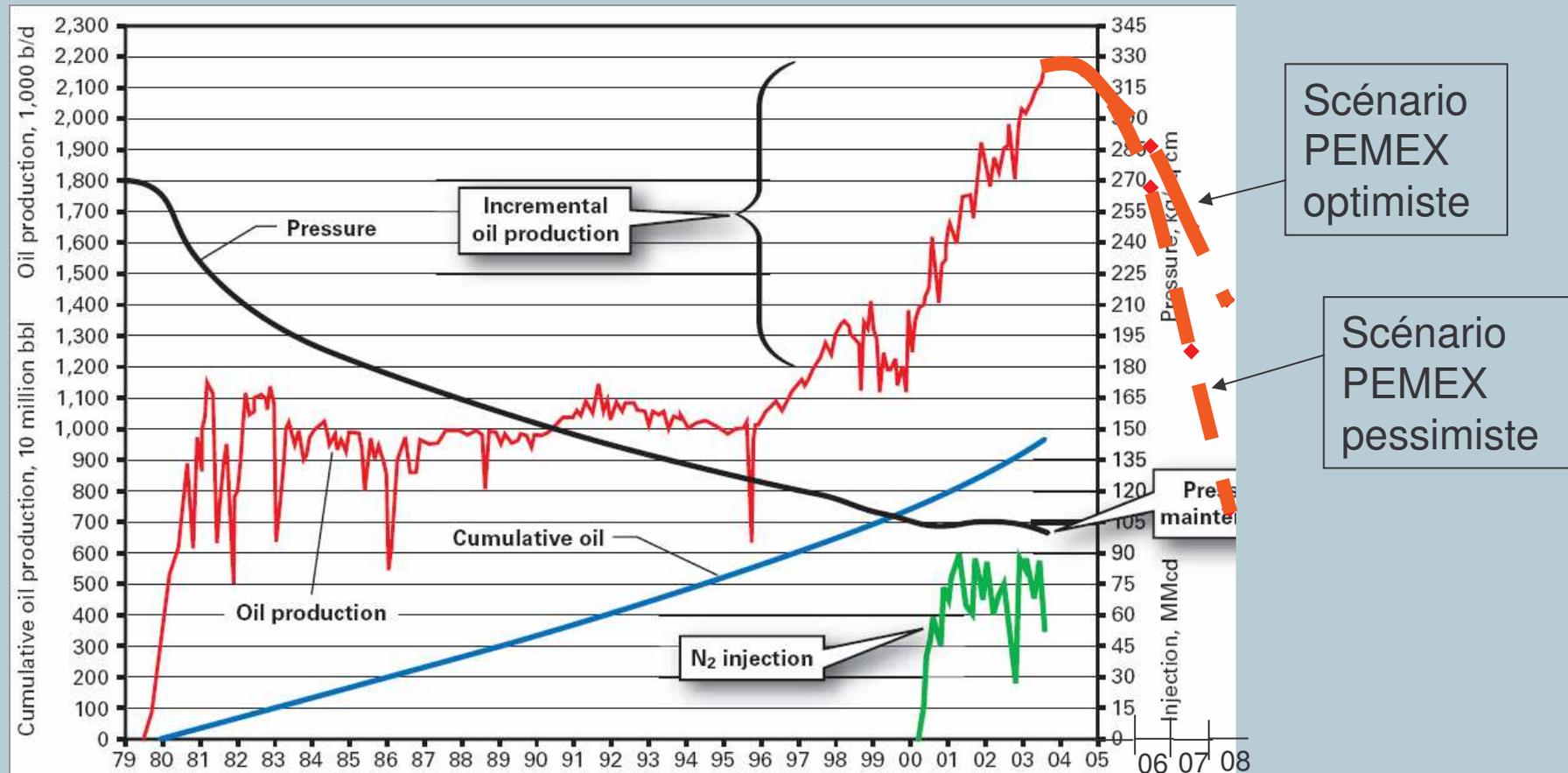
Burgan (Koweït) 0,51 Gb/a ou 1,4 Mb/j.

Rumaila (Irak) 0,44 Gb/a 1,2 Mb/j.

Daqing (Chine) 0,33 Gb/a ou 0,90 Mb/j.

# Cantarell (Mexique)

**P(2004) = 2,14 Mb/j, 2e producteur = 2 à 3 % P mondial**



Source : PEMEX via O&GJ 17ap 06 + D. Shields

# Production des champs supergéants

Burgan (Koweït) 0,58 Gb/a, découvert en 1938. « champ épuisé » dicit le président de la compagnie nationale du Koweït.

Rumaila (Irak) produit depuis 1954. Surproduit ?  
En déclin d'après AIE (World Energy Outlook 2005).

Daqing (Chine) 0,33 Gb/a. Déclin de 2 % entre jan et juin 2006 (Dow Jones newswires d'après agence chinoise)

# Production de pétrole brut

## **Des pays en déclin :**

en 1990 : 2 pays sur les 50 principaux producteurs

en 2004 : 17 pays sûrs (d'après statistique de BP)

33 pays d'après la compagnie Chevron

## **Des pays en difficulté :**

Iran : 0,3 à 0,4 Mb/j de déclin par an sans nouvelle capacité, d'après son ministre du pétrole en 2005.

Mexique : Cantarell = 65 % de la production totale.

Koweït : réserve officielle de 100 Gb considérée comme surestimée même par l'AIE (World Energy Outlook 2005 : 50 Gb)

Arabie Saoudite : officiellement 2 % de déclin par an. Projets difficiles.

## **Des pays encore «sûrs» :**

Brésil, pays golfe de Guinée, Mer Caspienne, Irak (?), Lybie.

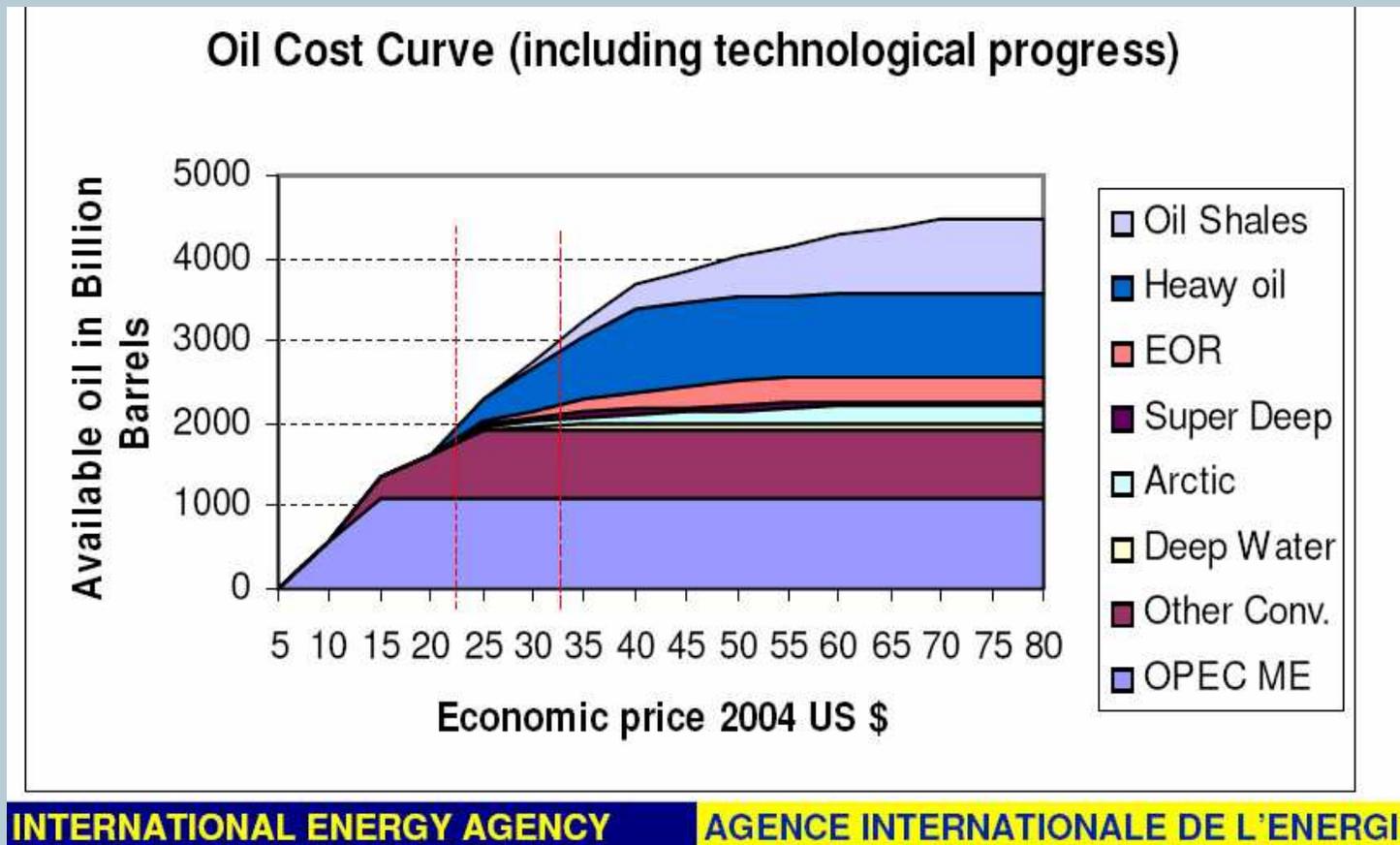
# La vision économique des réserves

Professor M Adelman, ex consultant AIE :

*“Minerals are inexhaustible and will never be depleted. A stream of investment creates additions to proved reserves from a very large in-ground inventory. The reserves are constantly being renewed as they are extracted..... How much was in the ground at the start and how much will be left at the end are unknown and irrelevant”*

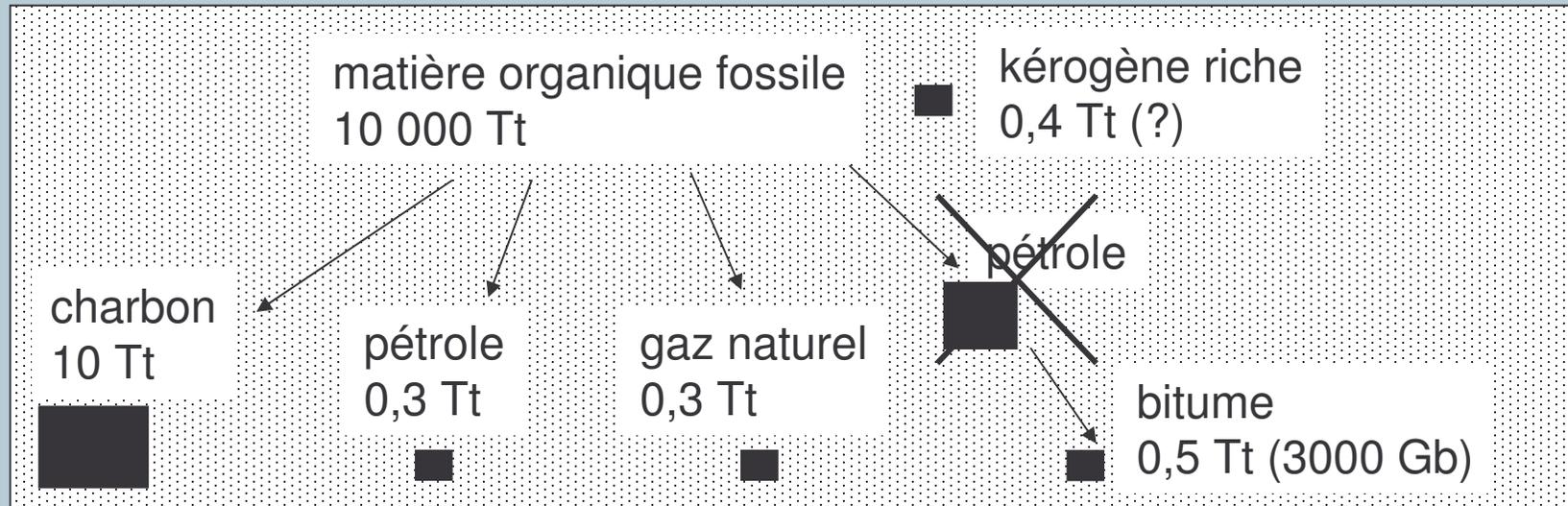
Hausse des prix => investissements => nouvelles réserves à partir de quantité en place => baisse des prix

# La vision économique des réserves



Les réserves augmentent avec le prix du baril. Jusqu'où ?

# Sables et schistes bitumeux ?



Sables bitumeux : gisements trop près de la surface

Alberta (1800 Gb **in situ**), Orénoque (1200 Gb **in situ**)

« Schistes bitumeux » : kérogène dense et riche en H

Green River (1700 Gb **in situ**)

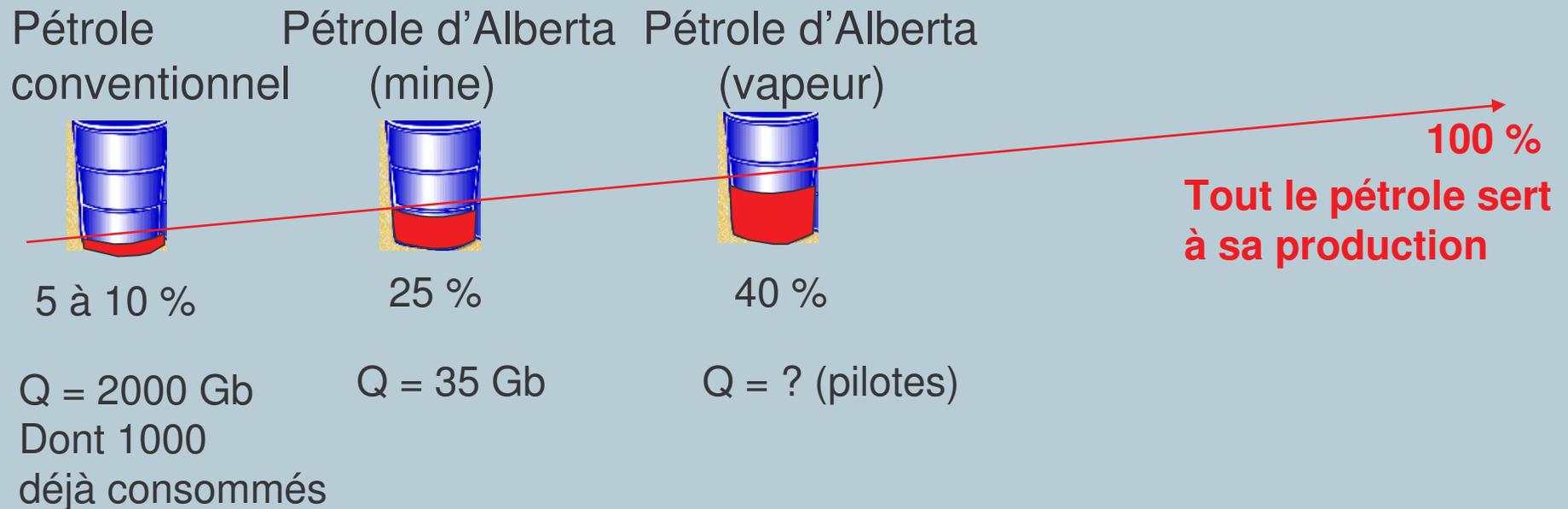
T t =  $10^{12}$  tonnes

# Sables et schistes bitumeux ?

## Le rendement de la production

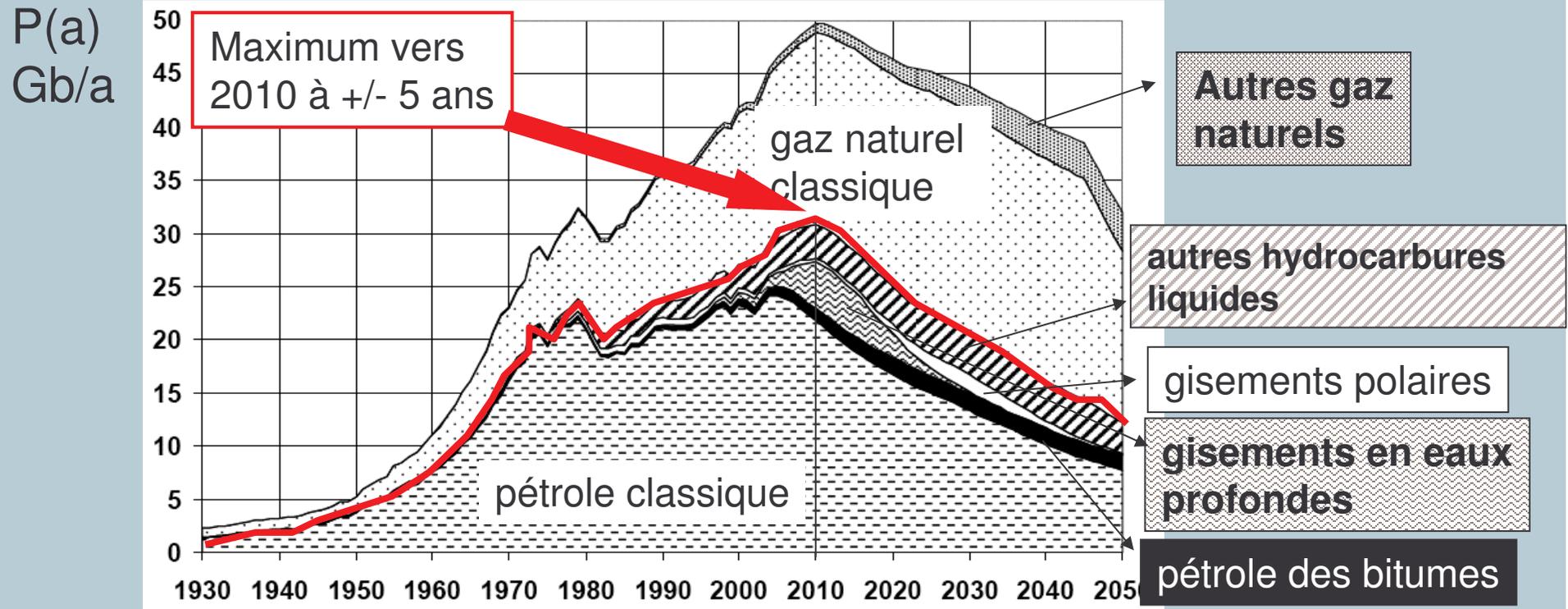


**Energie :** coût d'exploitation du gisement à la raffinerie (hors investissement)



# Le maximum mondial

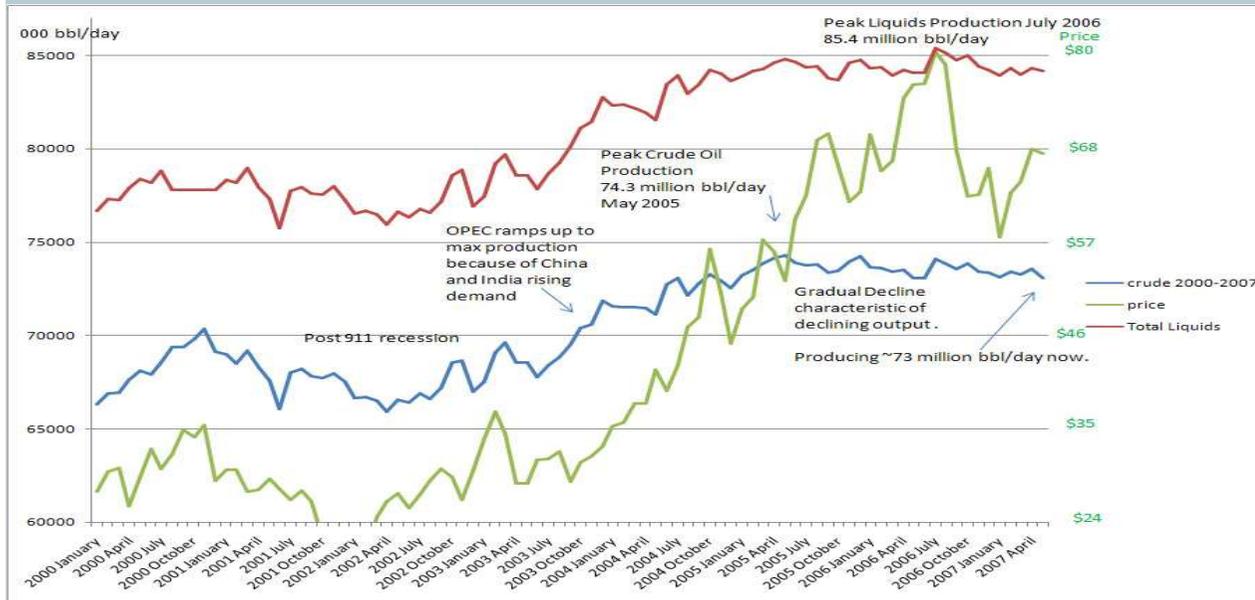
- Modèle de C. Campbell (ASPO)



**Approche du maximum => moins de découvertes  
=> coûts E&P croissants  
=> cours élevés et volatils**

# Le maximum mondial

## Production et cours du baril de pétrole



AIE Oil Market

Report juillet 2007 :

« supply oil crunch  
by 2012 »

Nouvelles capacités de production (Petroleum Review) en Mb/j :

2007	2008	2009	2010	2011	2012
4,5	4,4	5,1	4,1	3,7	3,1

# Le maximum mondial

## Histoire de deux supergéants :

Ghawar : découvert en 1948 ; produit à partir de 1951

$Q_{\text{champ}} \sim 100 \text{ Gb}$  (60 Gb déjà produit)

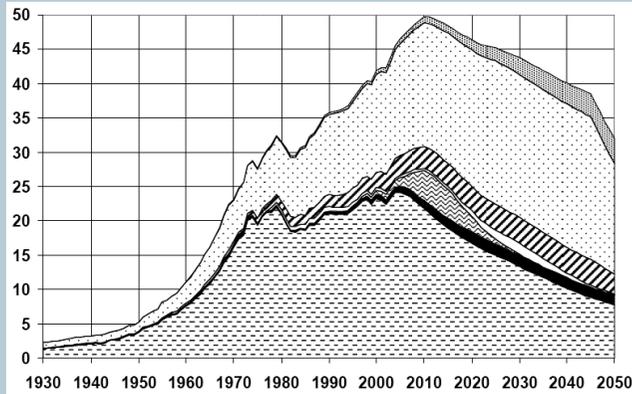
Demande mondiale : 10 Mb/j ou 3,7 Gb/a

Kashagan : découvert en 2000 ; devrait produire à partir de 2005, initialement, puis 2010. Très profond, couche de sel, gaz très toxique et corrosif, environnement en surface extrême...

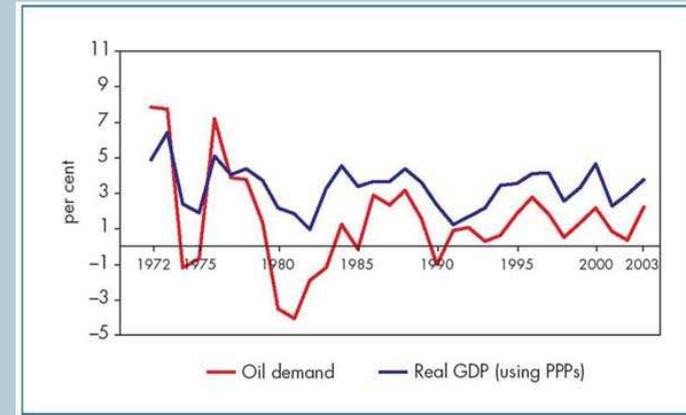
$Q_{\text{champ}} \sim 10 \text{ Gb}$

Demande mondiale : 81 Mb/j ou 30 Gb/a

# Les implications



+



= Récession, inflation, crise monétaire... !?

Adieu : voyages en avion, sports d'hiver, voitures, informatique... ?

Danger : alimentation, chauffage...