

LECON 4 - 2015

LA FORMATION DES HYDROCARBURES

LES RESERVES

D
■
A
G
E
N
E
S
E

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

de la chaleur ($T^\circ = 10'-100''$)
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



DIAGENESE de la M.O.

D

Les substances organiques sont plus fragiles et plus instables que les composés minéraux, et leurs transformations sont importantes dès la période de diagenèse

.

A

C'est au cours de ces mutations **postérieures** au dépôt que le kérogène donne naissance au pétrole et au gaz

G

E

Ces réarrangements tendent vers un degré d'ordre plus élevé et un produit plus stable, les structures les plus désordonnées sont éliminées, **les radicaux séparés donnent du CO₂, de l'H₂S et de l'eau**

Z

E

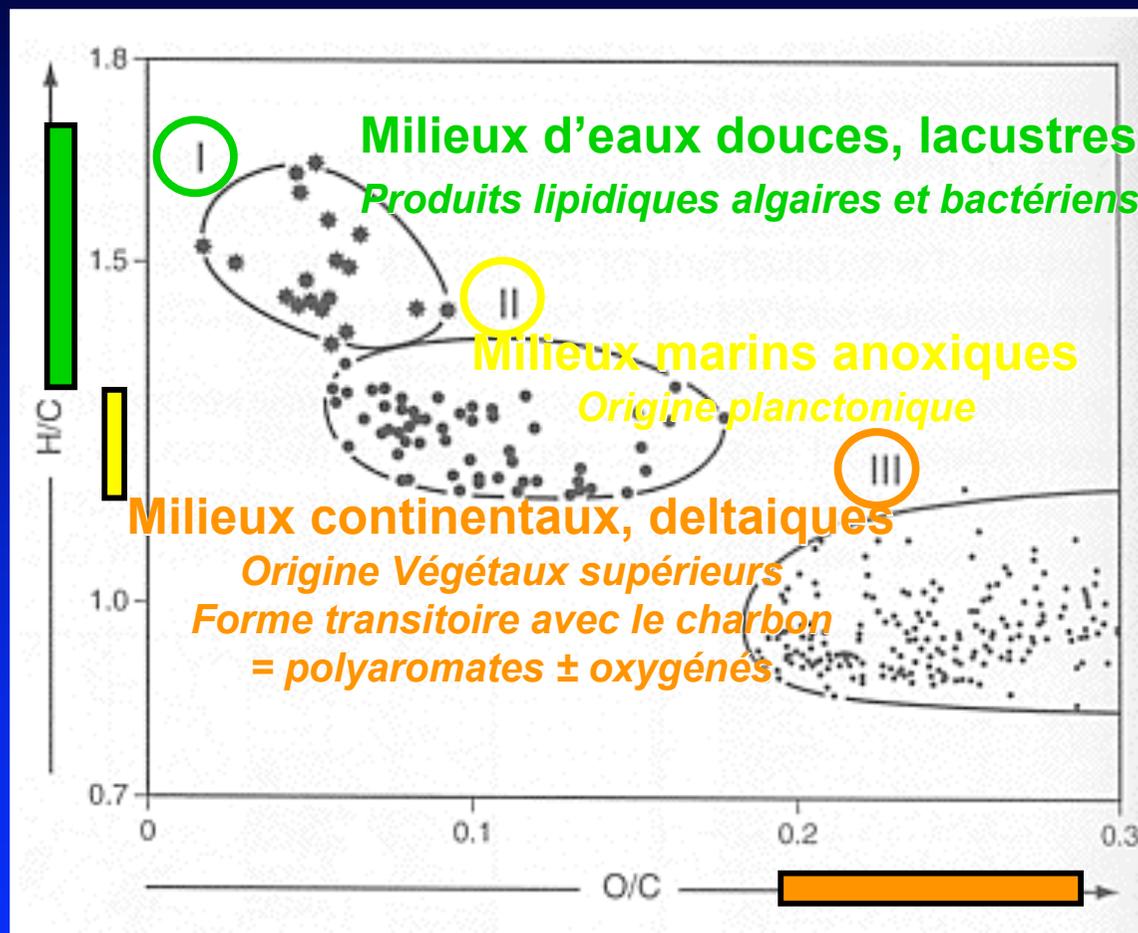
S

E

Le produit final est enrichi en C, appauvri en H et O
= diagramme d'évolution du kérogène de Van Krevelen

A L'ORIGINE DANS LES SEDIMENTS

**S
E
N
E
Z
E
G
A
-
D**



*Green River,
USA, Eocène*

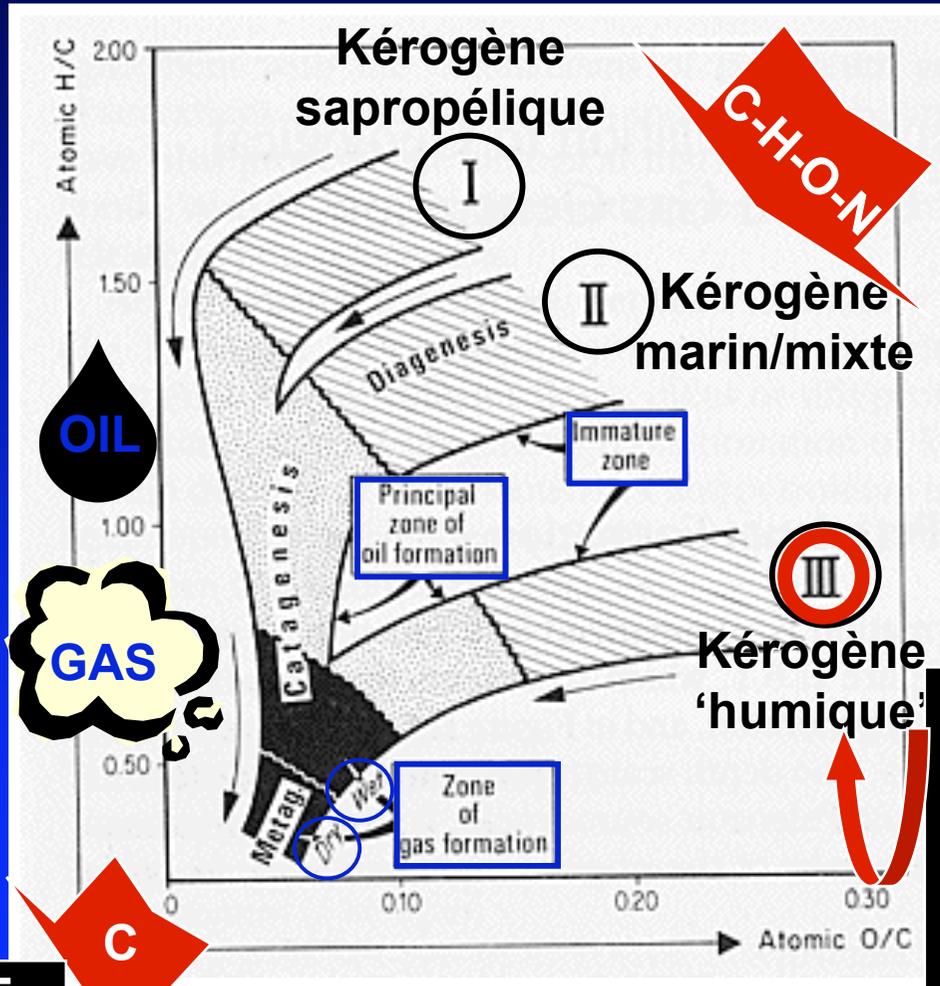
*Toarcien
Bassin de Paris,
Allemagne*

*Argiles Miocènes
Mahakam, Indonésie*

EVOLUTION DU KEROGENE

EVOLUTION DU KEROGENE

DIAGRAMME DE VAN KREVELEN



lipides...

lignine...

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

D
A
G
A
N
Z
E
M
S
E

DIAG
↓
CATAG
↓
METAG

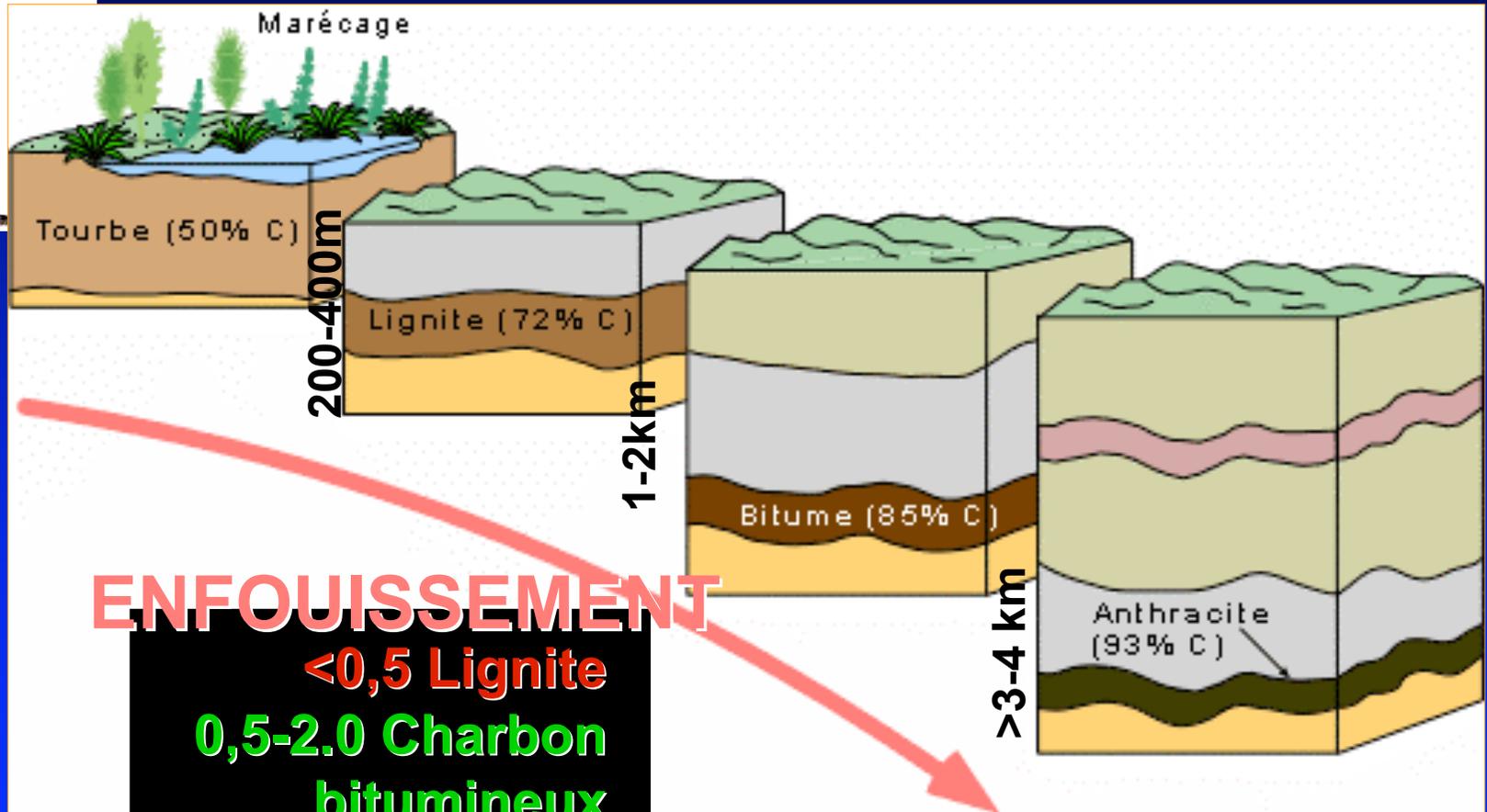
GRAPHITE

Types I, II, III



EVOLUTION DU KEROGENE

DIAGRAMME DE VAN KREVELEN

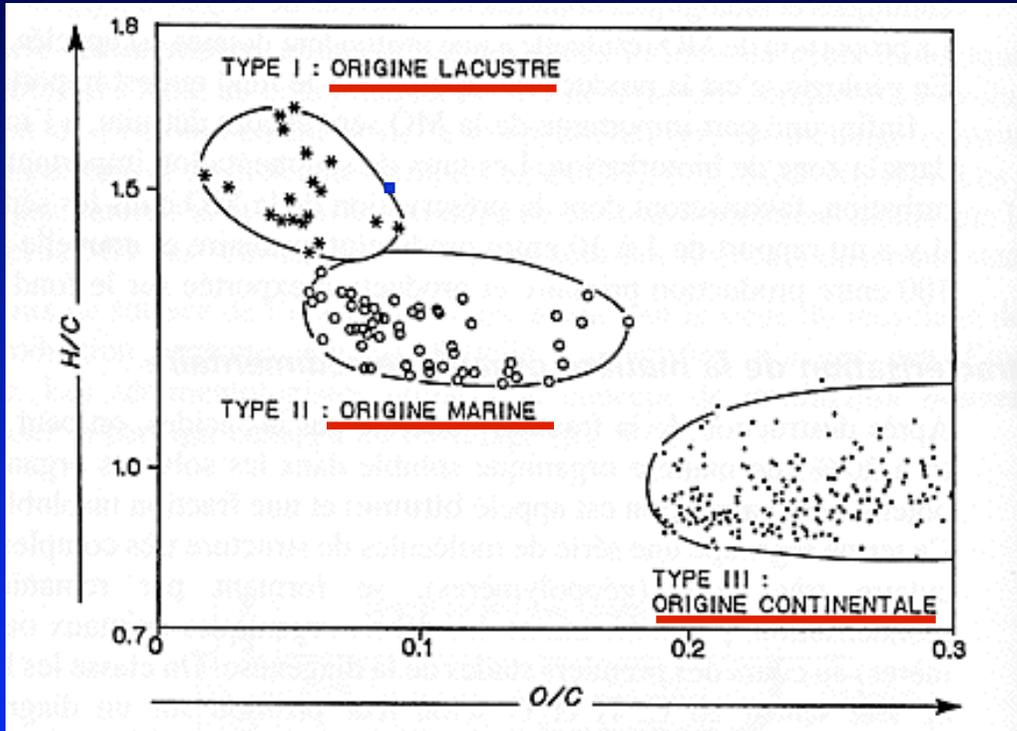


ENFOUISSEMENT

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

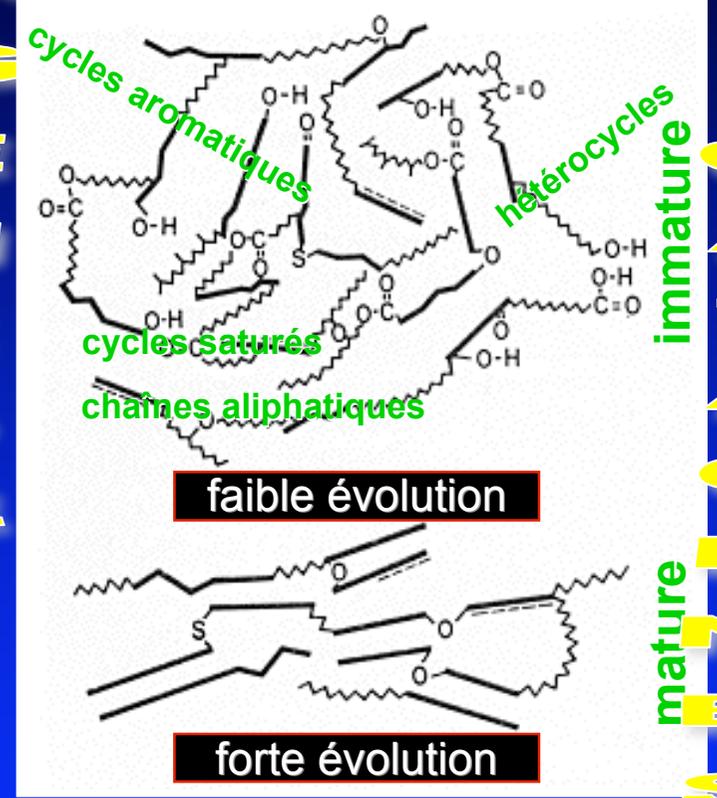
Exemple de l'évolution de la réflectance de la vitrinite

pour simplifier ...



D
A
G
E
N
E
M
S
E
M

EVOLUTION DU KEROGÈNE (TYPE II)



C
A
H
A
G
M
Z
M
E

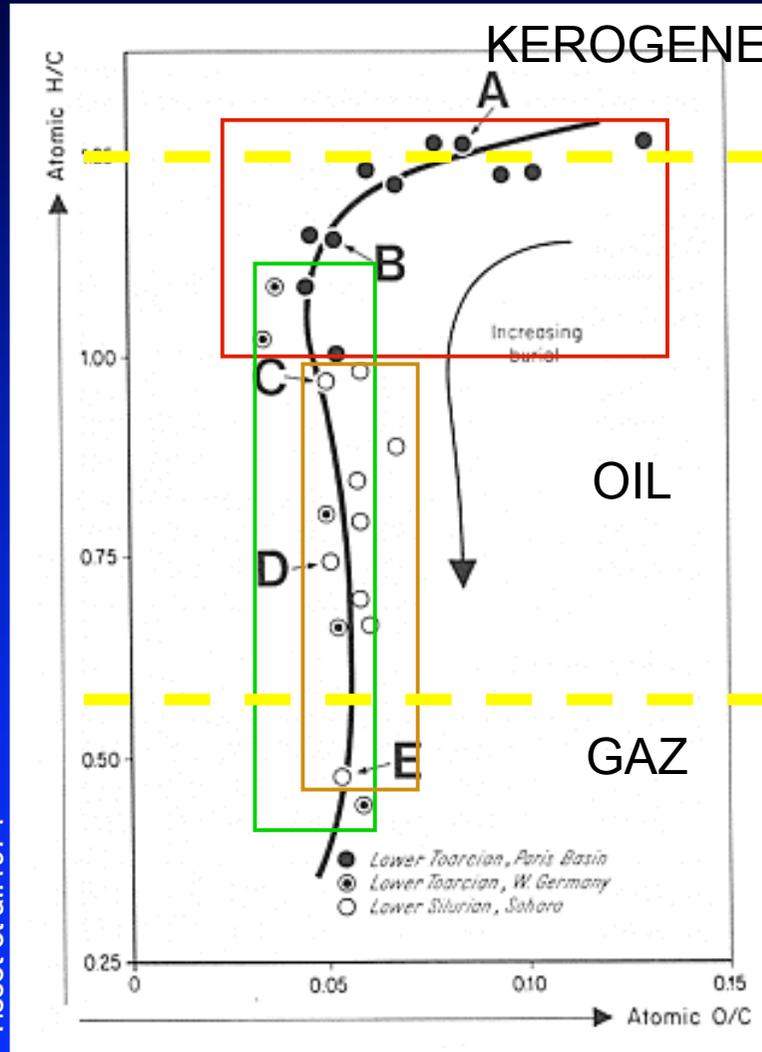
**A L'ORIGINE DANS LES SEDIMENTS
QUEL DEVENIR?**

➔ **Géopolymères**
ou macromolécules à noyaux cycliques condensés, liés par chaînes hétéroatomiques ou aliphatiques

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

ESNAGAD

EVOLUTION DU KEROGENE II



Tissot et al. 1974

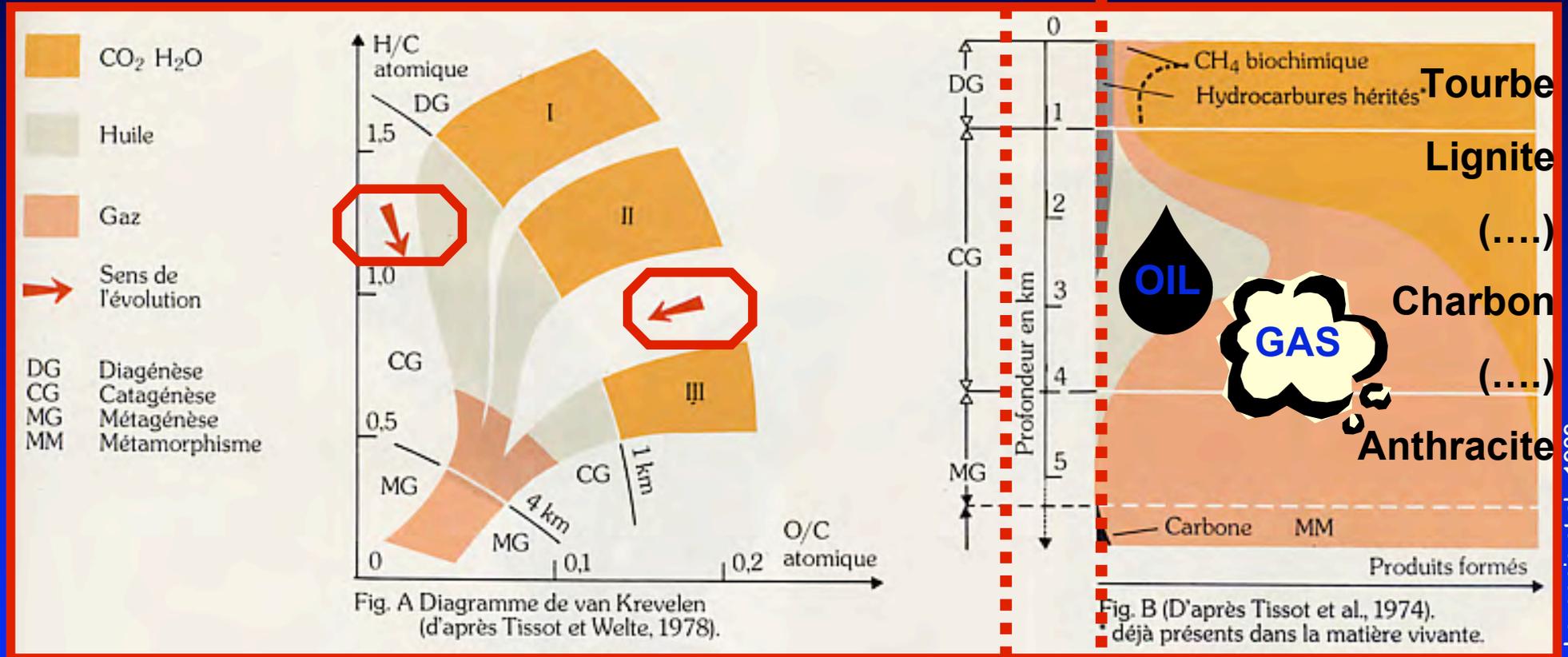
dia

cata

méta

**Toarcien inf Bassin de Paris
et All (ouest): shales
Shales Siluriens du Sahara
(Algérie et Libye)**

Chemins d'Evolution de la Matière Organique



Leygonie et al., 1983

GRAPHITE



EVOLUTION DU KEROGENE

les kérogènes anciens se ramènent à trois types définis par leurs chemins d'évolution

TYPE I membranes lipidiques, cuticules d'algues, pigments peu dégradés
eau douce saumâtre

TYPE II macromolécules de 're-synthèse': sucres, et acides aminés agglomérés au hasard
milieu marin

TYPE III débris ligneux, tannins, lignine non dégradés
milieu continental

EVOLUTION DU KEROGENE

D
A
G
E
N
E
S
E

TYPE I rapport H/C élevé (>1,5) et O/C faible (<0,1)
surtout lipides algaires (*Botryococcus...*)
très prolifique en pétrole
ex: schistes bitumineux de Green River (Eoc)



TYPE II fréquent, ex des milieux marins confinés
rapport H/C assez élevé et O/C assez bas
chaînes aliphatiques et cycles naphthéniques
et aromatiques, souvent avec soufre

TYPE III provient des Végétaux sup continentaux
groupes polyaromatiques condensés
H/C faible, O/C élevé
faible rendement: 5X moins que type II
surtout gaz + CO₂ + H₂O

KEROGENES I, II et III

les kérogènes anciens se ramènent à trois types définis par leurs chemins d'évolution

	Environnement Principal	Rendement Habituel
TYPE I	lacustre	excellent
TYPE II	marin	bon
TYPE III	continental	médiocre

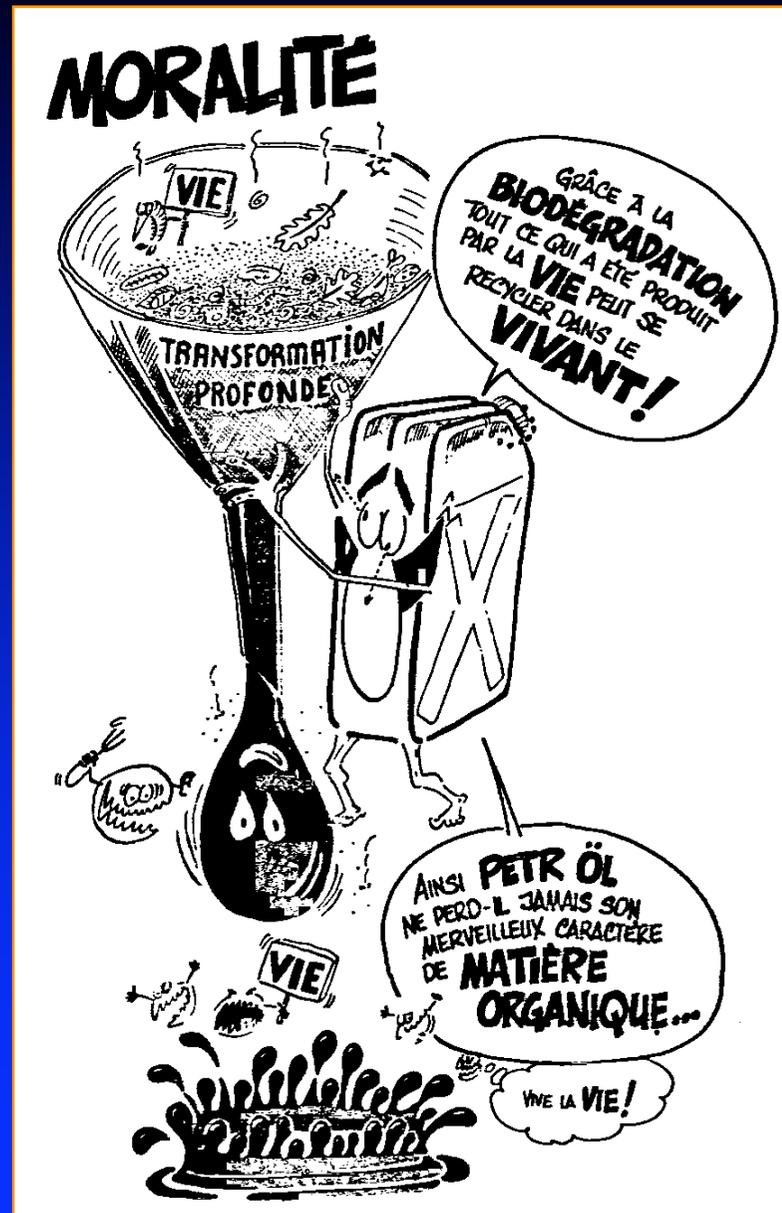
première
CONCLUSION

R Source
=
CONDITION
NECESSAIRE

mais
pas

...

SUFFISANTE



Restlé, 1986

DU KEROGENE AU PETROLE...

la M.O. [=le kérogène] 's'enfonce' suite à la subsidence...

PAS TRES VITE = de 0,005 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

C
A
T
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 autres composés polaires (petits acides, résines, asphaltènes...) inclus dans les grosses molécules de géopolymère= 'CRAQUAGE'



c'est la CATAGENESE
càd ...

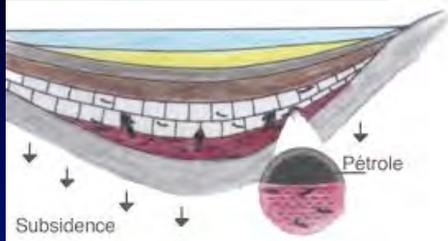


...la formation du PETROLE
le 'jus' de kérogène mature et donne donc le pétrole

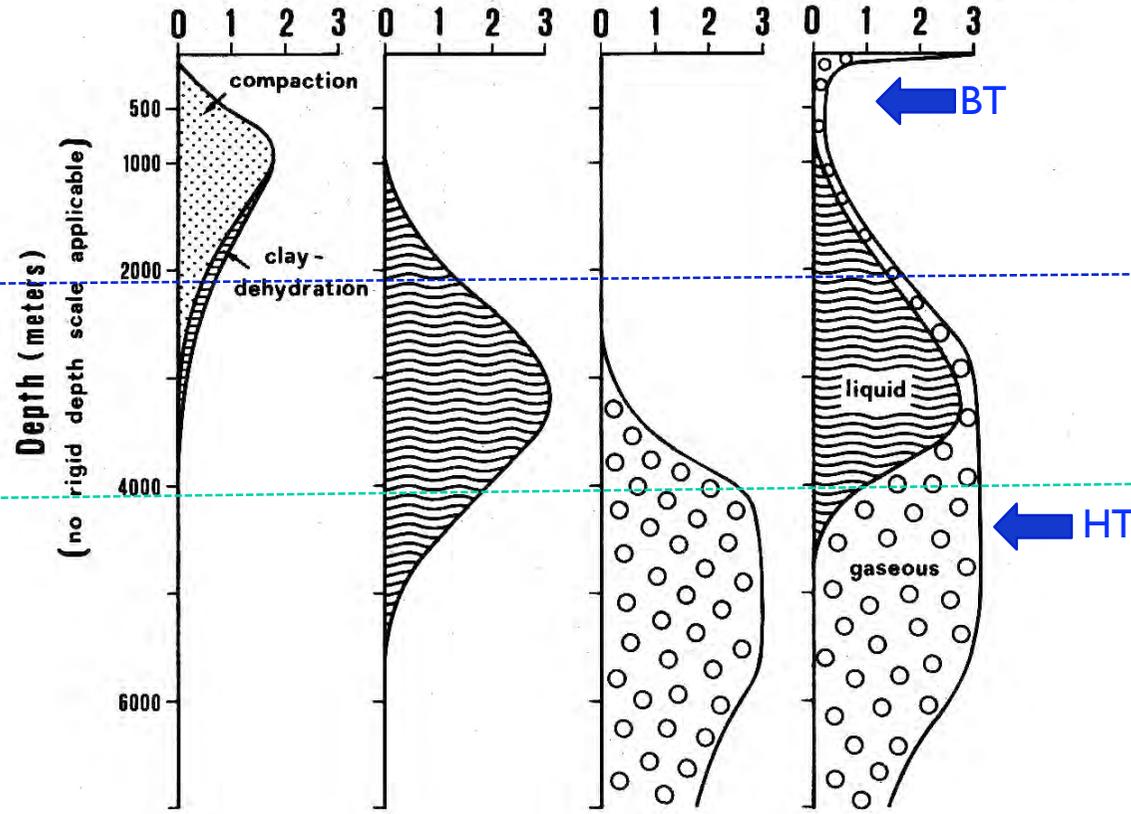


= FENETRE A GAZ

Chances for mode of primary migration depending on different parameters

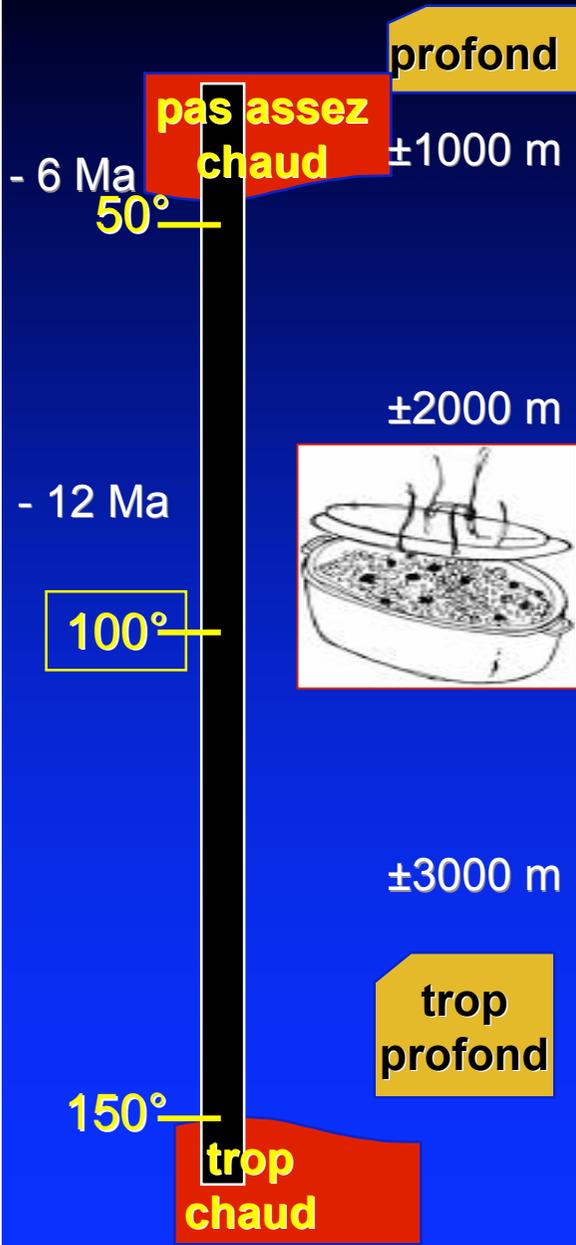


dissolved in water (micellar or molecular) as discrete liquid oil phase as discrete gaseous phase availability and generation of petroleum compounds



chances: 0 = none
 1 = small
 2 = good
 3 = excellent

SUBSIDENCE
 (T, p)



C
A
T
A
G
E
M
E
S
E

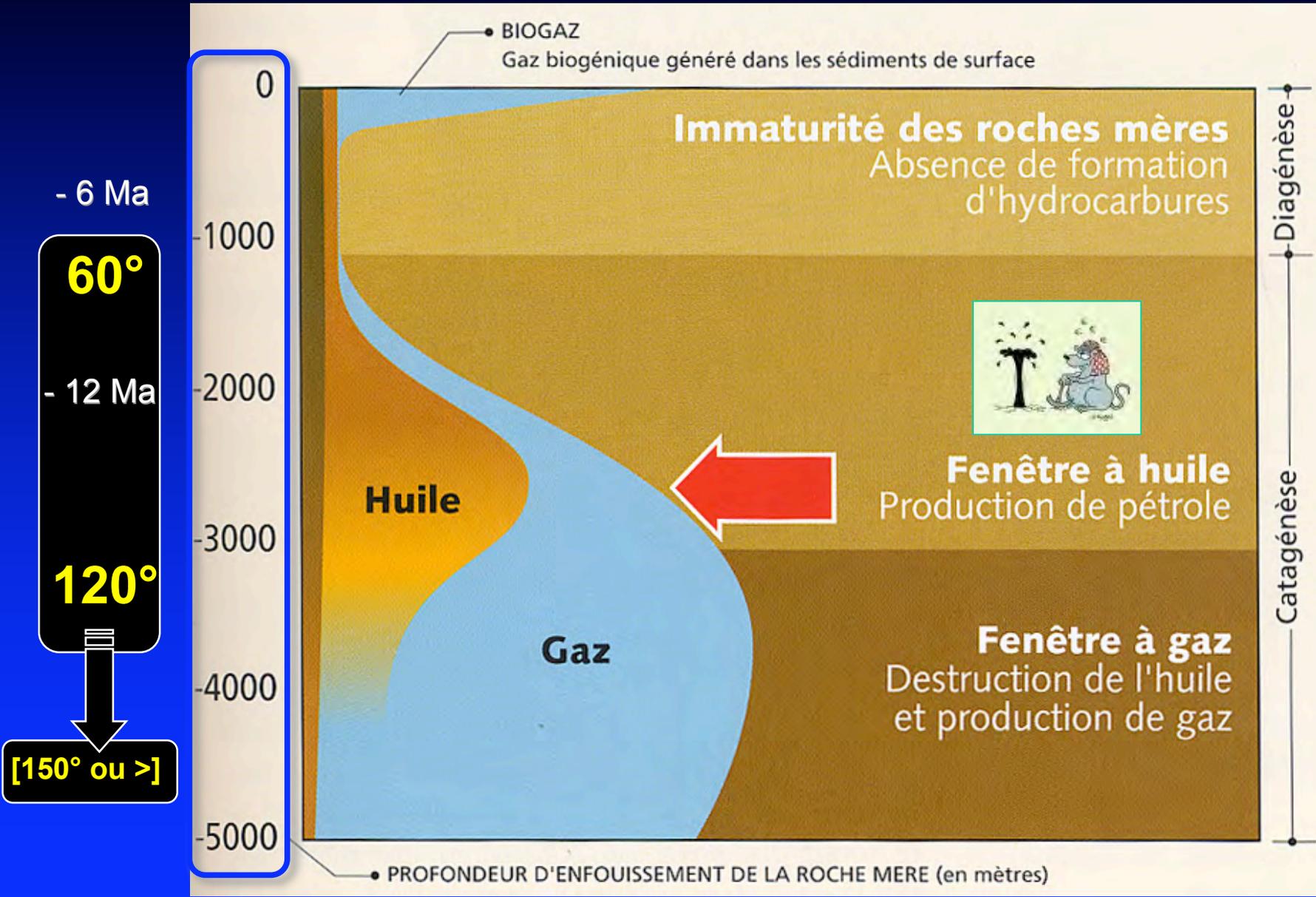
immature

il y a une T° optimale de MATURATION
courbe de production
du pétrole
[LOI DE LOPATIN]

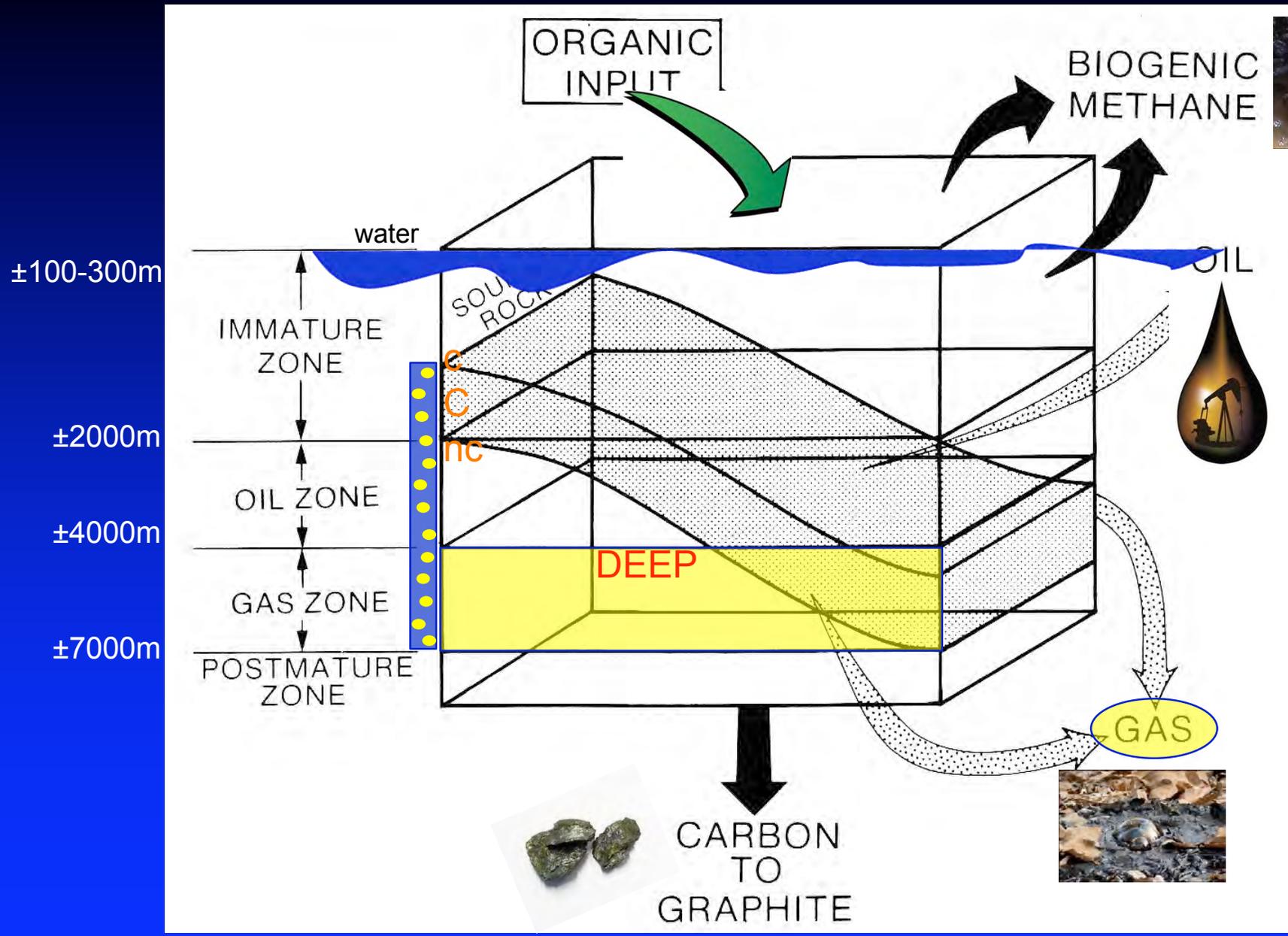
M
A
T
U
R
E

'overmature'

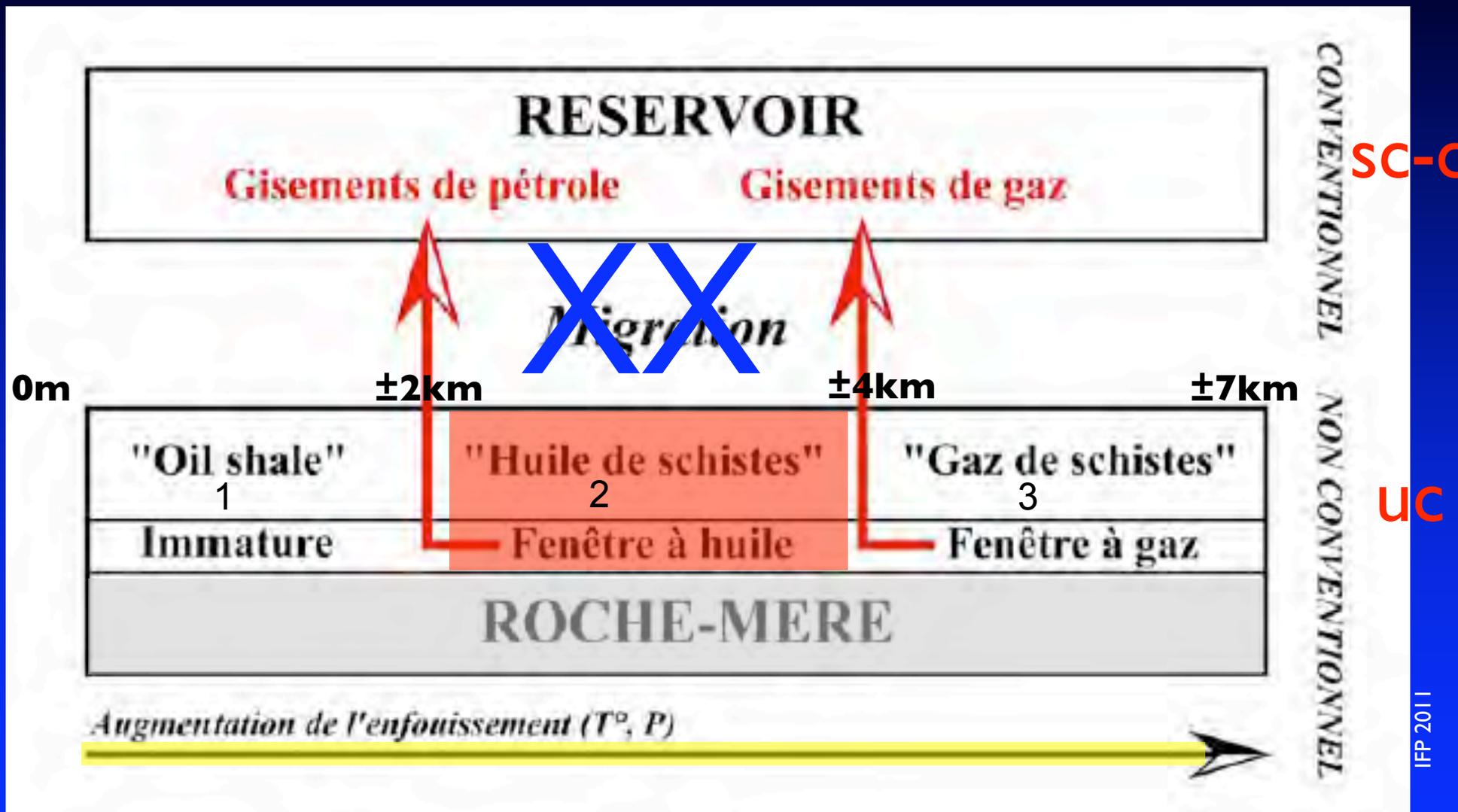
GENERATION DES HYDROCARBURES A PARTIR DES ROCHES MERES = 'Cuisines Géologiques'



Bauquis & Bauquis 2004



Brooks et al | 1987



1. oil shale (bituminous)
= KEROGEN

2. shale oil
= MATURE =>c and nc

3. shale gas
= gas window

ATTENTION!!!

OIL SHALE \neq SHALE OIL



'shallower/immature'



'deeper/oil-window'



en résumé

- 1 la catagenèse = réaction 'abiotique' opérant entre 50°-150°C soit entre 1 et 3 km de profondeur
- 2 suite aux fortes T, p, les HC sont 'craqués' en chaînes plus courtes (=paraffines avec perte de l'hydrogène et développement des structures aromatiques)
- 3 les kérogènes sapropéliques donnent l'huile et bcp de H_2S suite à la réduction sulfatée (origine = sédiments marins)
- 4 les kérogènes humiques donnent le charbon et bcp de CO_2 (origine = M.O. terrestre avec plus forte oxydation)

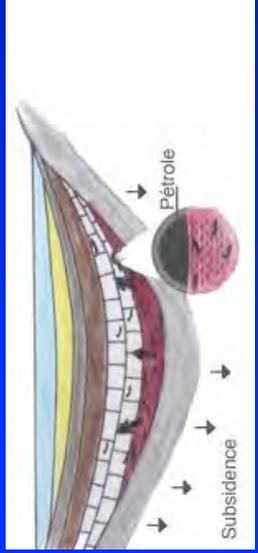
les huiles formées sont ainsi en $C_{18}-C_{40}$

en résumé (suite)

- a. il faut des 10' [bassins très subsidents] à 100' Ma [provinces de plate-forme] pour que le processus soit effectif,**
- b. à plus grande profondeur, une zone de genèse de gaz secs -méthane- succède aux gaz humides,**
- c. à plus grande profondeur encore [300°C...], on entre dans le domaine du métamorphisme et les HC s'aromatisent de plus en plus jusqu'à devenir du 'GRAPHITE' ou 'carbone pur'**



m é t a m o r p h i s m e



km0

ZONE IMMATURE
CH₄ biogénique
CO₂, H₂O

M O N Z M G A - D

km±1,5

O:W
les huiles formées sont en C₁₈-C₄₀

M O N Z M G A - H A C

GAZ HUMIDES

km±4

GAZ SECS

M O N Z M G A - H M

km±7

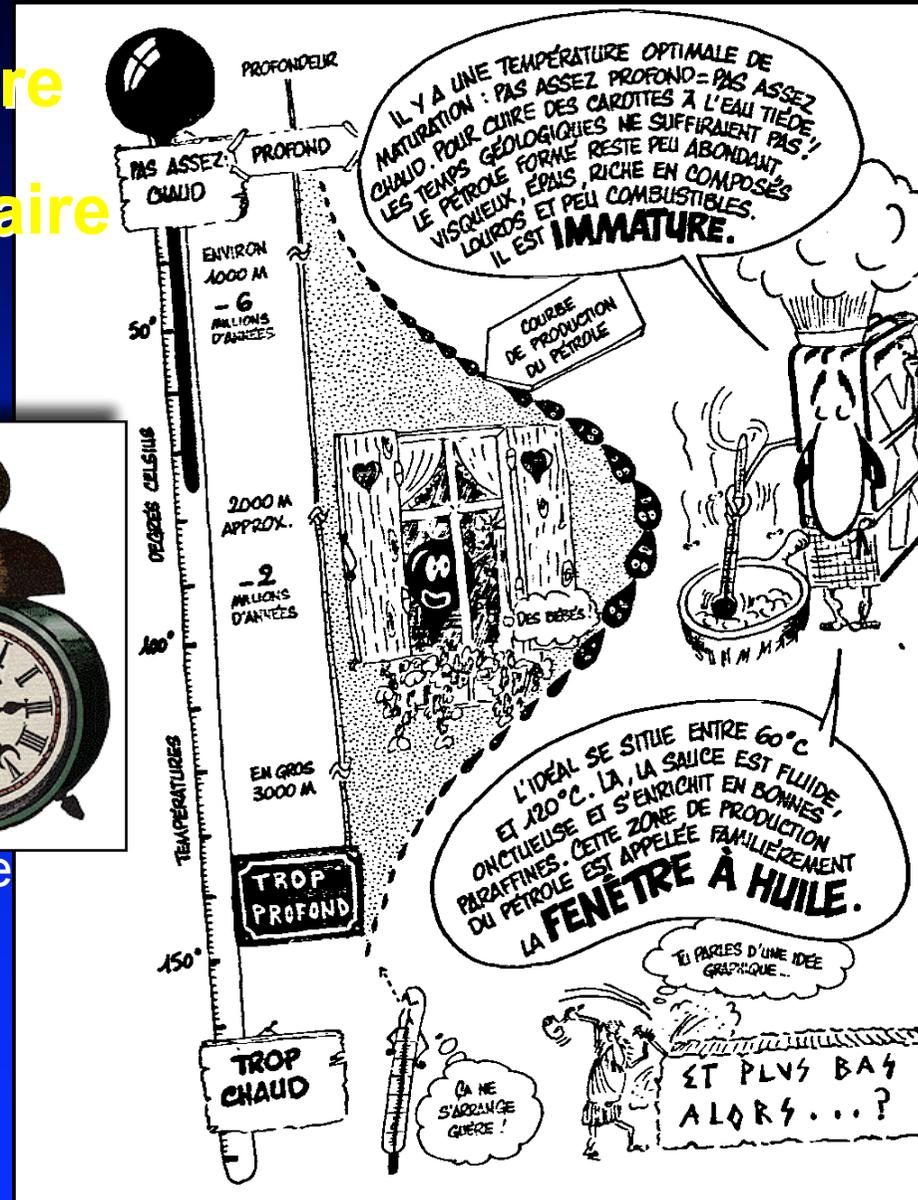
[>300°C]
'GRAPHITE'

M N O - I P R O M A - T M

Migration primaire Migration secondaire et RR ...



durée



température

Restlé, 1986

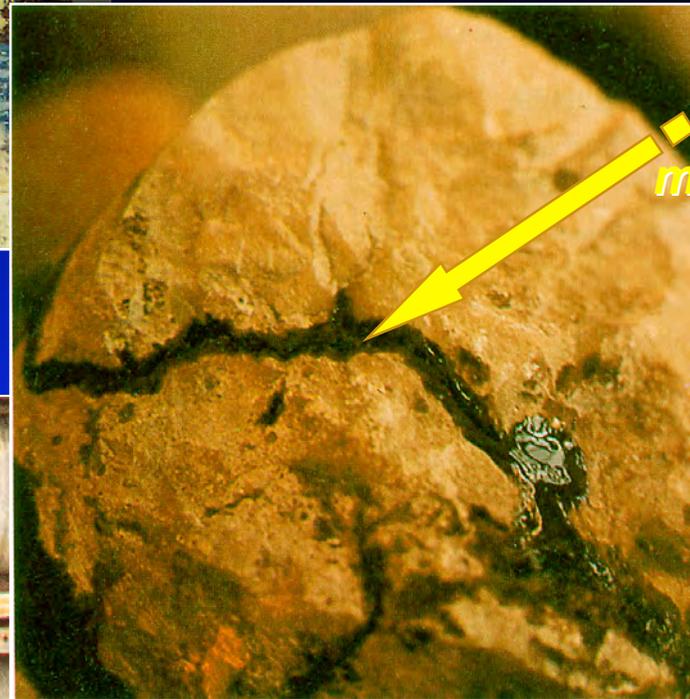
bien souvent, cela débute...



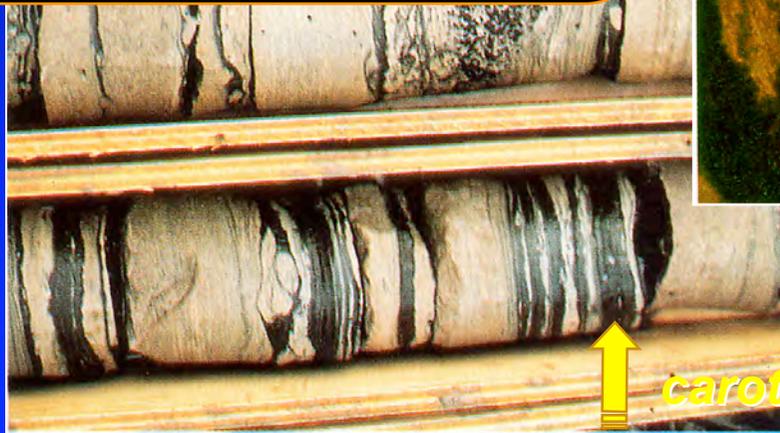
nappe

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

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



microfracture



carottes de forage

... par des 'oil shows'

IL FAUT DES ROCHES RESERVOIRS conventionnel vs non conventionnel



Permeability	Pervious		Semi-Pervious				Impervious						
Unconsolidated Sand & Gravel	Well Sorted Gravel	Well Sorted Sand or Sand & Gravel	Very Fine Sand, Silt, Loess, Loam										
Unconsolidated Clay & Organic			Peat	Layered Clay		Unweathered Clay							
Consolidated Rocks	Highly Fractured Rocks		Oil Reservoir Rocks		Fresh Sandstone		Fresh Limestone, Dolomite		Fresh Granite				
κ (cm ²)	0.001	0.0001	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹	10 ⁻¹⁰	10 ⁻¹¹	10 ⁻¹²	10 ⁻¹³	10 ⁻¹⁴	10 ⁻¹⁵
κ (millidarcy)	10 ⁺⁸	10 ⁺⁷	10 ⁺⁶	10 ⁺⁵	10,000	1,000	100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0001

Source: modified from Bear, 1972

‘FRACKING’ : we must **create** permeability

Marcellus Shale (M. Dev) northeastern USA, 140,000 km²

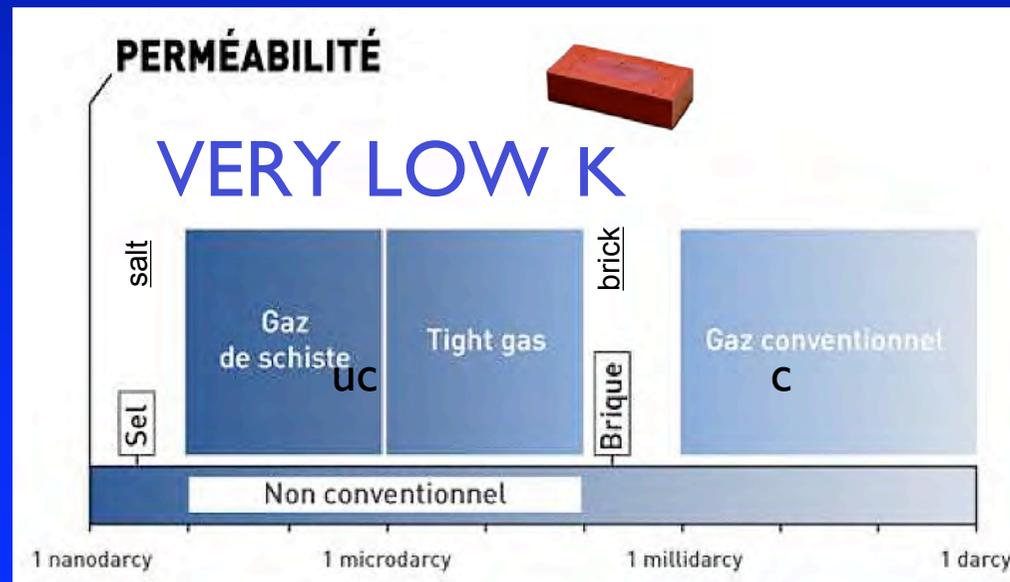
matrix porosity 0.5-5% => fracture porosity 2-7%

permeability : 10⁻¹⁷-10⁻¹³ cm² (seal!) => increase of 1 to 7 orders of magnitude => 10⁻⁶ cm²

SHALE GAS

These are THE GEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE ROCK that distinguish 'conventional' and unconventional' gas AND NOT their chemical nature, because **it is in all cases natural gas (mostly methane)**.

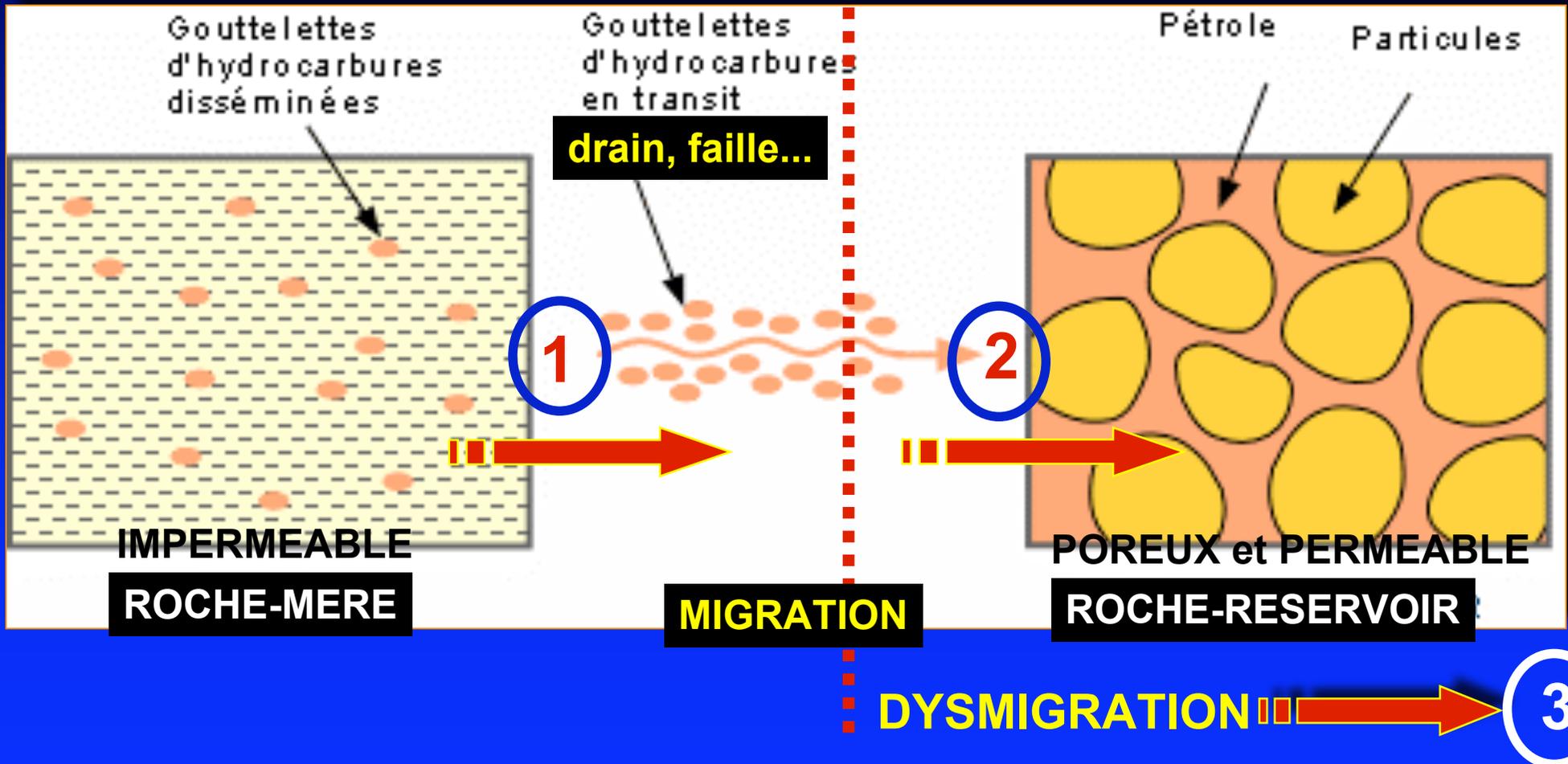
The quality of a reservoir rock is characterized by its porosity and permeability. The unconventional gas reservoirs are also the source rocks ('virtually no porosity', 'no K') => large gas volumes NOT connected in ultra-compact rocks.

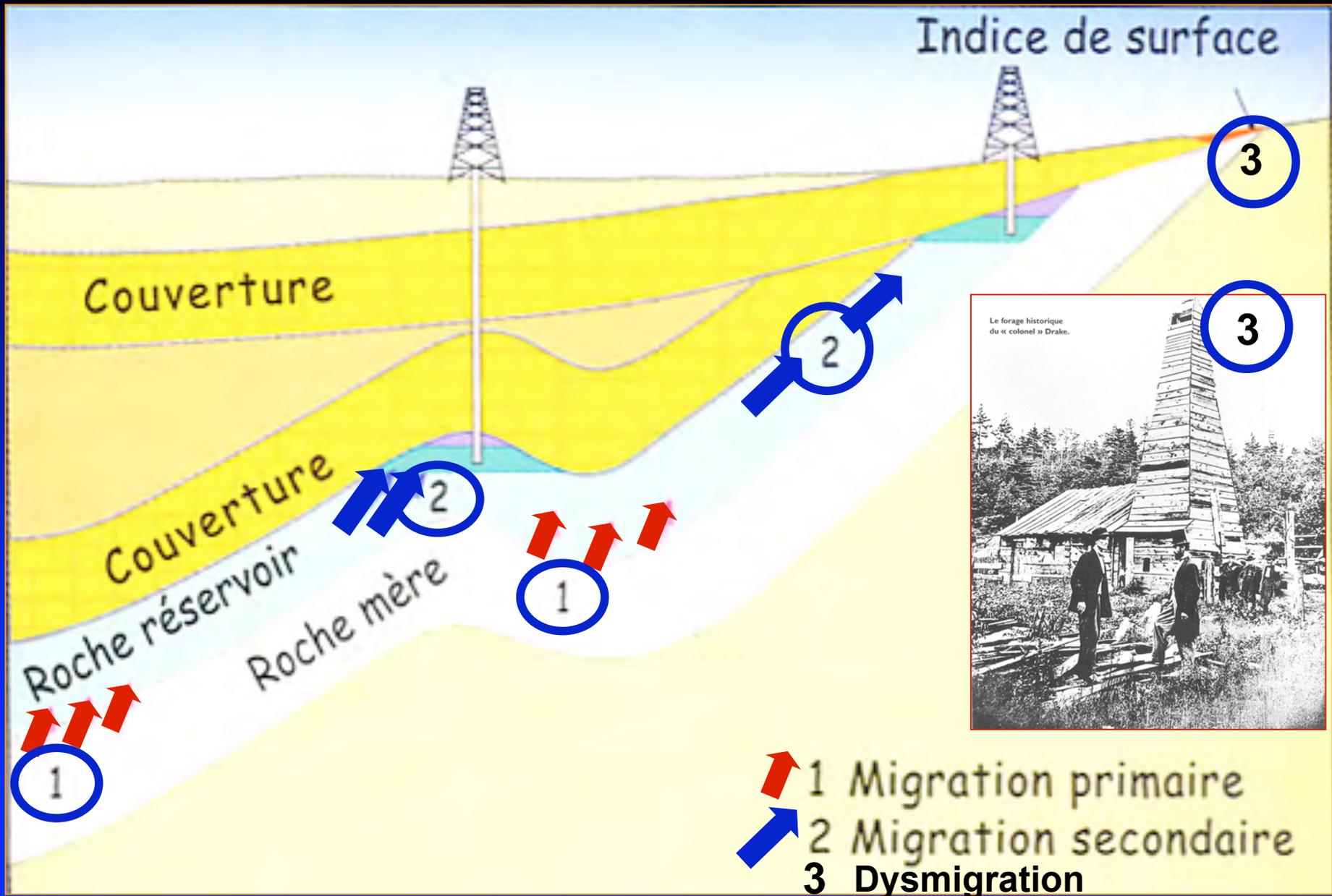


100'm-----1000'Km

MIGRATION PRIMAIRE

MIGRATION SECONDAIRE







IRAK-03/2011



Préat 2011

O
I
L
S
H
O
W

IRAK-03/2011



Préat 2011

OIL SHOW or DYSMIGRATION

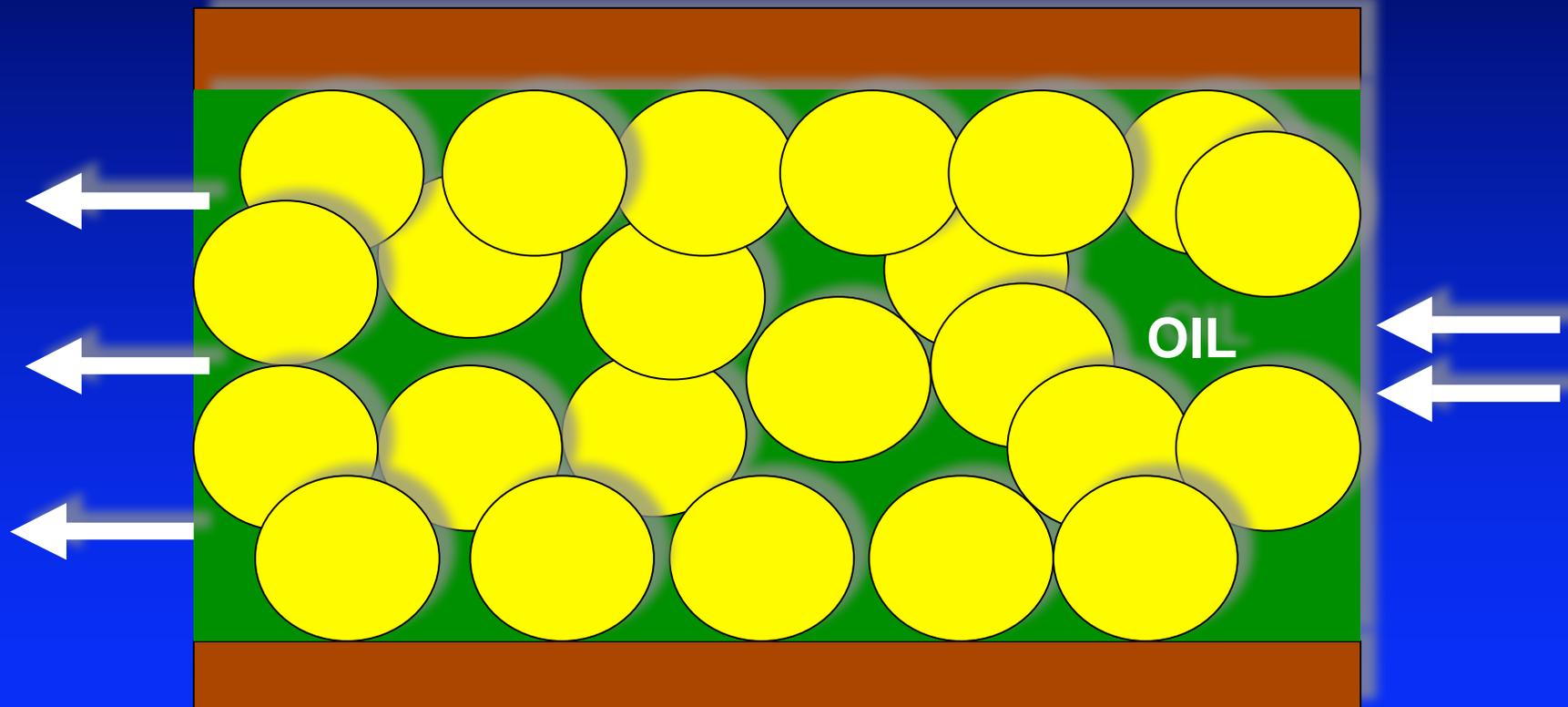


A QUOI RESSEMBLE UN RESERVOIR (RR)

PHI-K, diamètre grains de qq10'-100'μm ou >

40-50% = Carbonates (C+D)

50-60% = Grès-Sables



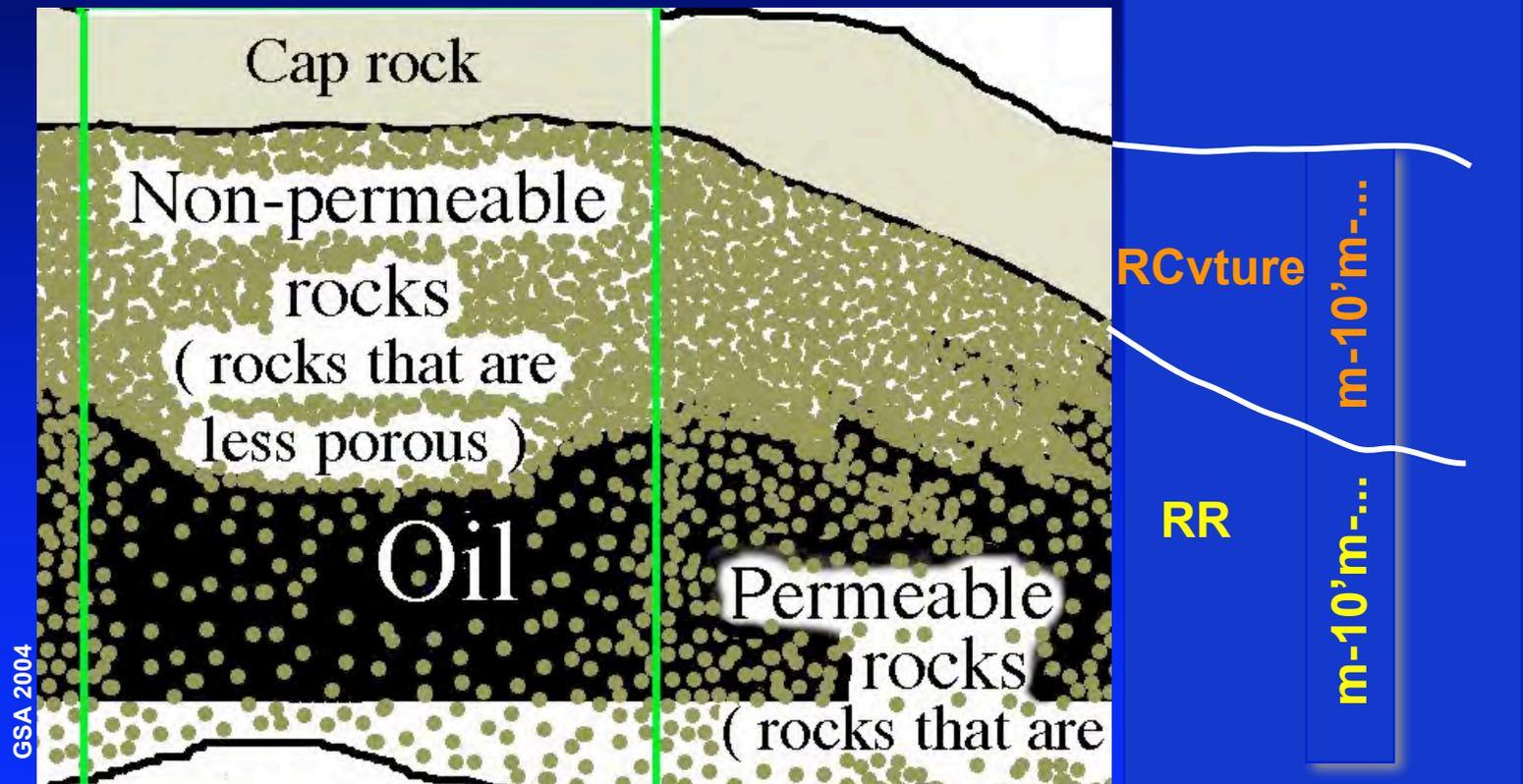
L'huile DOIT 'passer' entre les 'grains' ET l'eau qui les entoure
HUILE RED vs IR et EAU RED vs IR: conditions naturelles: ± 15%

A QUOI RESSEMBLE UN RESERVOIR (RR)

PHI-K, diamètre grains de qq10'-100'μm ou >

40-50% = Carbonates (C+D)

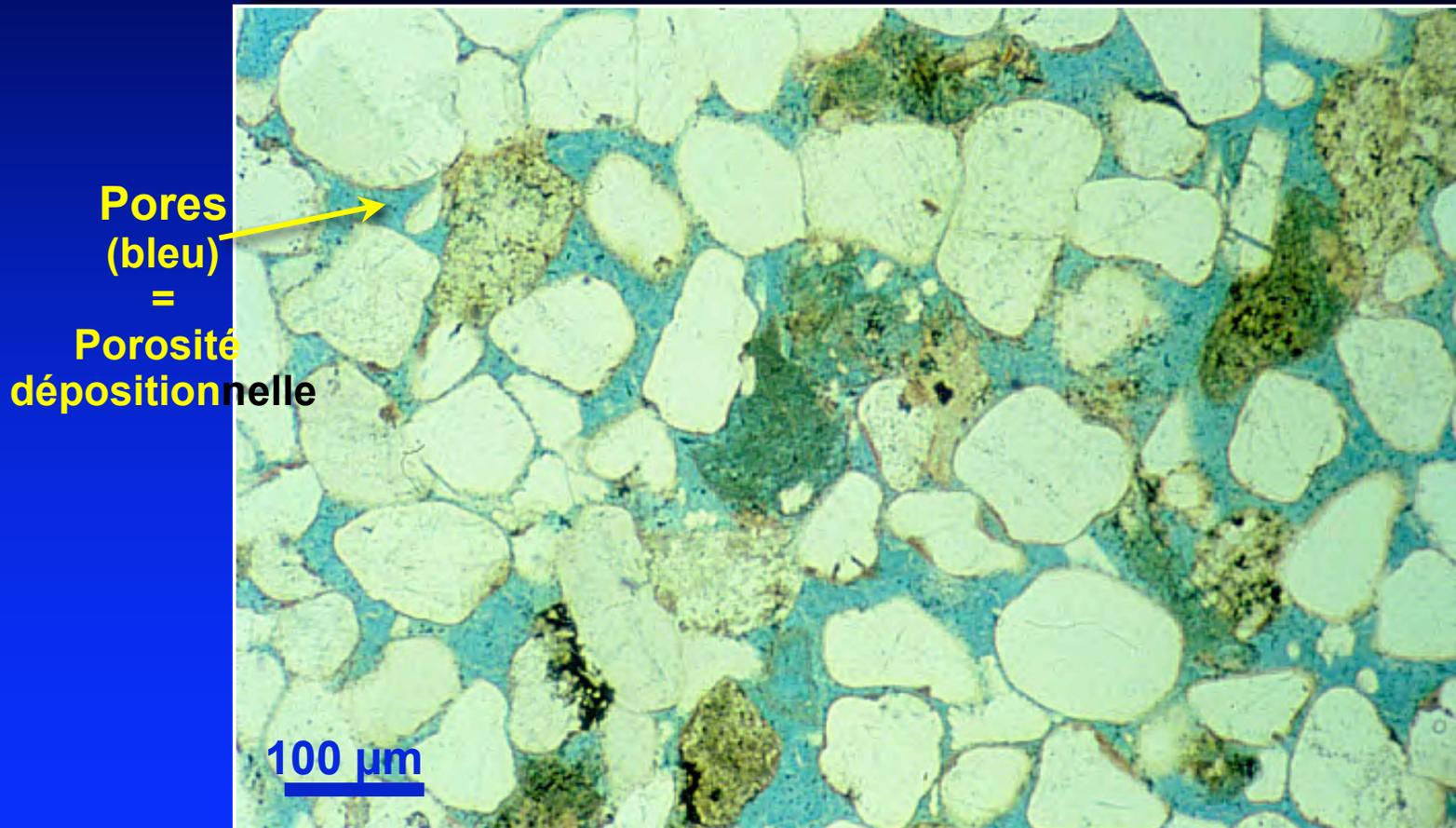
50-60% = Grès-Sables



L'huile DOIT 'passer' entre les 'grains' ET l'eau qui les entoure
HUILE RED vs IR et EAU RED vs IR: conditions naturelles: ± 15%

Réservoir Gréseux (= Sandstone)

Bonne Porosité = Beaucoup d'Espace pour le Pétrole



Injection Résines
Solutions $Ba^{2+}+RX$
Analyse Image
Plugs (Purcell...)
Porosimètre
Perméamètre
Diagraphies
Tomographie

Porosité (10-30%) - Perméabilité - Saturation Eau-Oil-Gaz - Saturation irréductible etc.

Réservoir 'Sandstone'

Ciment Intergranulaire Réduit la Qualité

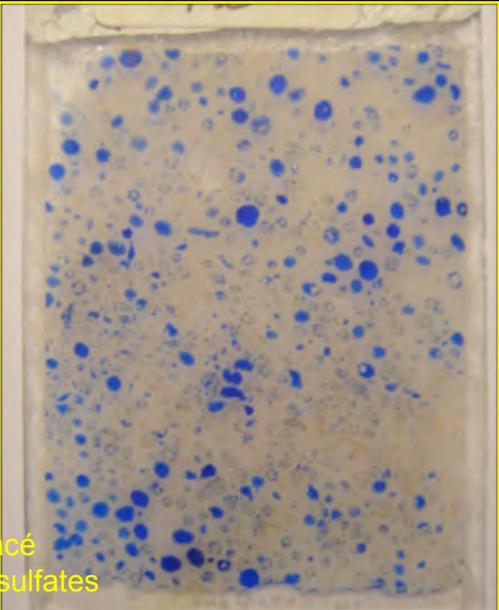


= Moins d'Espace pour le Pétrole

==> Classification des porosités....

RR = hétérogène (diagenèse) = combinaison de porosités

CRETACE

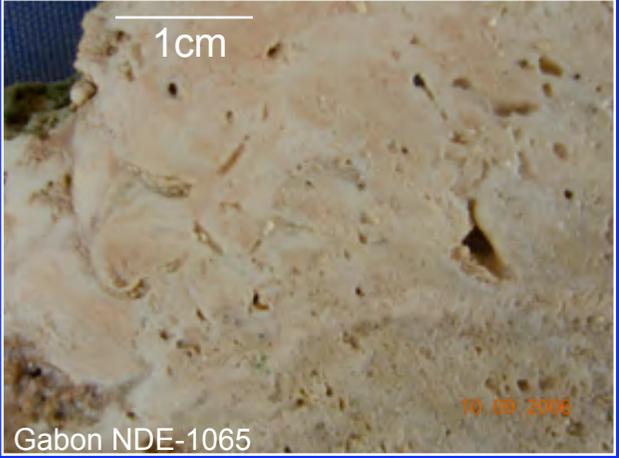


Angola - Crétacé
Oolites-oncolites+sulfates

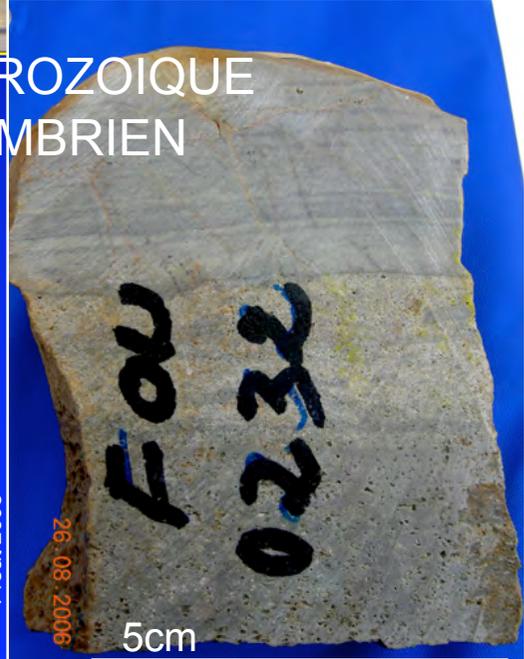


Gabon-FOU-232

NEOPROTEROZOIQUE = PRECAMBRIEN



Gabon NDE-1065

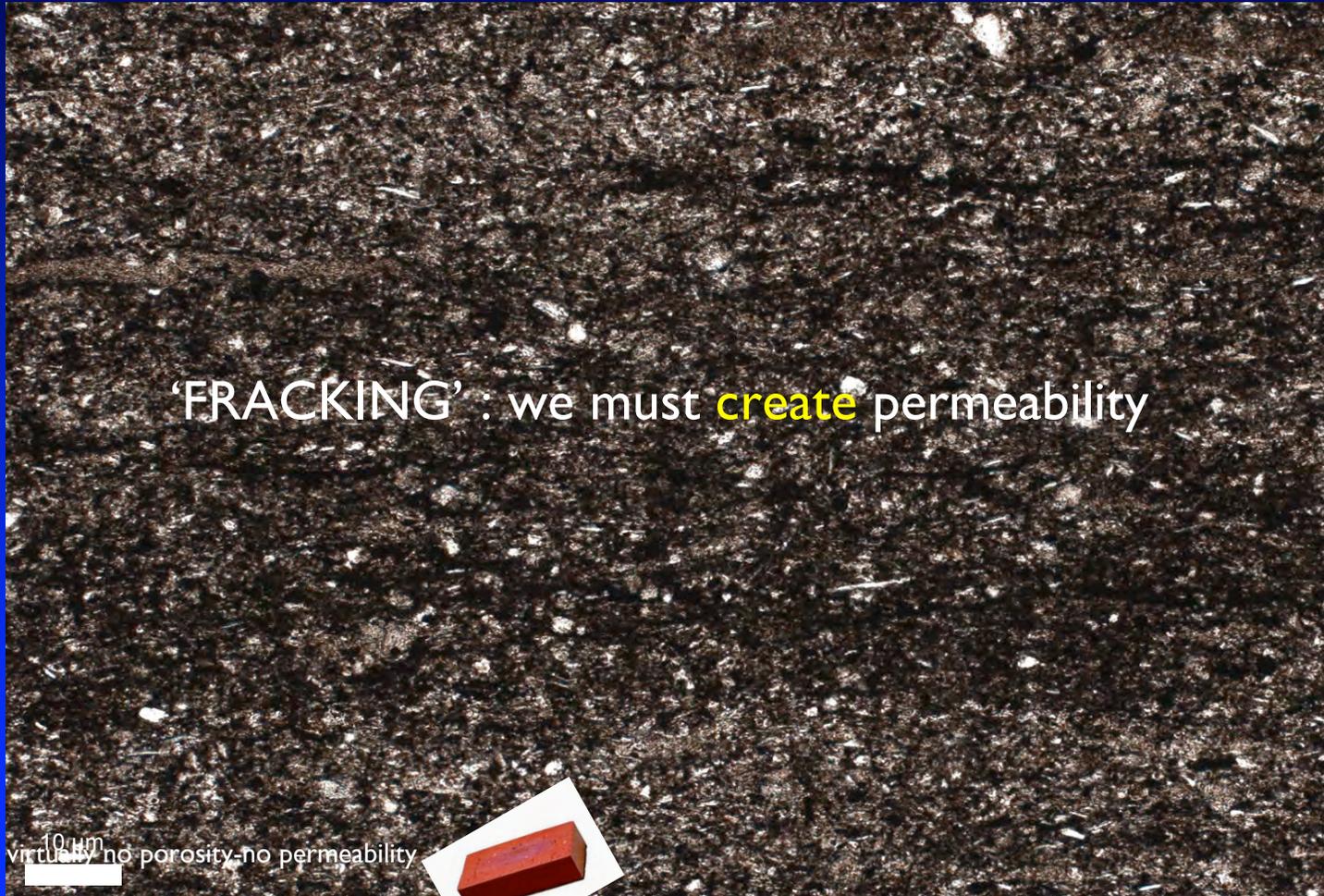


Préat 2008



Unconventional Reservoir Shale

< 1 μ m - <62 μ m : clay, mud, silt



Forage



Trépan
Rock Bit



Fragments de roche
Cuttings (mm-cm)

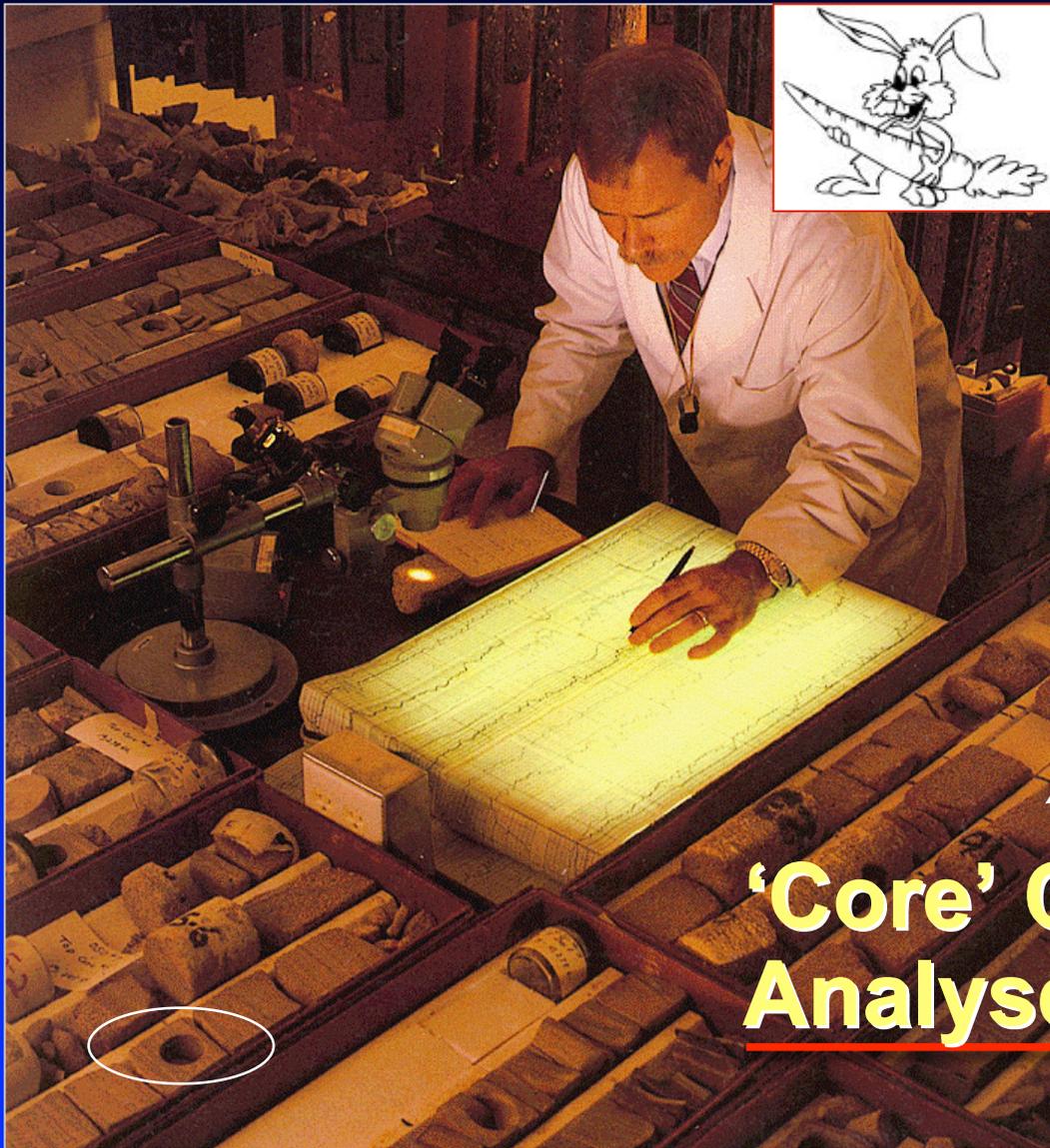


Carottier (diamant)
Core (Diamond) Bit



Carotte
Core





plug

Lithologie

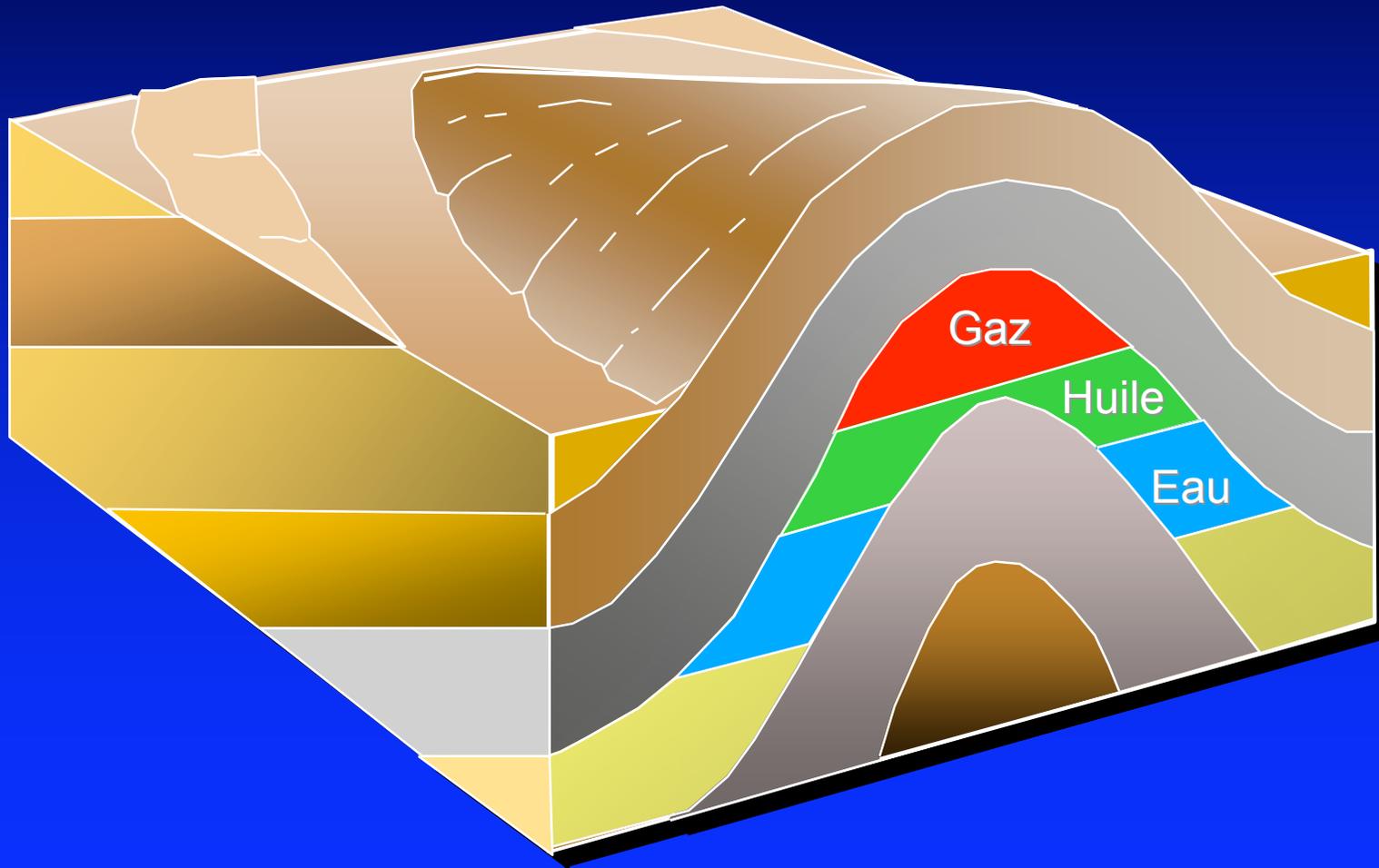
...

Phi-K...

'Core' Calibration pour Analyse Pétrophysique

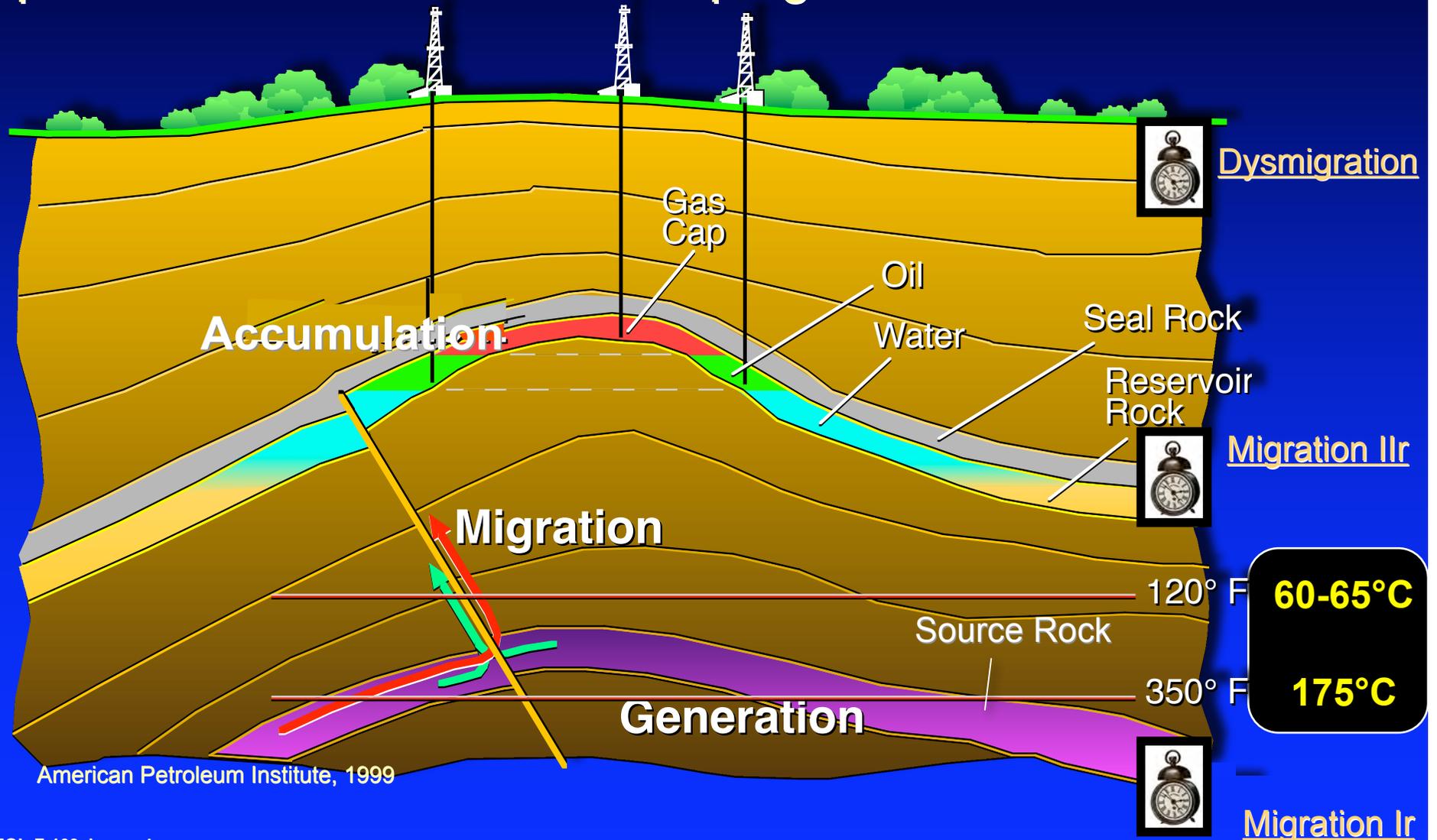
Mobil

Théorie de l' Anticlinal



Processus dans Systèmes Pétroliers

Le pétrole s'accumule dans des pièges structuraux fermés



Types de Pièges à HC

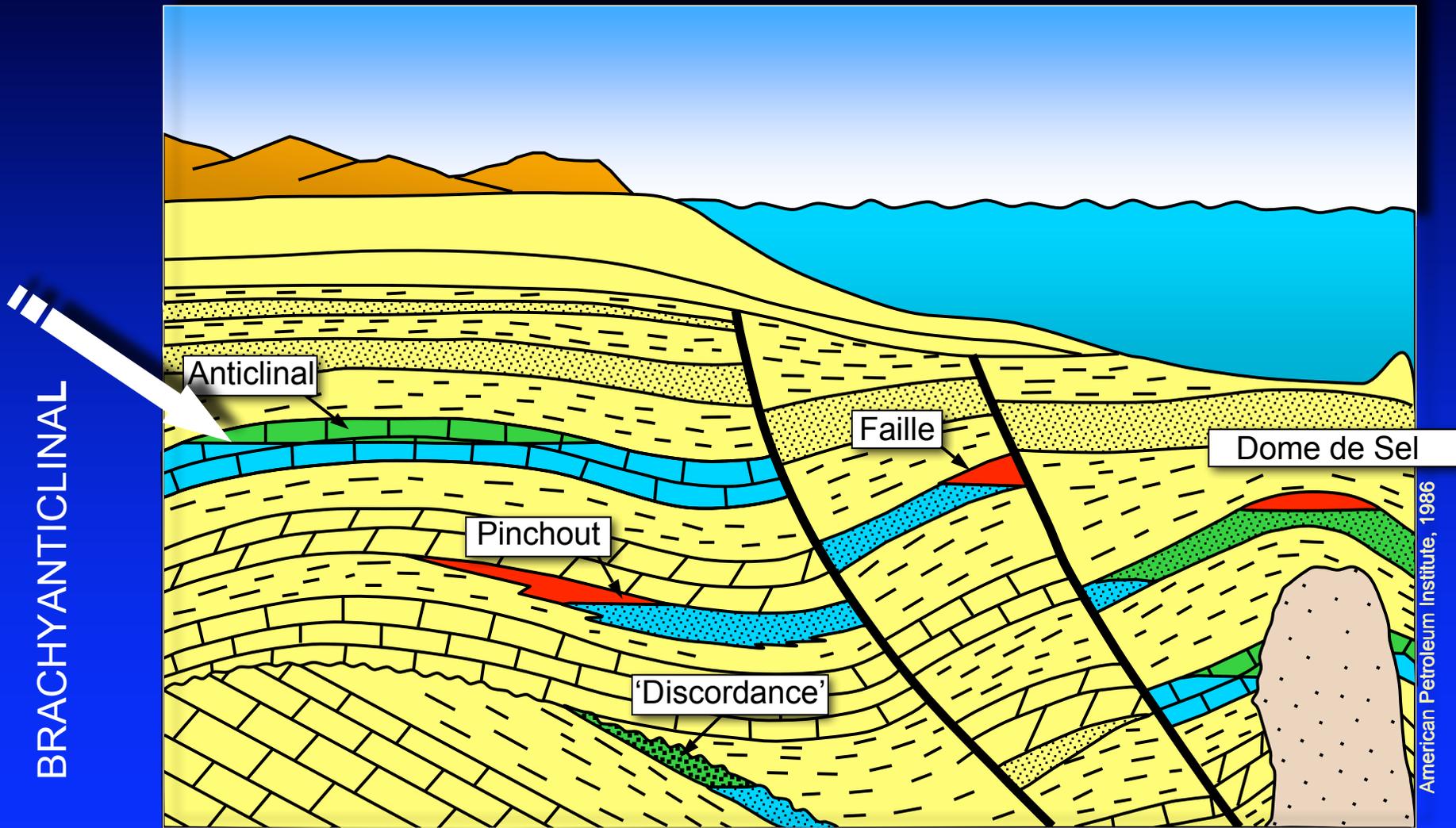
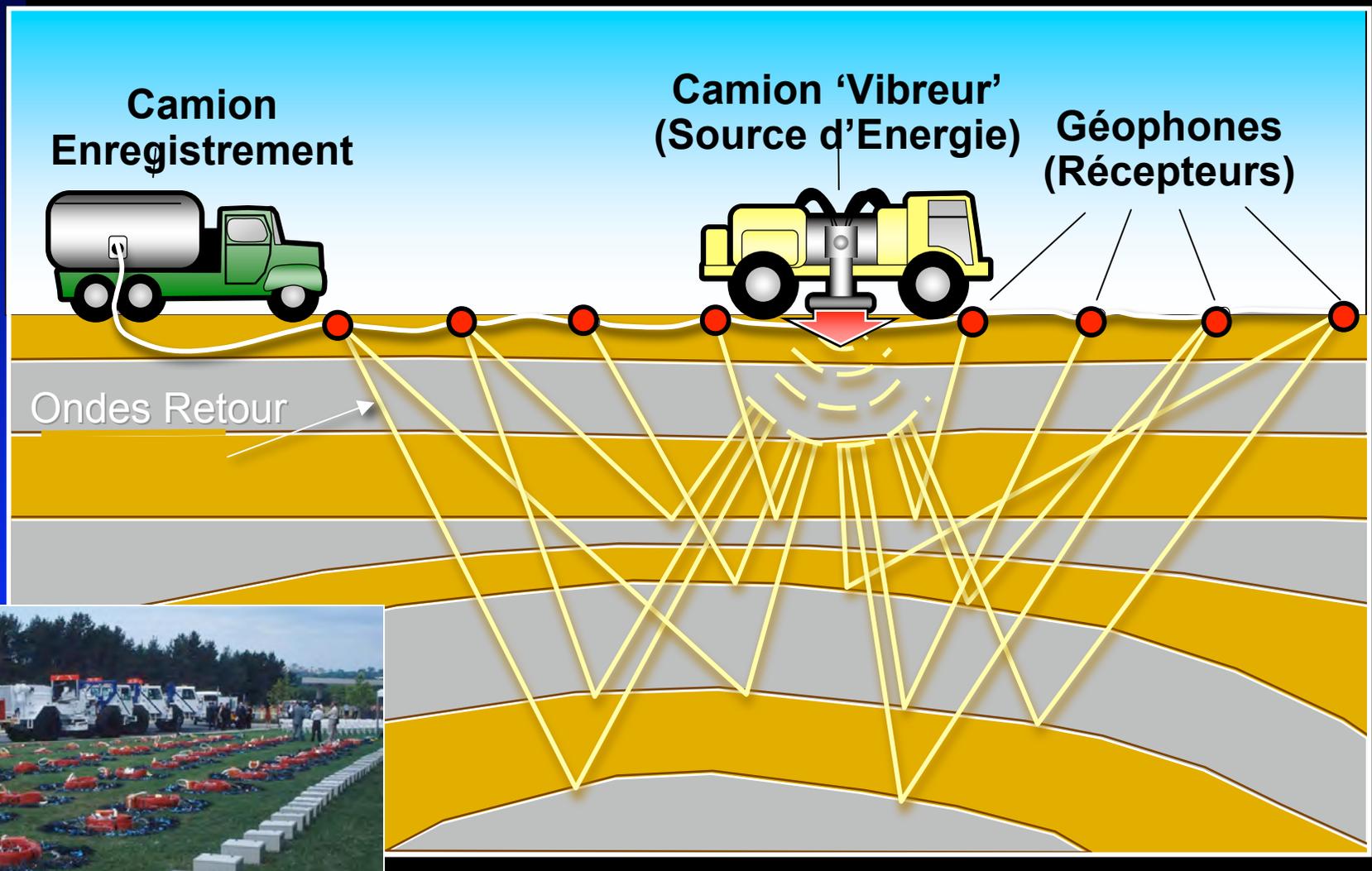


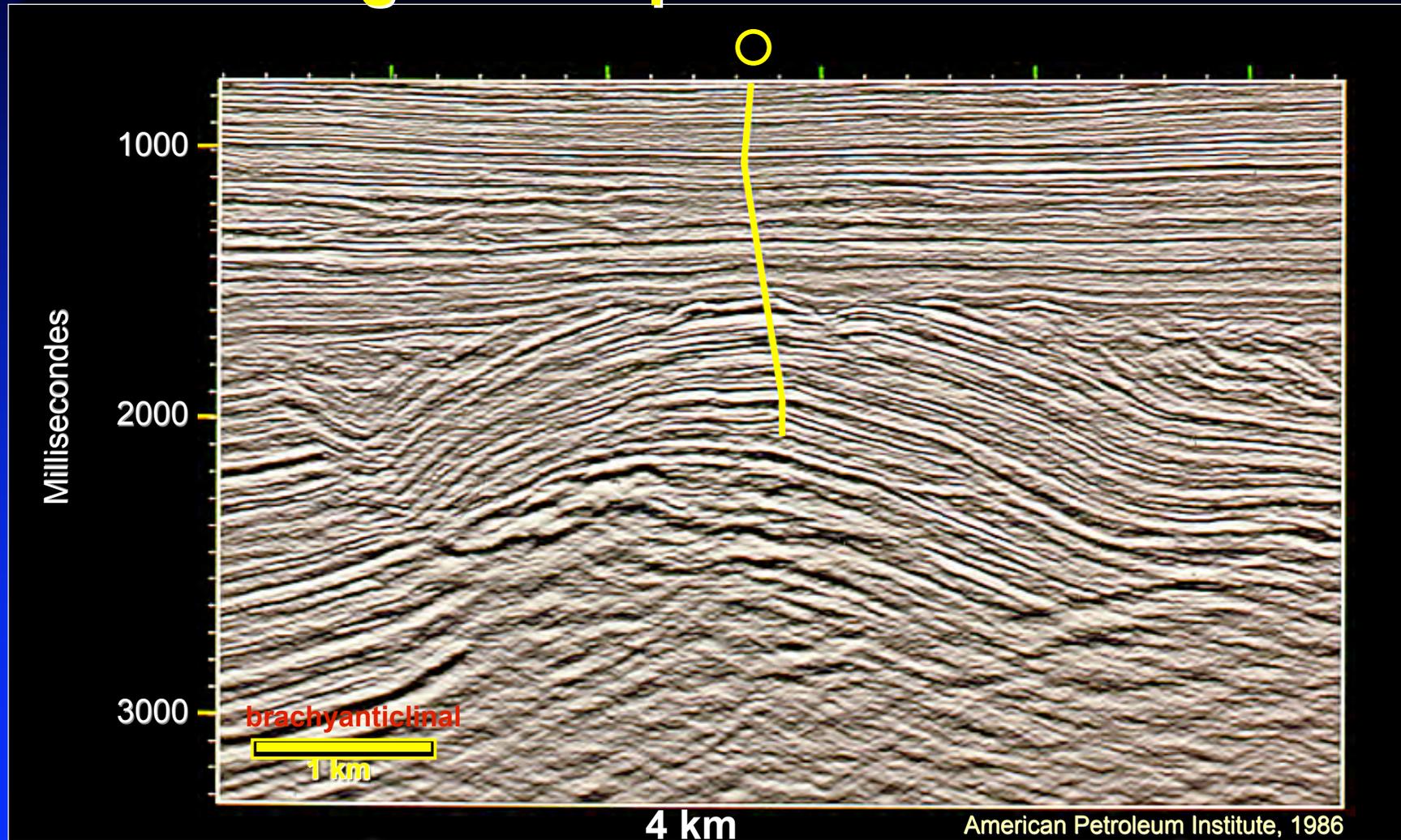
Image Sismique d'un Anticlinal

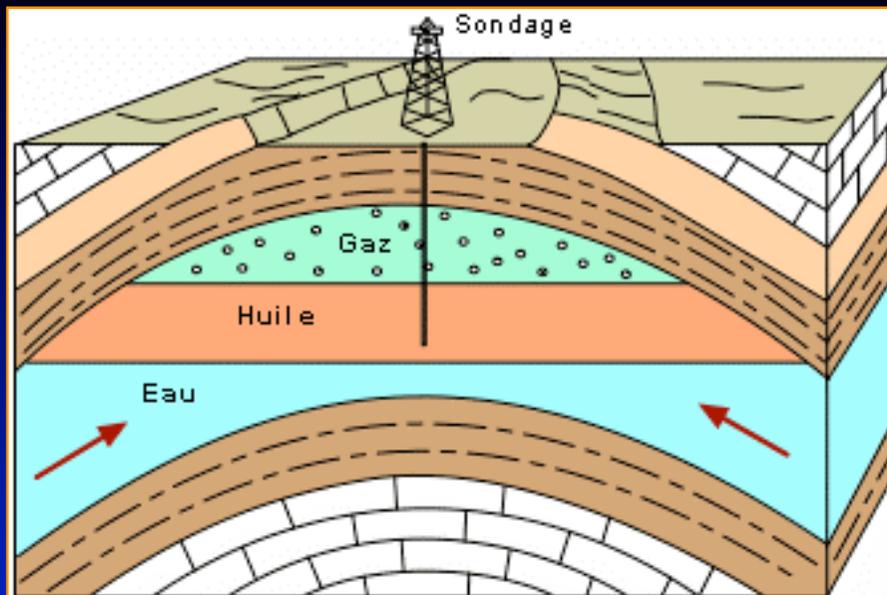


American Petroleum Institute, 1986

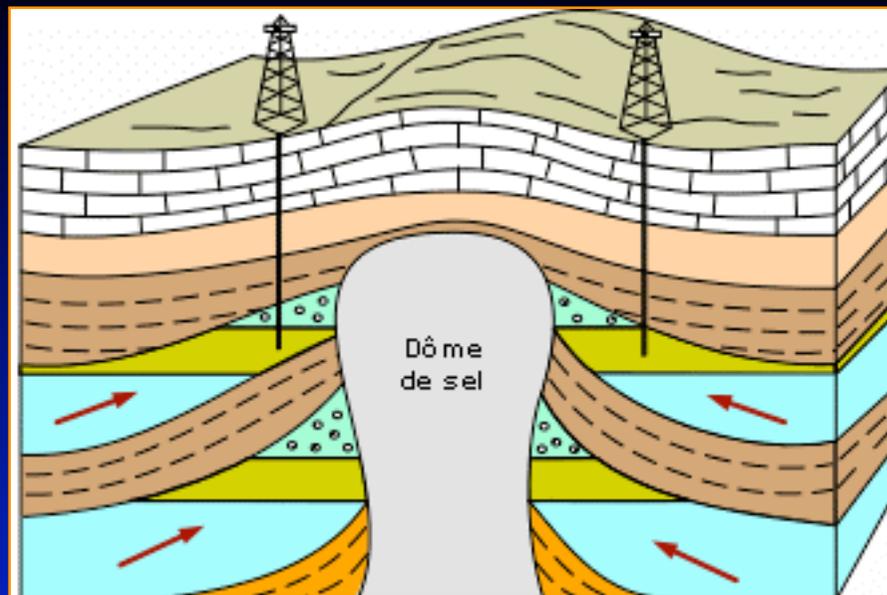


Image Sismique d'un Anticlinal

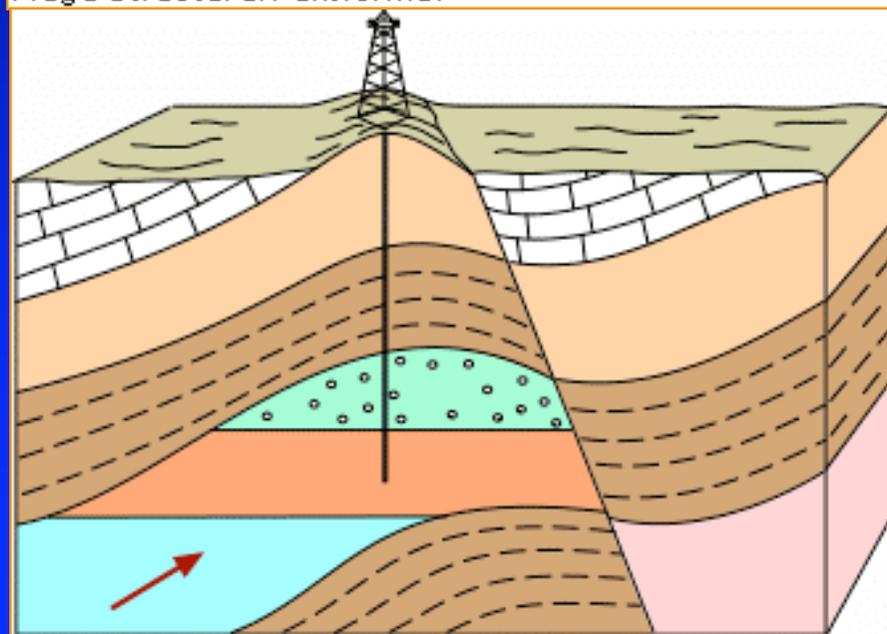




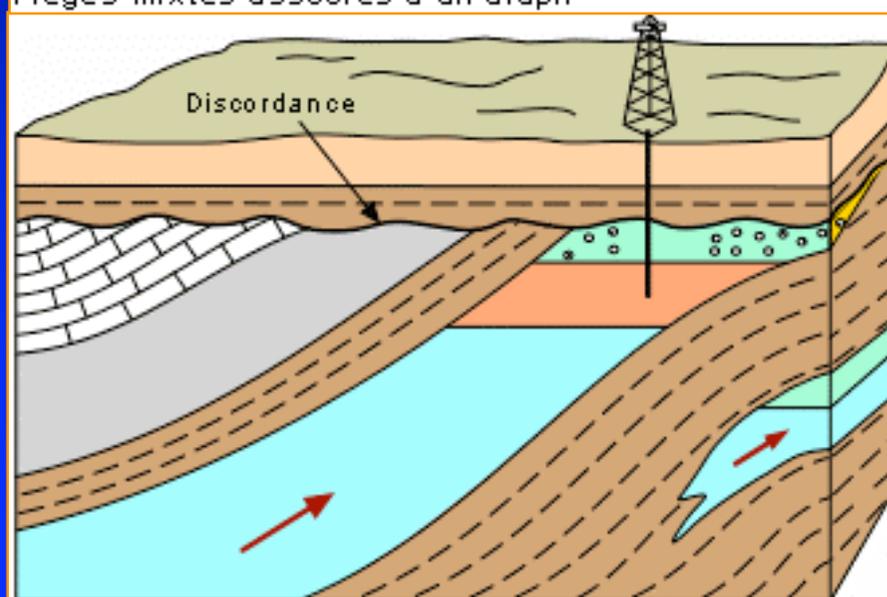
Piège structural: anticlinal



Pièges mixtes associés à un diapir



Piège structural: faille



Pièges stratigraphiques:
discordance et biseau sédimentaire

Pièges

> 75%

- **Anticlinal** couches plissées en 'dôme'

< 25%

- **Stratigraphique** variation de qualité (de bons réservoirs à mauvais réservoirs) suite aux changements latéraux de faciès, ou à la diagenèse, ou à l'érosion ('discordance'), ou à la géométrie ('pinch-out')
- **Failles** 'empruntées' lors de la migration secondaire (syn- postsédimentaire ...)

Systeme Pétrolier : Le 'Timing' est Critique

Processus des Systemes Pétroliers

- *P, T suffisantes* pour transformer matière organique en HC
- *Migration* de la R Sce à la RR (migration secondaire)
- *Accumulation* La migration-accumulation doit être plus rapide que les 'fuites' (= 'dysmigrations') du piège
- *Préservation* Les hydrocarbures restent dans le réservoir et ne sont pas altérés par biodégradation ou le "water-washing"
- **'Timing'** Le piège se forme avant et pendant la migration des HC



Gisements d'huile et de gaz (échelle mondiale)

= bassins sédimentaires de bordure de plaques (ou anciennes bordures)

ONSHORE



Jusqu'à 2004 : 130 Gt produits ($\pm 15\%$ de la ressource, le reste non exploré, non développé)

WORLD ATLAS OF OIL AND GAS BASINS



LI GUOYU
2011

WILEY-BLACKWELL

World oil production forecast from 2001 to 3000 [Réserves 2004]

Period	Total number of years	Average oil production per annum (million)	Oil production of each period (billion)
2001–2100	100	3400	340
2101–2200	100	2000	200
2201–2300	100	1500	150
2301–2400	100	1000	100
2401–2500	100	500	50
2501–3000	500	300	150
Total			990

entre 811 et 1112 Gt

Continents	Sedimentary basins	Marine basins (deep marine)	Oil and gas basins (marine)	Major oil and gas basins
Asia	375	136 (35)	86 (29)	24
Africa	95	42 (9)	25 (11)	3
Europe	84	50 (11)	39 (17)	13
Oceania	86	63 (12)	15 (9)	4
Latin America	123	72 (12)	45 (20)	11
North America	190	73 (20)	46 (9)	25
Antarctica	21	15 (9)	—	—
World Total	974	451 (108)	256 (95)	80

[± 100 millions de km² [2/3 onshore, 1/3 offshore)]

2011: il n'y a que 203 sur 707 bassins pétroliers explorés à grande échelle!

En 2008 seules 12 régions pétrolières sur 90 ont un rôle important
Elles produisaient > 100 millions de tonnes/an

1. Russie, 2. Arabie S, 3. USA, 4. Iran, 5. Chine, 6. Mexique, 7. Canada, 8. EAU, 9. Irak, 10. Venezuela, 11. Koweït, 12. Norvège

**Classification of 90 oil producers in the world in 2007
(by production)**

	Continents						Total
	Asia	Europe	Africa	South America	North America	Pacific region	
Total number of countries	48	45	56	13	23	14	199
Oil producers	31	23	17	9	7	3	90
>100 million (t)	6	2	1	1	3	—	13
50–100 million	—	1	3	1	—	—	5
30–50 million	6	1	1	1	—	—	9
10–30 million	5	1	4	2	—	1	13
5–10 million	4	1	1	1	1	—	7
1–5 million	4	7	6	1	1	2	22
0.1–1 million	4	8	1	2	1	—	16
<0.1 million	2	3	6	—	1	—	12

World Atlas of Oil And Gas Basins, First Edition. Li Guoyu.

© 2011 John Wiley & Sons, Ltd. Published 2011 by John Wiley & Sons, Ltd.

Oil production per well per day in typical countries in 2007

Oil production grading	Countries	Oil wells	Oil production (t per well per day)
High production countries (more than 100t per well per day)	Saudi Arabia	2310	520
	Norway	964	321
	Iran	1737	313
	Kuwait	1103	279
	Mexico	3153	137
	Algeria	1790	127
	Libya	1875	123
	Vietnam	340	122
Medium production countries (10 to 100t per well per day)	Nigeria	2984	100
	Malaysia	1165	79.9
	Egypt	1850	50
	Australia	1280	44.8
	Brazil	8092	29.5
	India	4650	20
	Indonesia	7896	15.7
	Russia	131,343	10.2
Low production countries (less than 10t per well per day)	Canada	56,891	6.6
	Argentina	19,900	4.6
	China	164,900	3.0
	Peru	5145	2.7
	Romania	8695	1.5
	USA	49,980	1.4
	Total world	970,689	10.5

1 bl
=
159 litres
±
7,6bl/t

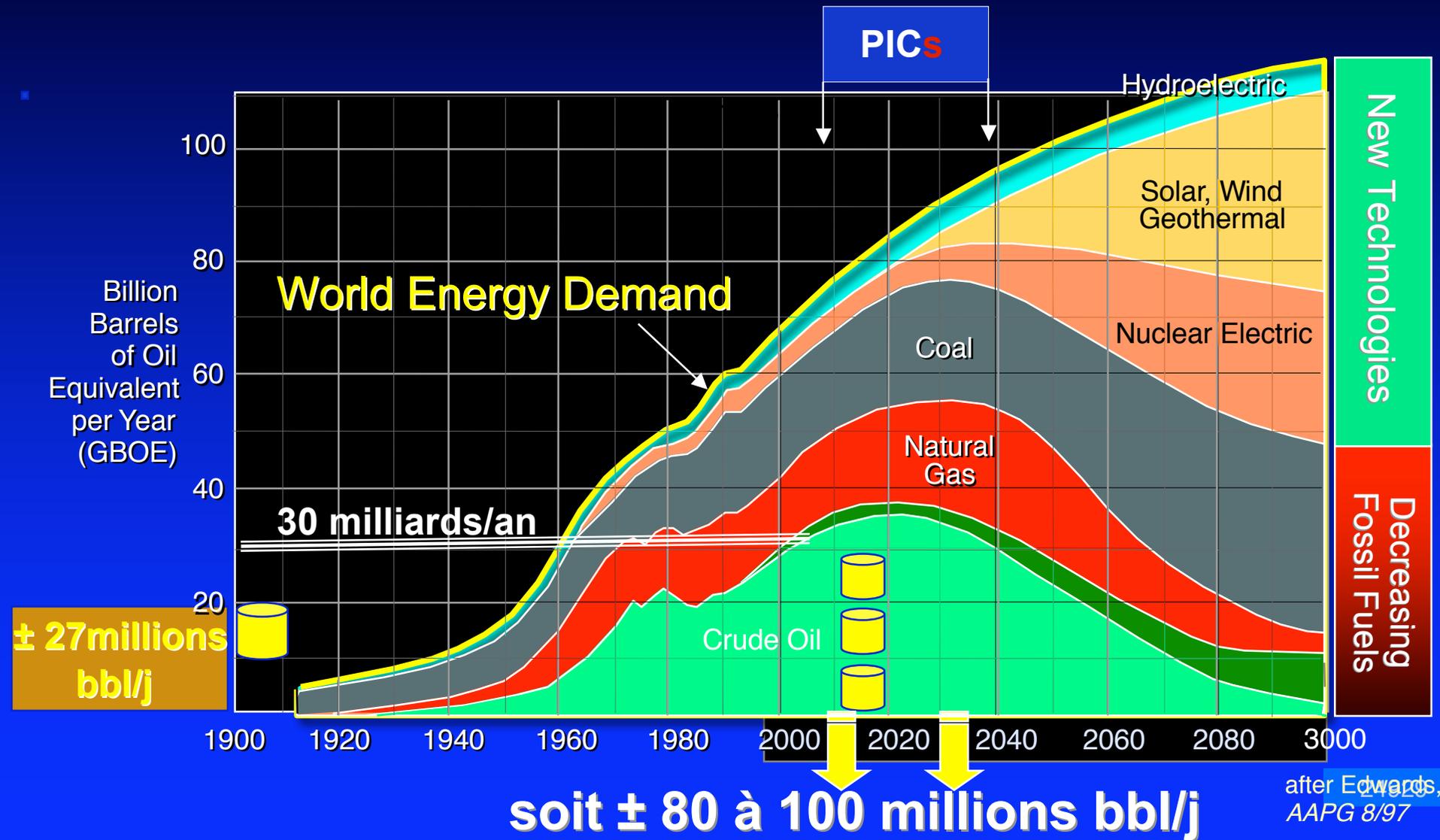
3952bl/well
=
15,6millions.bl/d

10,6bl/well
=
0,53millions.bl/d

LES RESERVES DE D'ENERGIE ... et la 'géopolitique' ...

Projected World Energy Supplies

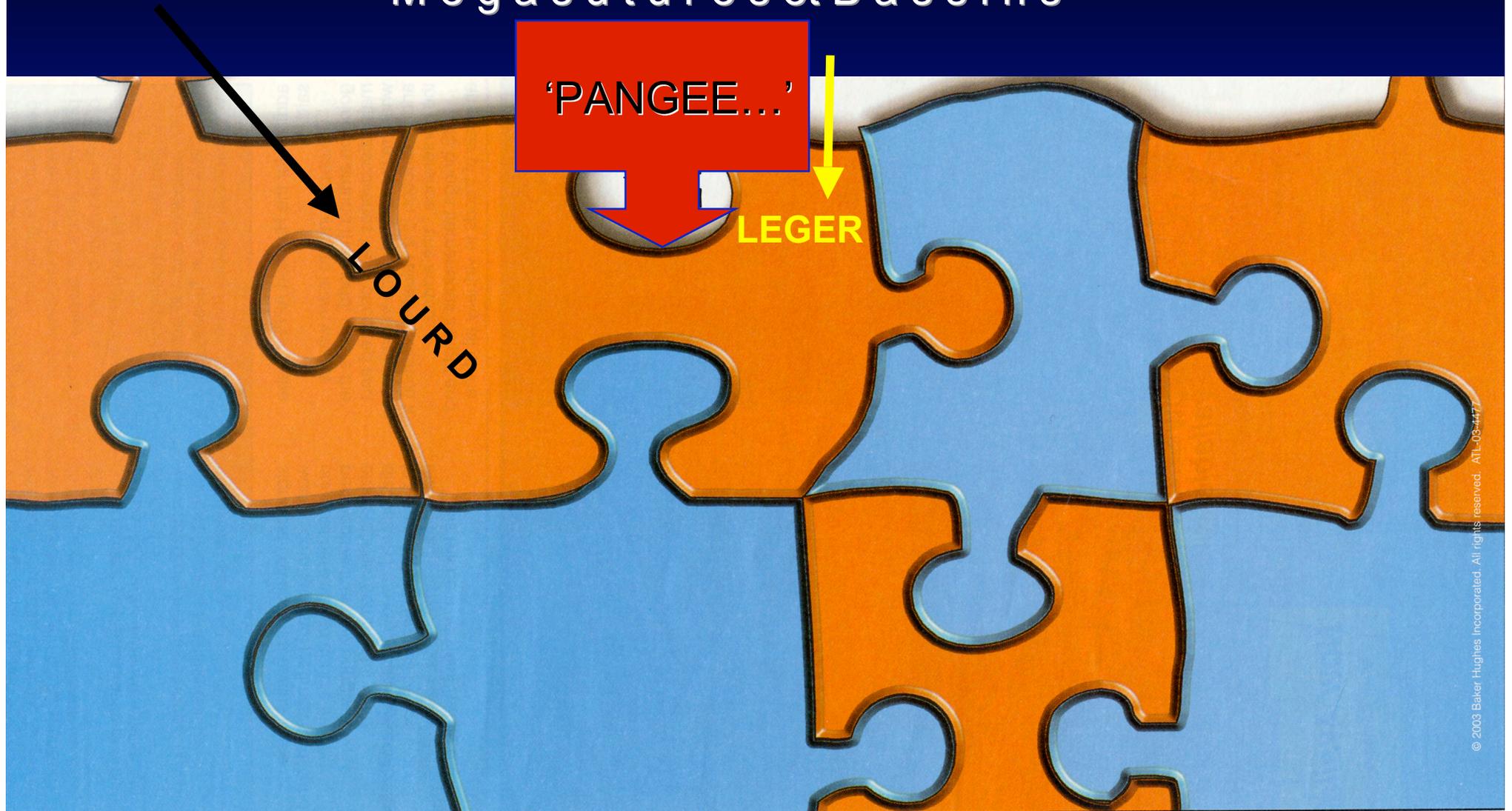
= Production



La
Terre
vue
du
Ciel
la Nuit
[2000]



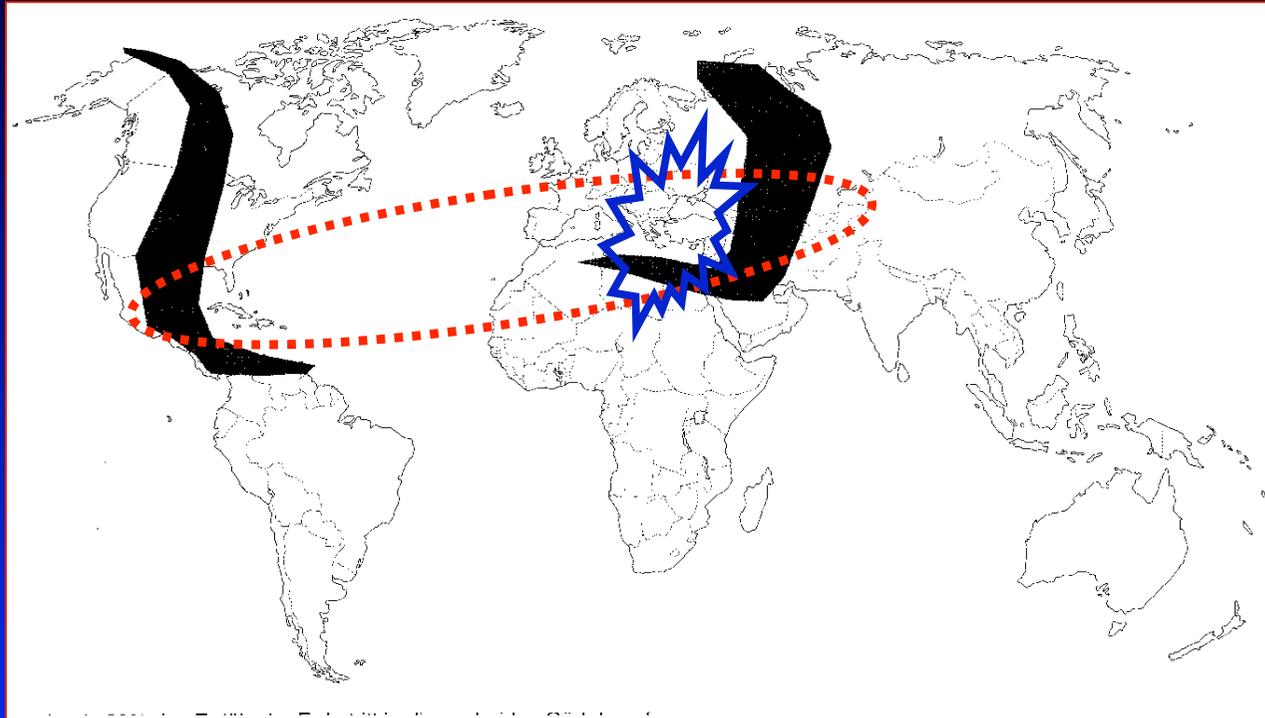
TERRE = assemblages-fragmentation (micro)plaques
Mégasutures et Bassins



© 2003 Baker Hughes Incorporated. All rights reserved. ATL-03-4477

> 80% du pétrole mondial se trouve dans ces deux ceintures

LOURD



LEGER

Source: BGR, 1995

= ouverture TETHYSIENNE lors de la fragmentation de la Pangée permo-triasique. Roches mères jurassiques et surtout crétacées... (anoxies tectono-sédimentaires)

Bassins les Plus Grands à Hydrocarbures

Potentiel Ultime



On connaît environ 70.000 accumulations de pétrole dans le monde



UN SEUL PAYS -ARABIE SAOUDITE- RENFERME $\frac{1}{4}$
UNE REGION -MOYEN ORIENT- $> \frac{1}{2}$ des réserves mondiales

Provinces *très riches*: en moyenne $> 10.000 \text{ t d'huile/km}^2$ $\pm 73.000 \text{ bbl/km}^2$
 Provinces *riches*: 1000 à 10.000 t d'huile/km²
 Provinces *pauvres*: < 1000 t d'huile/km²



+

notion d'habitat

c'est la répartition spatiale des gisements dans un bassin ou une province

Cette répartition n'est pas quelconque et obéit à la **loi de Zipf**

$$G_n/G_{n-1} = [n-1/n]K$$

G =taille d'un gisement de rang n
 et K = constante $\neq 1$

Si $K=1$, =loi log-normale: les gisements sont d'autant plus nombreux qu'ils sont petits

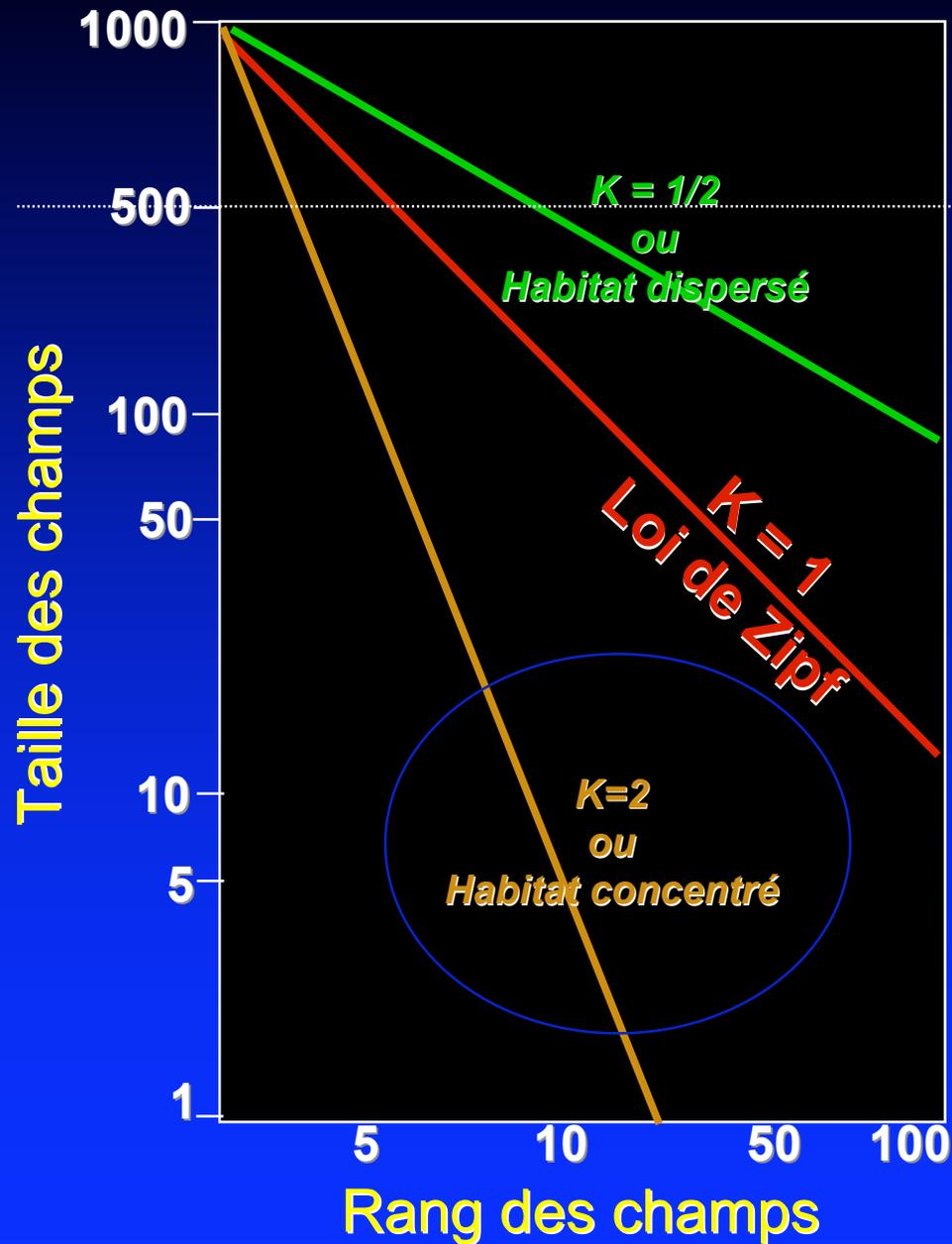
Si le premier champ a une valeur de 100,
 le 2^e équivaut à 50

Le 3^e à 33,5

Le 4^e à 25

Le 5^e à 20 etc....





Réserves dans un grand nombre de gisements

Réserves dans un petit nombre de gisements

HABITAT CONCENTRE

Habitat concentré: l'essentiel des réserves se trouve rassemblé dans un très petit nombre de gisements, ceux-ci présentent donc de très grandes différences de taille = conditions structurales et/ou stratigraphiques très contrastées...

Dans de tels bassins, le ou les 2 ou 3 plus grands champs peuvent concentrer >1/2 des réserves totales

Ex:

- le Sahara algérien où le premier champ Hassi Messaoud cumule près de 80 % du total de l'huile et Hassi R'Mel >1/3 des réserves de gaz

- ...

On connaît environ 70.000 accumulations de pétrole dans le monde



**<1% = 400 accumulations
renferment 3/4 des réserves mondiales**



les 5 + grandes de ces accumulations [dont 4 au Moyen-Orient]
renferment 1/3 du total



X5

**CHAMPS GEANTS
>70Mt = >500 M bbl**

1

**CHAMPS MAJEURS
>14Mt = >100 M bbl**

X20

**CHAMPS SUPER-GEANTS
>10 G bbl**

X100

PETROLE c

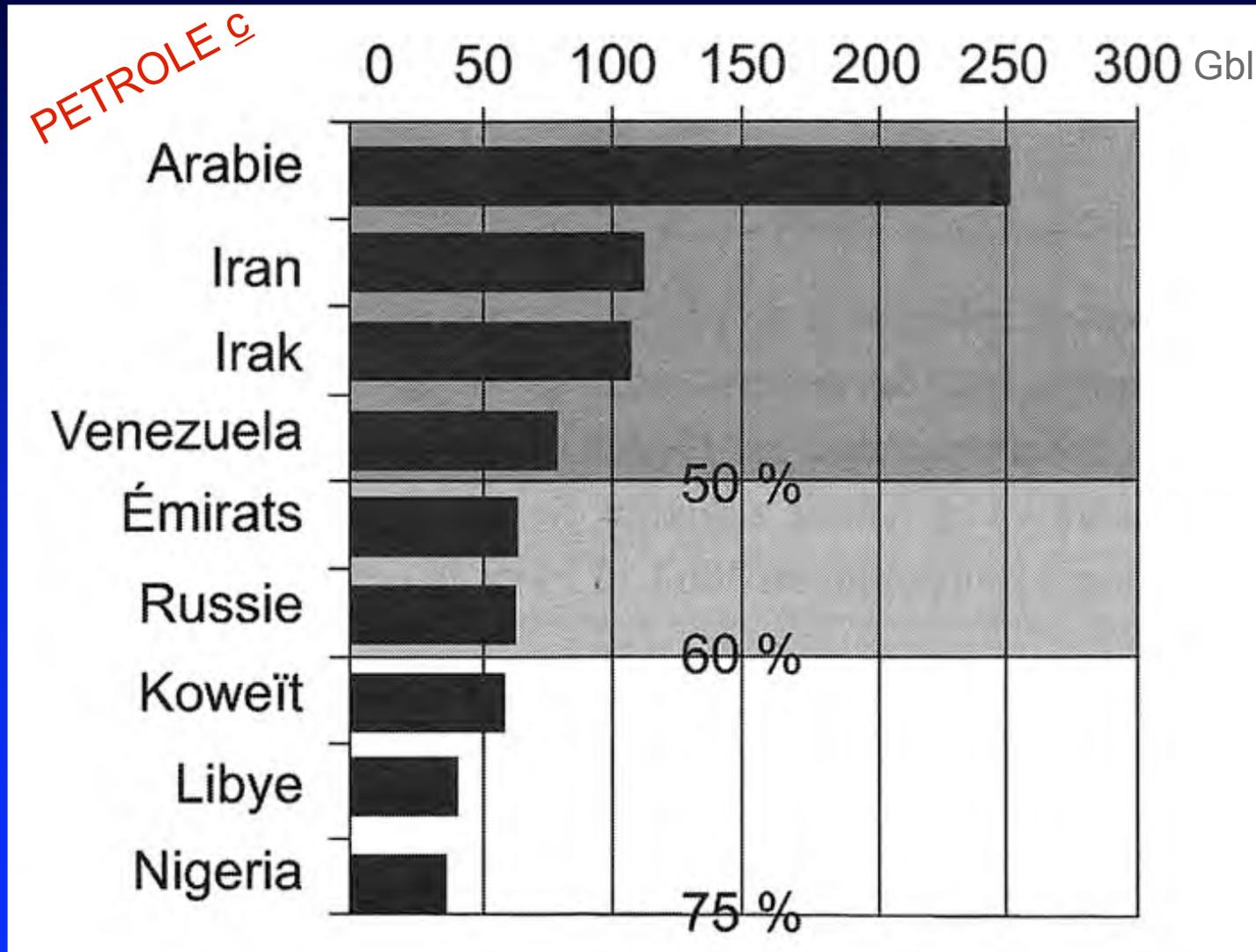
Réserves Prouvées
2012 (BP)
[±5%?]

Rés Prouvées	Oil Gbl	%	Gas %
Arabie Saoudite	265,9	15,9	4,4
Canada	173,9	10,4	1,1
Iran	157,0	9,4	18,0
Irak	150,0	9,0	1,9
Koweït	101,5	6,1	1,0
Emirats Ar Unis	97,8	5,9	3,3
Venezuela	297,6*	17,8	3,0
Russie	87,2	5,2	17,6
Libye	48,0	2,9	0,8

Rés Prouvées	Oil Gbl	%	Gas %
Nigeria	37,2	2,9	2,8
USA	35,0	2,1	4,5
Chine	17,3	1,0	1,7
Mexique	11,4	0,7	0,2
Norvège	7,5	0,4	1,1
Algérie	12,2	0,7	2,4
Qatar	23,9	1,4	13,4
Australie	3,9	0,2	2,0
Indonésie	3,7	0,2	1,6

<http://www.bp.com/>

Les neuf pays possédant 75% des réserves prouvées



Mathieu IFP in Durand 2009

Il s'agit de pays -----?

PETROLE c

Evolution des réserves de 1980 à 2005 en %

Rés Prouvées	Oil Gb	%
Arabie Saoudite	267,9	57
Canada	<u>c</u>	90
Iran	128,7	136
Irak	117,7	283
Koweït	101,3	49
Emirats Ar Unis	100,1	222
Venezuela	79,6	308
Russie	61,4	26,7
USA	23,2	-20
etc...		
MONDE	1200,7	79%

Furfari 2007

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

CONSOMMATION MONDIALE ENERGIE PRIMAIRE EN 2012 : + 1,8 % ('forte diminution) = 12477 Gtep

Pétrole: +0.9 %

dont -1,3 % OCDE (6è diminution sur les 7 dernières années et production de +1mmb/d aux USA, soit la plus forte augmentation mondiale)

Gaz naturel : +2.2 %

consommation US = 4.1 %, la plus forte augmentation mondiale [shale gas...]

Charbon : +2.5%

>50% = la Chine [50.2%]



+0.9%

BP 2013



+2.2%



+2.5%

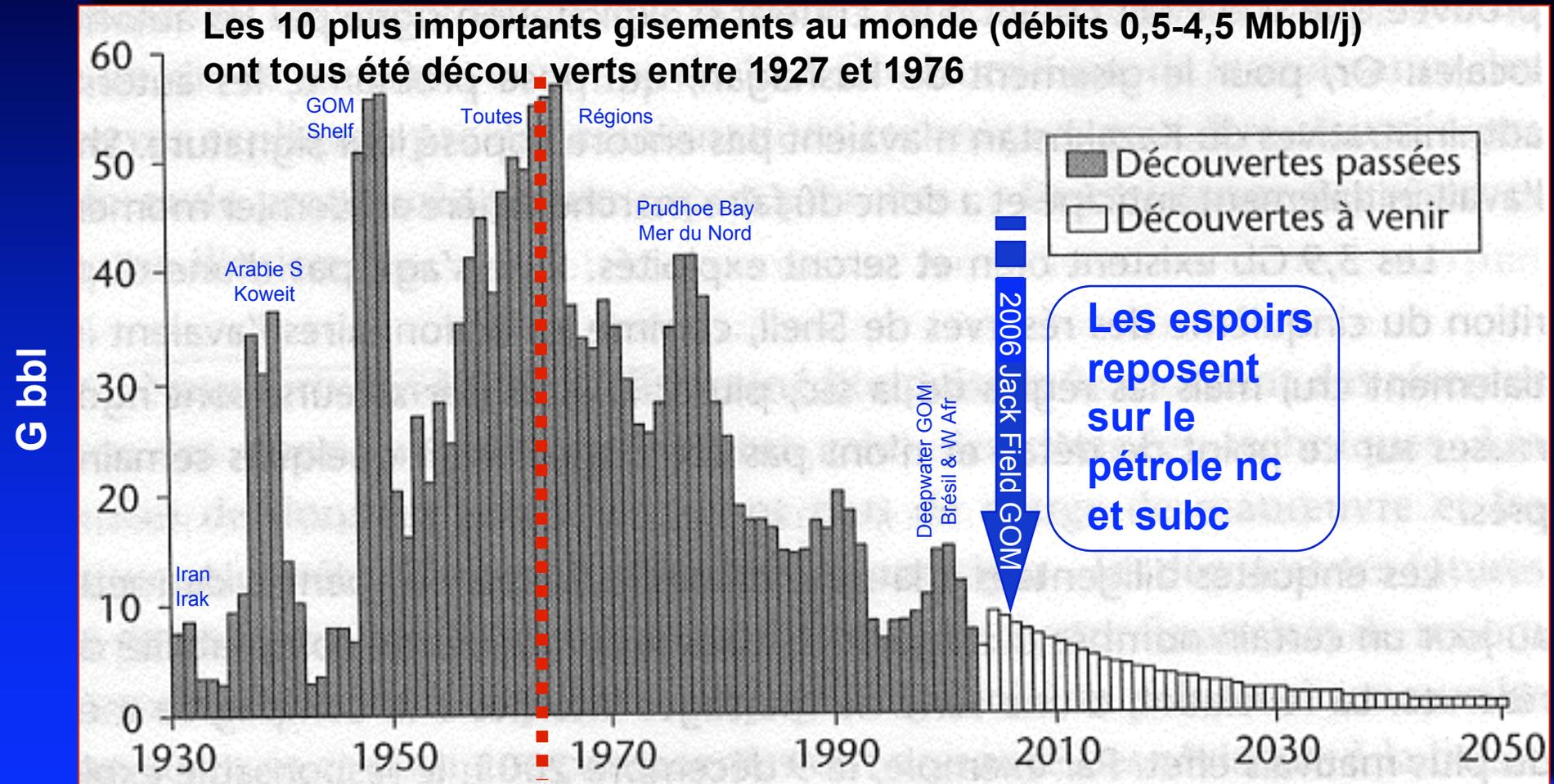
L'augmentation de la consommation mondiale d'E primaire est due à 90% à la Chine et l'Inde

DECOUVERTES MONDIALES DE PETROLE

Les découvertes mondiales ont atteint leur sommet en 1965

Aux USA pic découverte en 1930' => bbl < 40 cents ET < eau potable

Les 10 plus importants gisements au monde (débits 0,5-4,5 Mbbbl/j) ont tous été découverts entre 1927 et 1976



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

1965

En 2005: 116 champs produisaient > 100 000 bbl/j

LA PROBABILITE DE TROUVER DES CHAMPS PETROLIERS

SUPER-GEANTS SEMBLE SE REDUIRE !

Rappel: aujourd'hui = 50 super-géants > 10 G bbl
soit 0,1 % des champs représentant 40 % réserves 'prouvées' mondiales

HISTORIQUE... et prospective?

26 super-géants découverts entre 1950-1970
4 super-géants découverts entre 1980-2000

Géants: 30 découverts dans les années 80'
30 également dans les années 90'
dont 7 par > 1000 m d'eau (Angola...)
dont 2 = Caspienne Kazakhstan
[Tenguiz+Kahshogan 2000, 10 G bbl?]



Pessimisme



Optimisme...

...+ Jack Field GOM -2006

Les plus grands champs de pétrole 2003 sont surtout en Arabie S

ARABIE SAOUDITE	
Abqaiq Field	12 G bbl
Berri Field	12
Faroozan-Marjan Field	10
GHAWAR Field	75-83
Manifa Field	11
Safaniya-Khafi Field, Neutral Zone	30

Arabie Saoudite:

Premier puits découvert = 4 mars 1938 Damman Field (Well n°7)

Réserves de brut: 261.542 G bbl [26 % des réserves mondiales]

Production de brut: capacité de 10,5 mmbo/d

Production fixée: jusqu'à 8,5 mmbo/d [\pm 15X cons./j Belgique]

Qualité du Brut: 5 types

(Arabian Heavy/Medium/Light/Extra Light/Super Light)

Nombre de Champs (Fields) 87 dont 13 de gaz

Finalement une vingtaine de champs fournissent 1/3 de la **PRODUCTION**

- en 1997: 22 champs produisaient 30% des 76 millions bbl/j
 - appartiennent tous au Moyen-Orient, tous ces champs furent découverts avant 1966 càd entre les années 20' et 50'

...

- \pm situation identique en 2001: 22 champs ont produit 30%...
 - Iran, Irak, Koweit, Arabie Saoudite, Venezuela, Etats Arabes Unis et **10% de la production mondiale provenait de 4 champs seulement dont:**
 - GHAWAR (Arabie S.): 4,5 mmbod/d**
 - CANTARELL (Mexique): 1,2**
 - BURGAN (Koweit): 1,2**
 - DAQING (Chine): 1,2**
 - total: 8 millions de bbl/j [mmbod/d]***

Les Provinces, Champs, Gisements, Accumulations sont ensuite classés en fonction de différents critères géologiques

- bassins sédimentaires vs tectonique des plaques (limites...)
- âges géologiques
- R Sce, RR et R Couverture [= 'Cap Rocks']
- etc....

Un historique complet pour chaque gisement est établi y compris avec les données de production

prenons un exemple...

... celui du champ de GHAWAR, n°1 MONDIAL

champ de GHAWAR, n°1 MONDIAL ONSHORE

Découvert en 1948, à 200 km à l'Est de Ryad

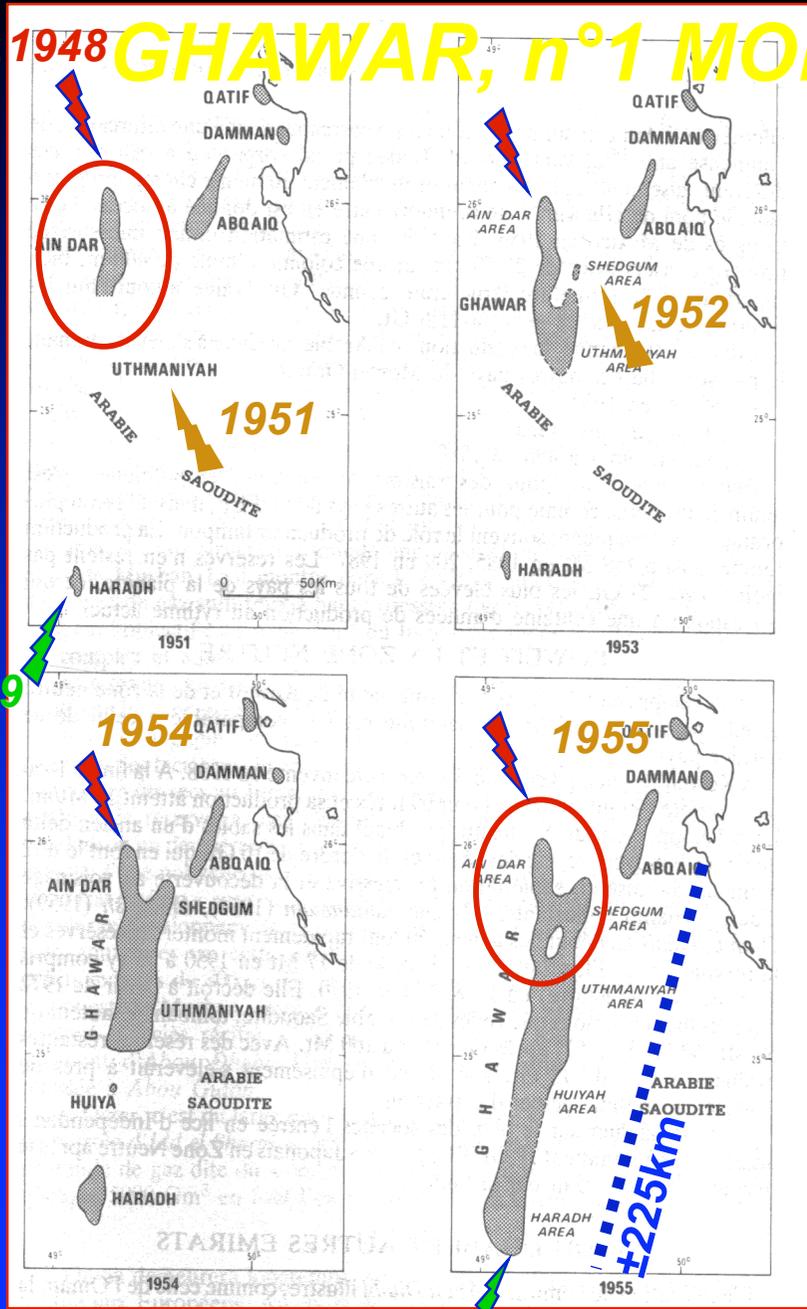
Il contient à lui seul > pétrole que les réserves USA-'URSS'

Profondeur RR: 2270 m, anticlinal 'pressenti dès 1935',

foré en 1948 à Ain Dar [car anomalie gravimétrique]

Colonne d'huile: 430 m dans l'ARAB ZONE

champ de 1948 GHAWAR, n°1 MONDIAL



Février 1949



Perrodon, 1985

En 1956
 Première carte
 Surface prouvée:
 2250km²
 Colonne d'huile: 430 m
 Réserves initiales: 11,6Gt
 Réserves 2003: 75-83 Gt

On a déjà consommé 1200 Gbl (août 2013)

1 janvier 2014 : 1280 Gbl

**Il resterait 41 ans de réserves 1P
[=1280 Gbl/30Gbl]**

BP 2015



**première
conclusion**

41+21

Pétrole conventionnel



-
+
+
+
+
+
+

*si consommation > de 30Gbl/an
si découverte nouvelle
si taux de récupération meilleur
si on ne tient pas compte
du charbon
des schistes bitumineux
des sables asphaltiques
si ... technologie (4D, ultraprofond...)*

2014: 690 Gbl 2P3P = encore 21ans...

**première
conclusion**

50+43

GAZ conventionnel



1 janvier 2014 : 162,6Tm³

**Il resterait 50 ans de réserves 1P
[=162,6Tm³/3,3Tm³]**

BP 2015



-
+
+
+
+
+
+

*si consommation > de 30Gbl/an
si découverte nouvelle
si taux de récupération meilleur
si on ne tient pas compte
du charbon
des schistes bitumineux
des sables asphaltiques
si ... technologie (4D, ultraprofond...)*

2014: 150,4Tm³ 2P3P = encore 43ans...

**première
conclusion**

113+...

Charbon



1 janvier 2014 : 425 Gtep

Il resterait 113 ans de réserves 1P

[= 425 Gtep/3,8Gtep]

= 32ans de consommation E totale



-
+
+
+
+
+
+

si consommation > de 30Gbl/an

si découverte nouvelle

si taux de récupération meilleur

si on ne tient pas compte

du charbon

des schistes bitumineux

des sables asphaltiques

si ... technologie (4D, ultraprofond...)

2014: 9275 2P3P

= 32ans de consommation E totale



**1 janvier 2014 : 815 Gtep 1P
= 75 ans de consommation**



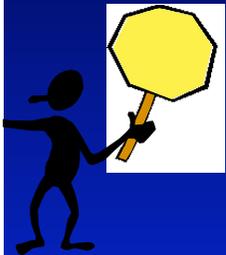
- + gaz *nc* ?**
- + gaz 'abiotique' ?**
- + clathrates ?**
- + schistes bitumineux ?**
- + sables asphaltiques ?**

- + technologie ?**

RESERVES = ??

liées au au prix que l'on veut bien mettre pour l'accès à la ressource

==> si le prix d'achat augmente, les réserves AUSSI !



une augmentation des prix peut induire une baisse de consommation

une baisse des prix peut induire une augmentation de la consommation

1-2-3

finalement on distingue trois quantités

1. Quantité de pétrole **DEJA EXTRAITE** c'est la grandeur la plus sûre
2. Quantité de pétrole **SUPPLEMENTAIRE** à extraire à partir des puits existants grâce aux progrès de la technologie
De plus: certains gisements connus ne sont pas encore exploités
3. **EVALUATION** du pétrole à découvrir

Estimations sont pondérées d'un facteur de probabilité \pm grand selon que l'on est optimiste ou pessimiste + 'distorsions non scientifiques = politiques...'

L'EVALUATION DES RESERVES

est donc pleine d'incertitudes et d'inconnues

- **d'ordre géologique = caractéristiques des bassins et zones à explorer**
- **d'ordre technique = progrès des méthodes et outils de prospection**
- **d'ordre économique = prix du brut, fiscalités, conditions politiques**

RESSOURCES

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

FAISABILITE

← CONNAISSANCE GEOLOGIQUE 0

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% ... '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

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

avec ± 40ans 1P
 et à raison de 30 G bl/an
 pour 1,2 Gbbl en 2014



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



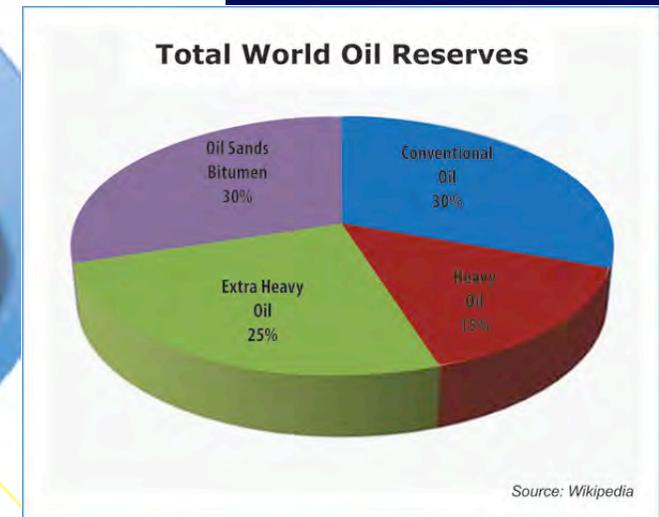
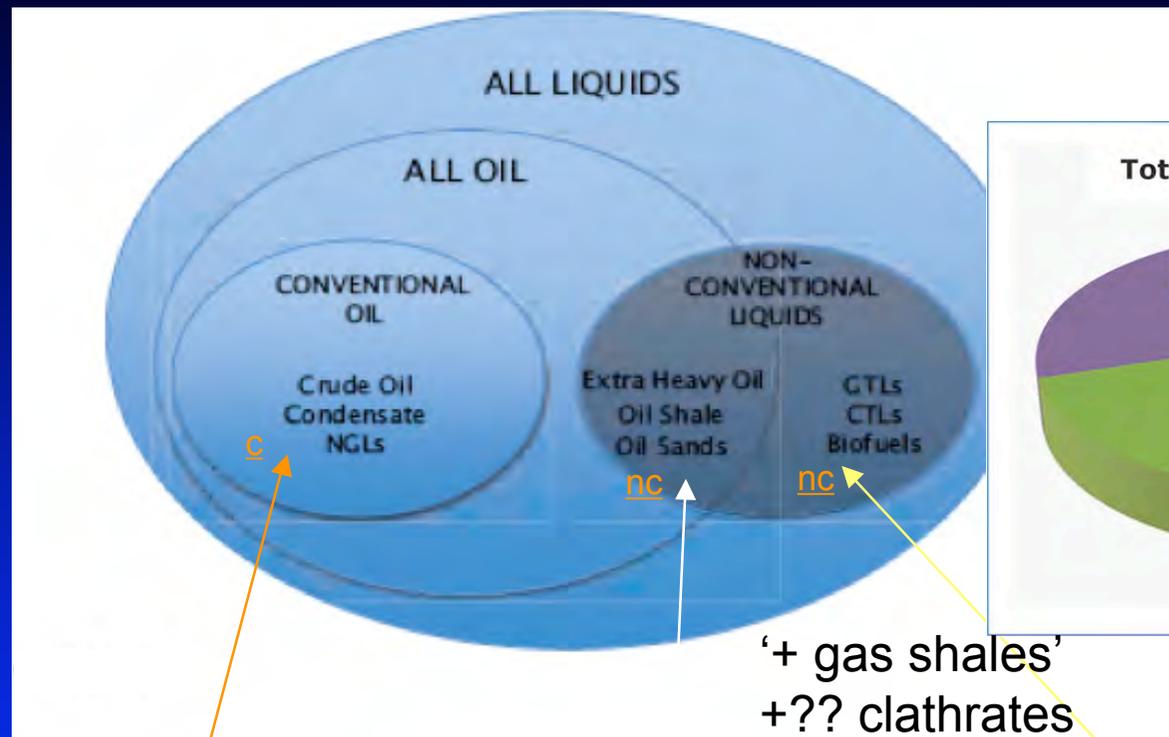
Les réserves développées prouvées: le poisson est dans votre barque, vous l'avez pesé. Vous pouvez le sentir et vous allez le manger. **Les réserves non développées prouvées:** le poisson a mordu à l'hameçon et vous êtes prêt à le sortir de l'eau. Vous pouvez même en évaluer la grosseur (il a toujours 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

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



Crude Oil : brut (mélanges HC)

Condensate : huile très légère (C_{5+}) se condensant à partir de gaz naturels (p,T surface)

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

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

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

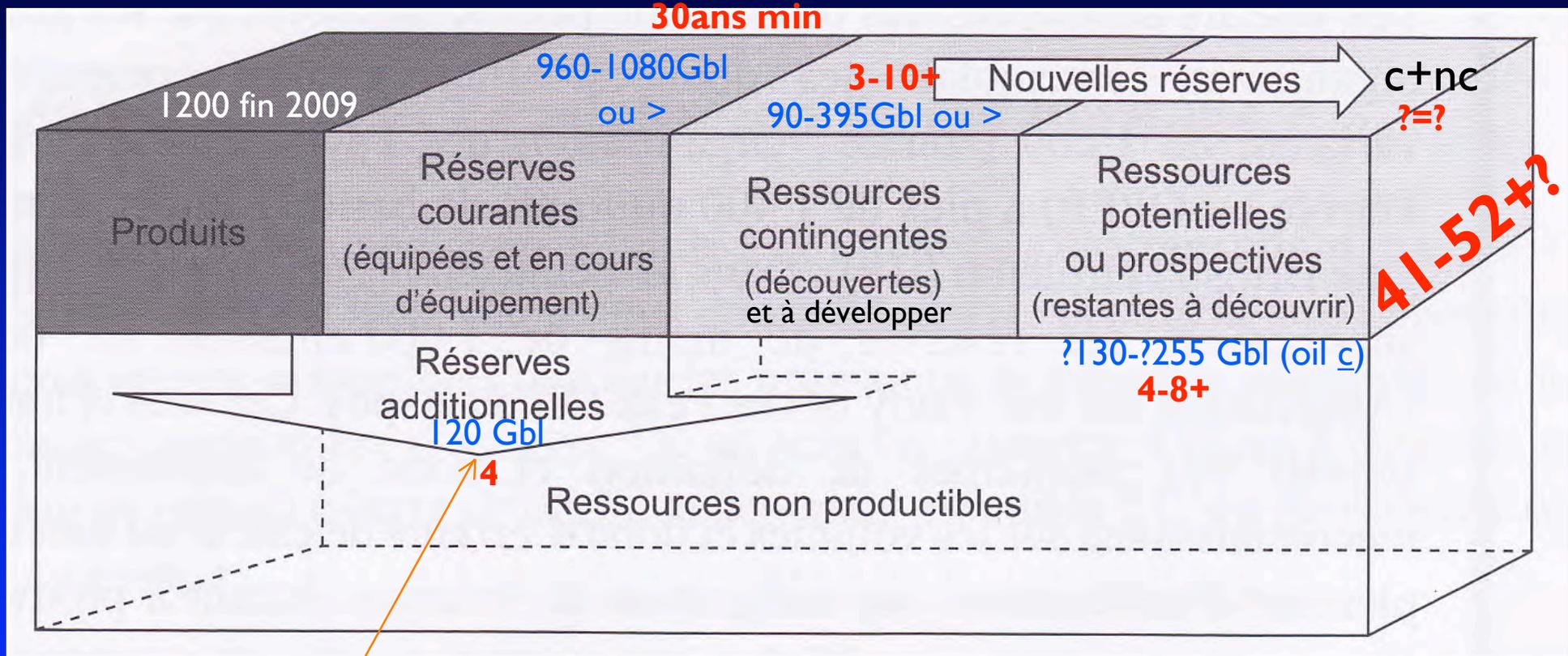
Oil Sands: grès imprégnés d'huile extra-lourde ou lourde, 'mining' et procédés = syncrude

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

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

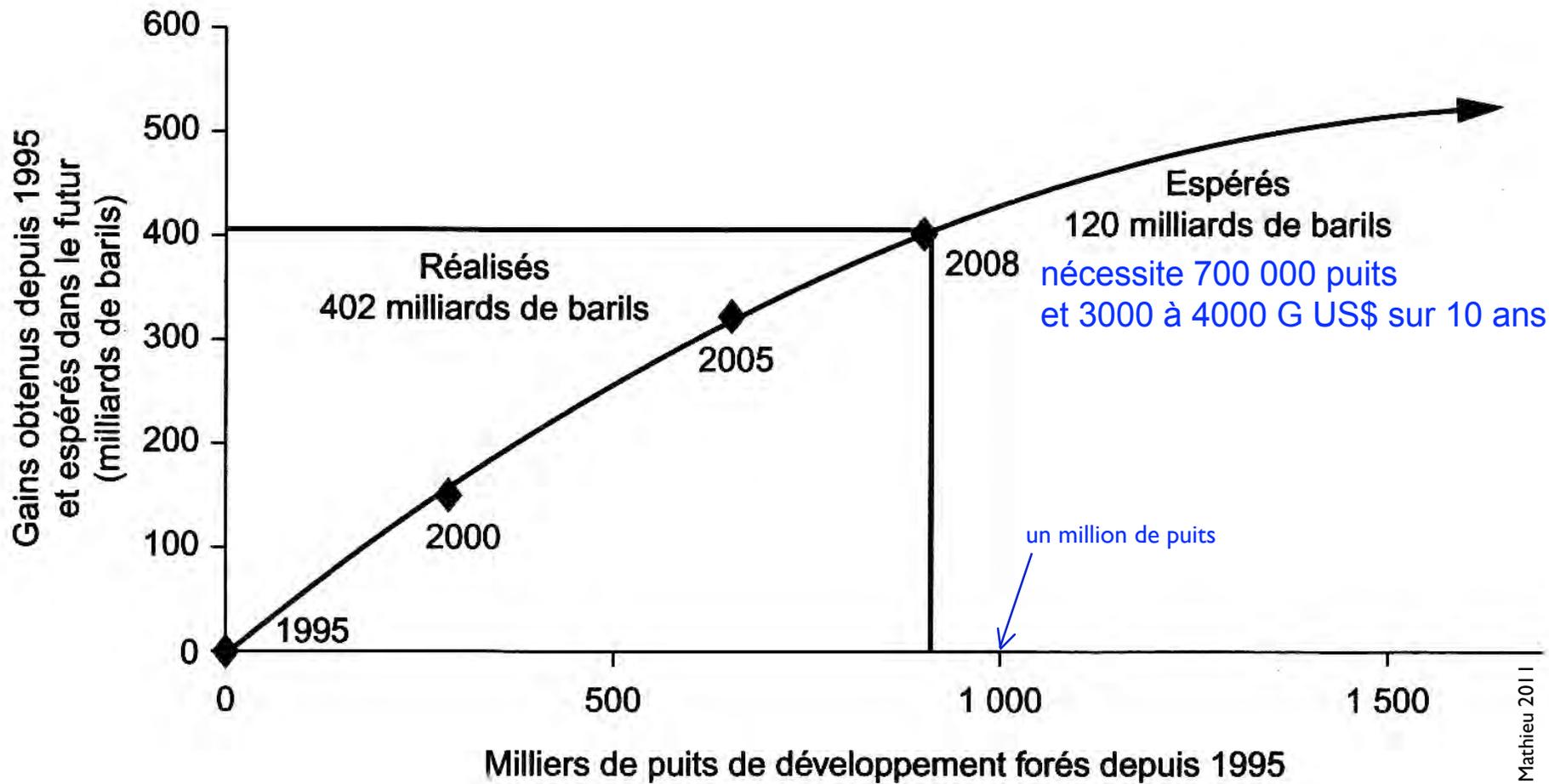
Biofuels : fuels synthétiques obtenus par la biomasse (bio-éthanol, bio-diesel)

Situation début 2009 : 40 000 gisements, 400 compagnies, > 90 pays
 nb Production 2009 : 30 Gbl (-1,5% pr 2008 = diminution exceptionnelle)

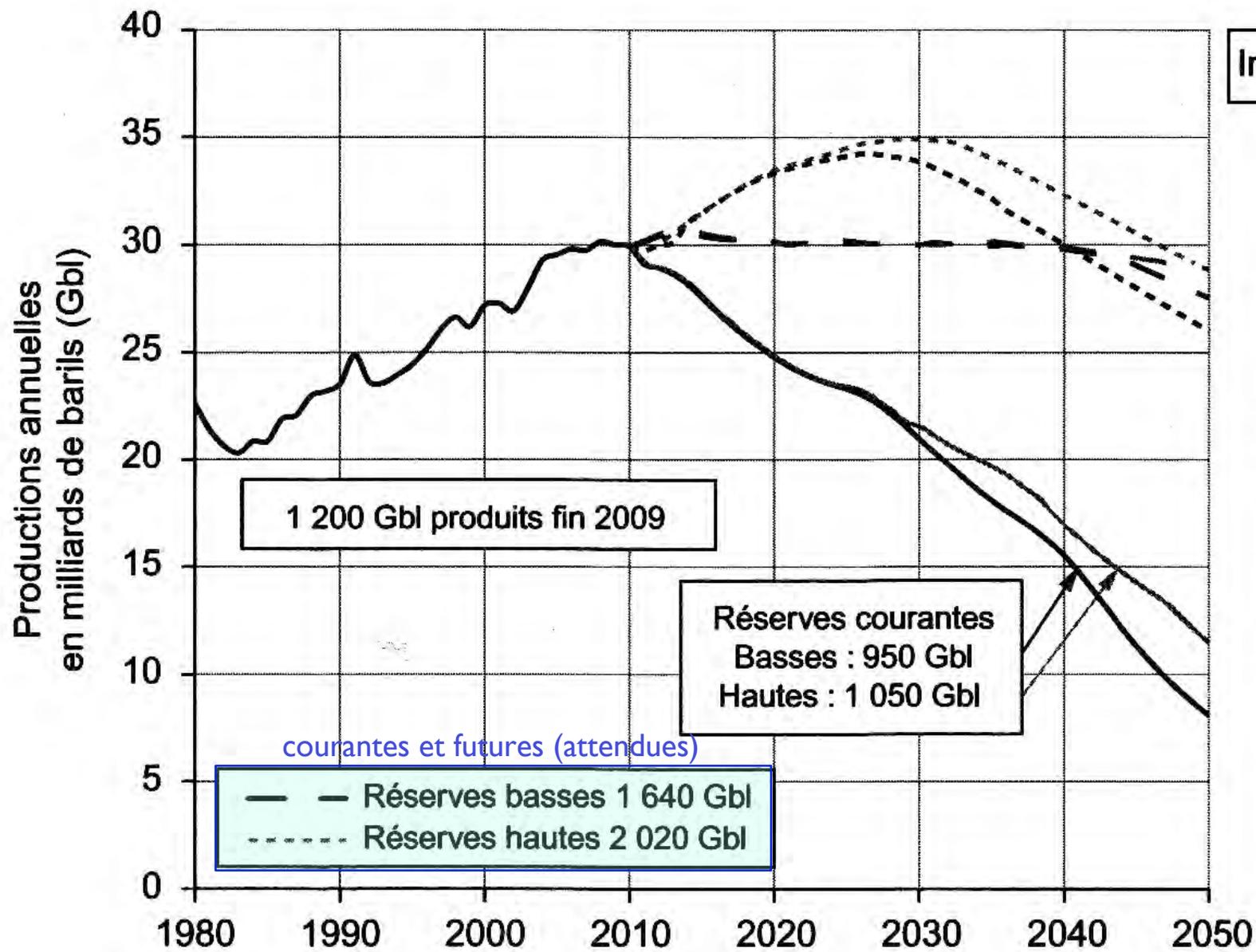


Mathieu 2011

nécessite environ 700 000 puits complémentaires
 (investissements...)
 nb pour l'USGS, toutes les productions futures sont nettement plus élevées



Mathieu 2011



TAUX DE RECUPERATION

suite aux conditions de rétention liées aux tensions capillaires présentes dans le réservoir, on extrait qu'une faible quantité du pétrole en place....

Récupération primaire naturelle [on ne fait rien] = **10%** [20%]

Récupération secondaire [pression...] = **jusqu'à 30 %**

Récupération tertiaire peu utilisée car très chère: **jusqu'à 30-40%** [60%]

=procédés physico-chimiques par injection micro-émulsions, injection thermique, injection eau avec additifs chimiques, injection gaz HC miscibles.

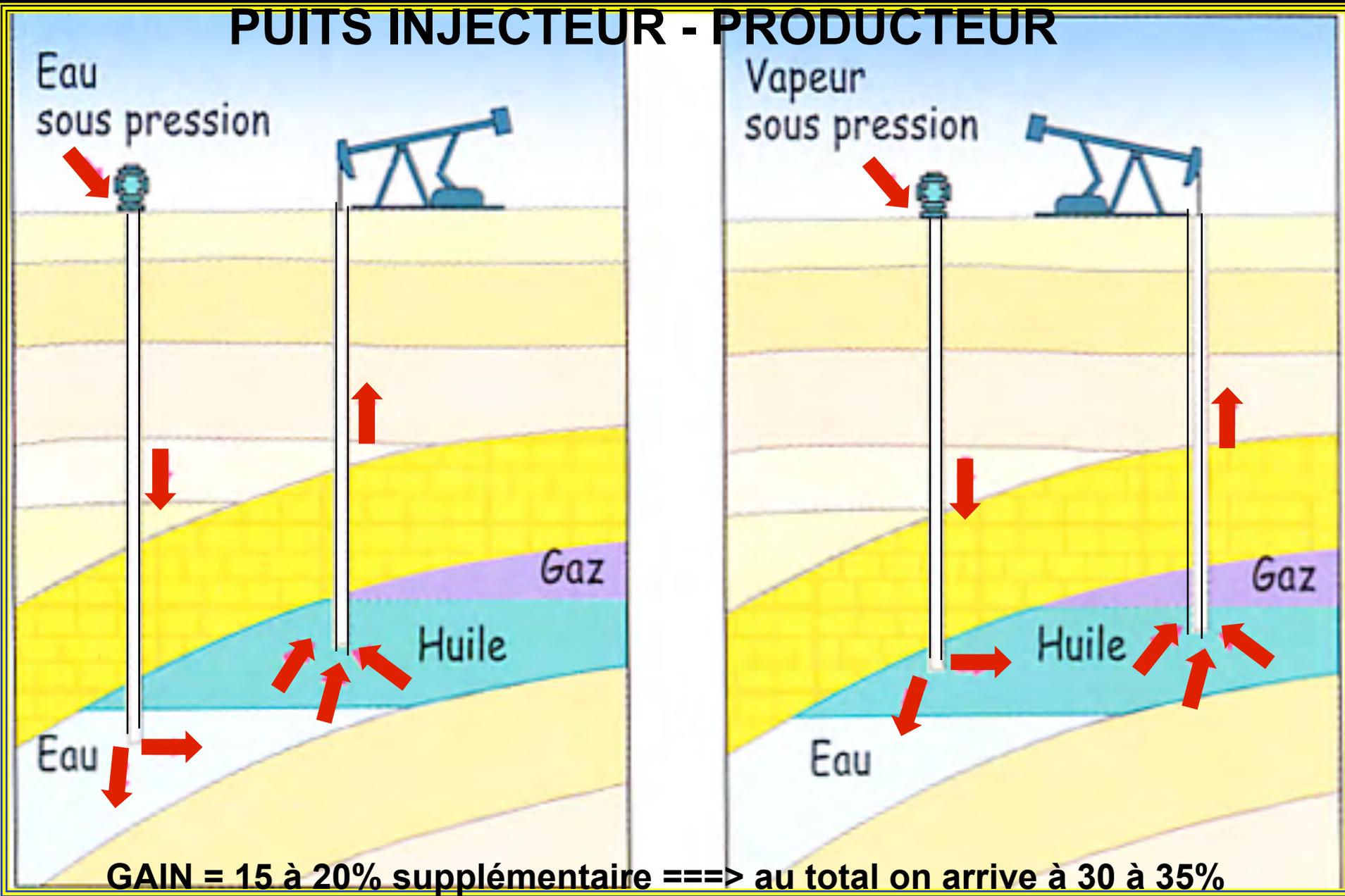


**on laisse en place
>>50% du pétrole**

1% de plus (mondial) = 2 ans de consommation mondiale
5% = réserves prouvées Arabie Saoudite



PUITS INJECTEUR - PRODUCTEUR



GAIN = 15 à 20% supplémentaire ==> au total on arrive à 30 à 35%

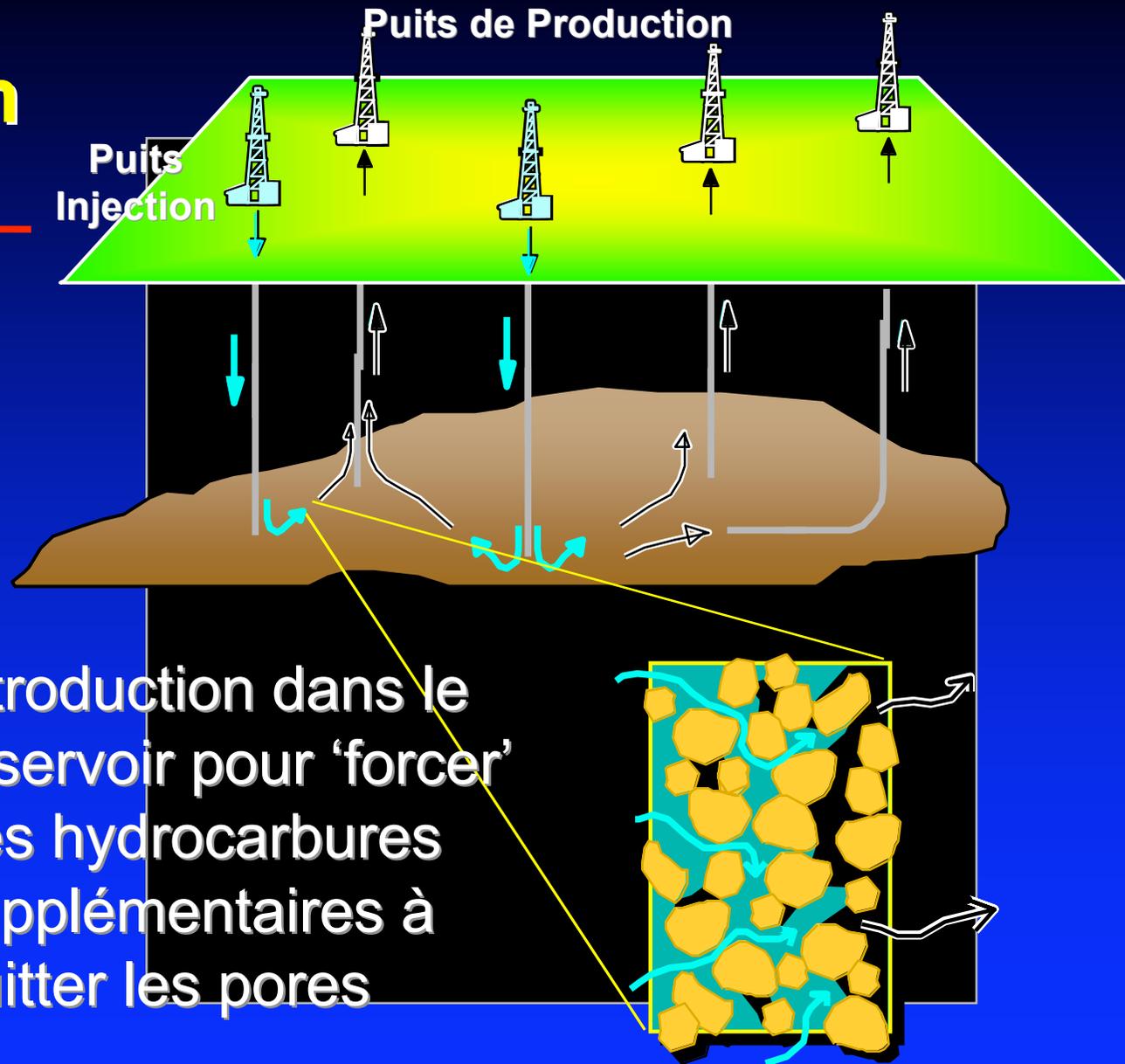
RECUPERATION SECONDAIRE

Récupération Secondaire

de 30 à 60% des HC dans le Réservoir

Eau
Gaz
Vapeur
Chimie
Chaleur

Introduction dans le réservoir pour 'forcer' des hydrocarbures supplémentaires à quitter les pores



DIAPOSITIVE de 2001 ...

Environ 80 % du pétrole extrait aujourd'hui provient de gisements découverts avant 1973. On estime que l'on a découvert 90 % des réserves pétrolières et que la production de pétrole bon marché [celui consommé aujourd'hui] déclinera dans les 10 ans à venir?

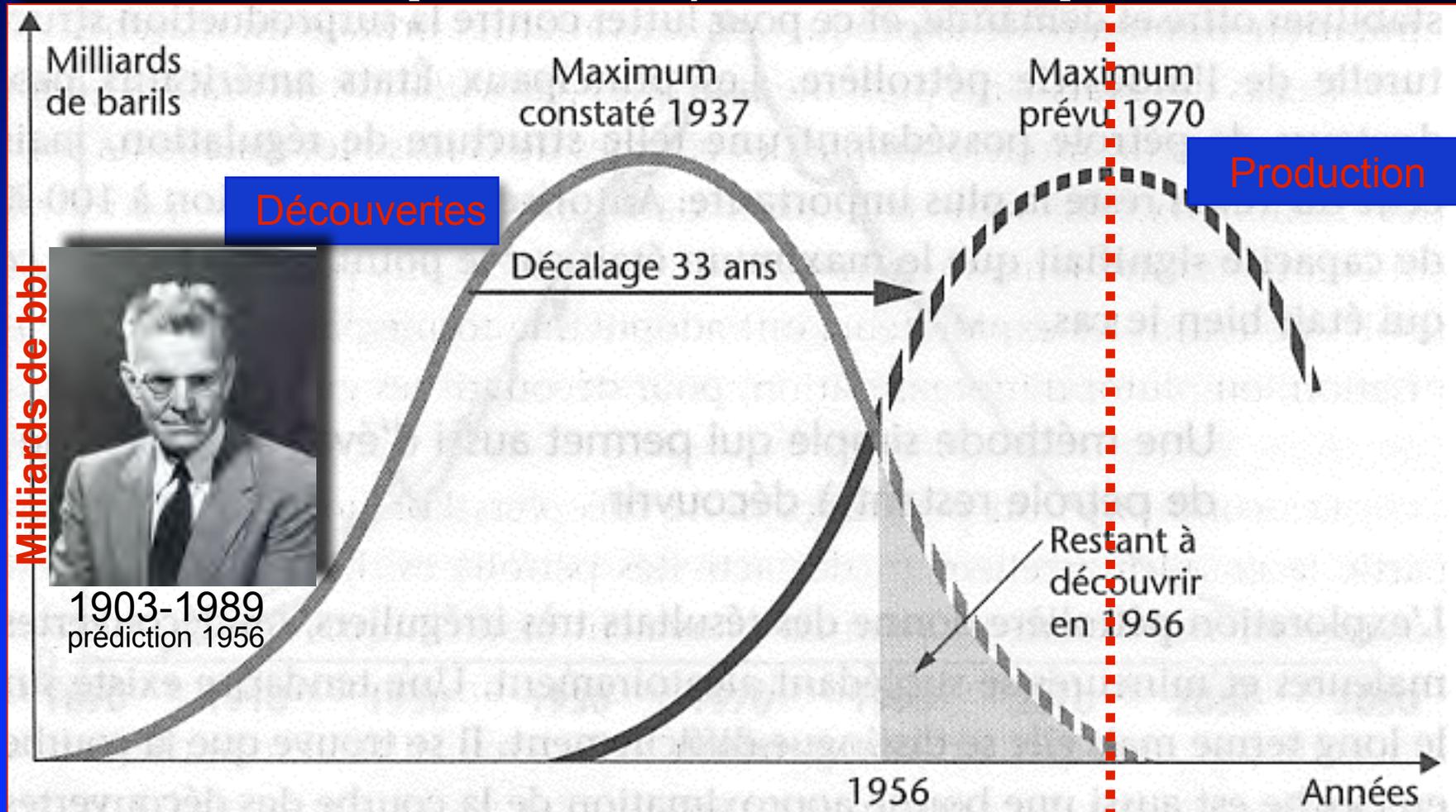
Les arguments sont basés sur l'extension d'un modèle développé par KING HUBBERT en 1956: l'extraction incontrôlée d'une ressource limitée suit une courbe en cloche dont le maximum est atteint lorsque la moitié de cette ressource est épuisée

Le modèle de King HUBBERT, 1956



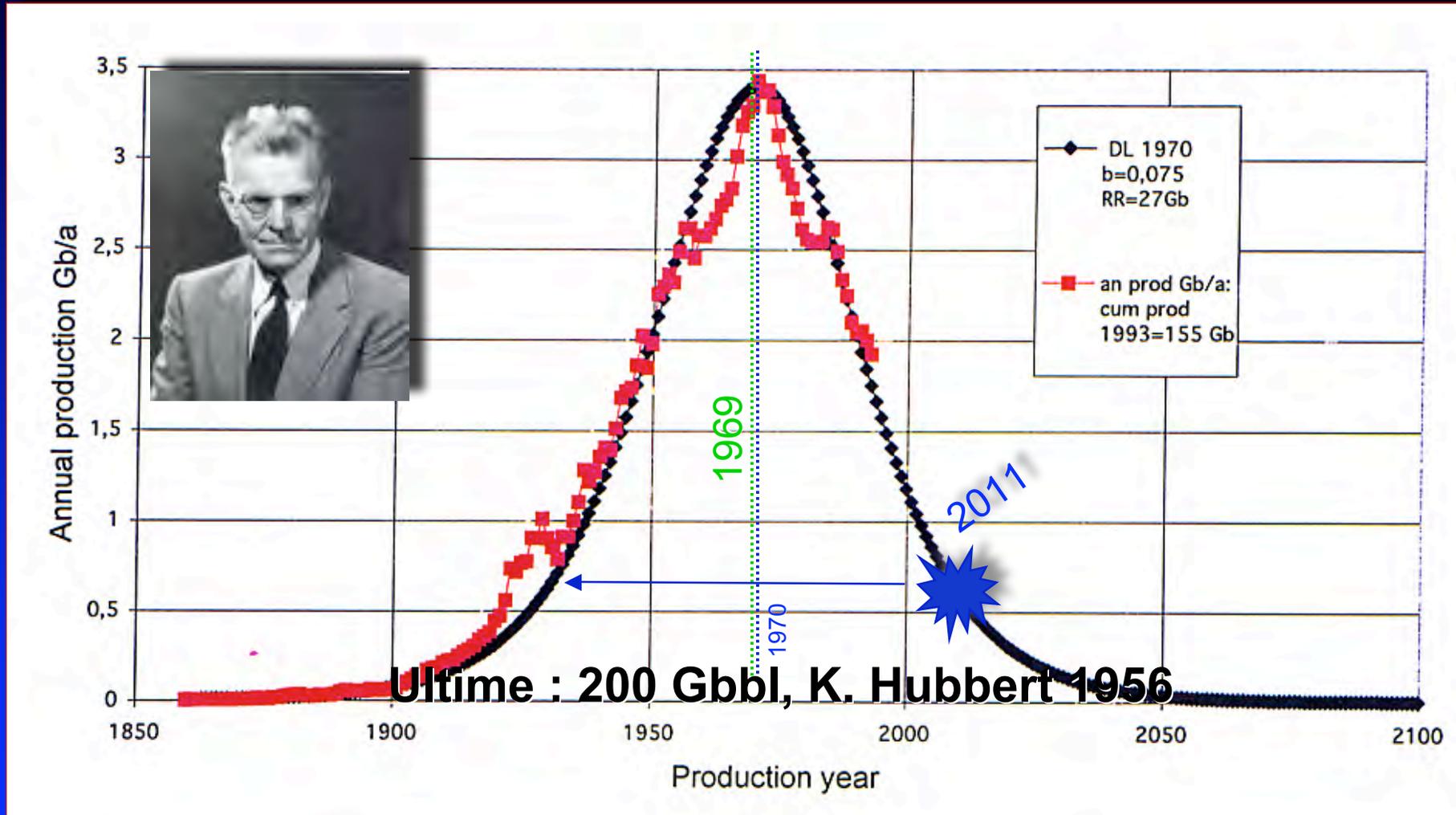
Appliqué aux USA, le modèle de HUBBERT prédit en 1956! que la production pétrolière de ce pays atteindrait un maximum en 1969. Il fut en réalité atteint en 1970...

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



Wingert 2005

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

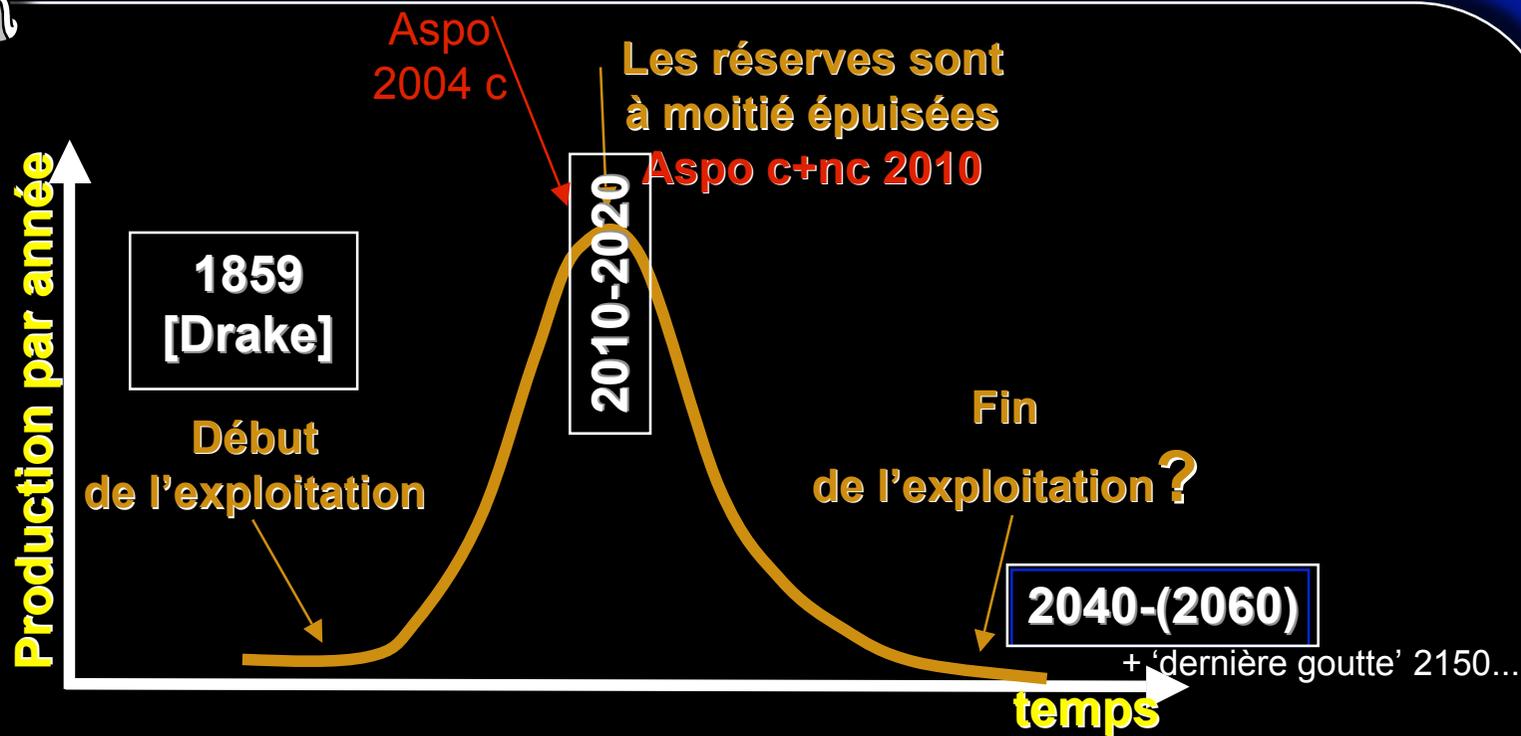


'De plus en plus de nos importations viennent de l'étranger'
G.W. Bush, National Public Radio, Morning Edition, 26 Sept 2000 in Rousselot 2003

ULTIMES: 6000 G bbl c et 7000 G bbl nc

avec ... 280 Gt ou \pm 2100 Gbbl

**LE MAXIMUM DE PRODUCTION SERAIT ATTEINT
VERS 2020...?**



pétrole conventionnel

Production d'huile: la courbe en cloche

u
l
t
i
m
e

Planète
20G bep

↓

10G c

↓

5 à 10G
Récupérable

↓

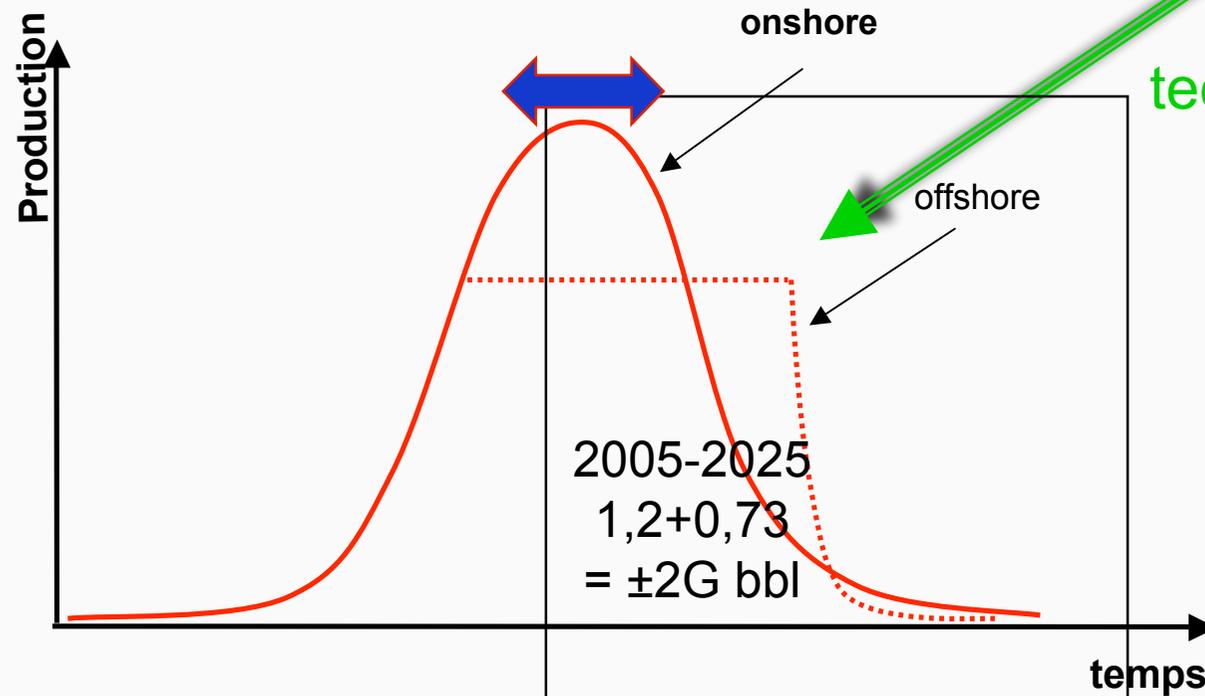
Rés Prouv
2,2G

↓

Rés Prouv
1995-2025
1,2G bbl

↓

Croissance
Rés Prouv
2005-2025
0,73G bbl



AIE 2005, IEO 2005 etc



Le pétrole 'bon marché' est fini

Le monde sera **ENCORE** plus dépendant des pays producteurs du Moyen-Orient

Production par année

Les réserves sont à moitié épuisées

2010-2020

augmentation de la demande!

pourquoi?

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

?2040-(2060)

temps

Fin

de l'exploitation ?



JANV-FEV 2015

larevue.info

La Revue

MENSUEL
N° 49
FÉVRIER
2015

LE MONDE COMME VOUS NE L'AVEZ JAMAIS VU

PÉTROLE LA GUERRE EST DECLARÉE

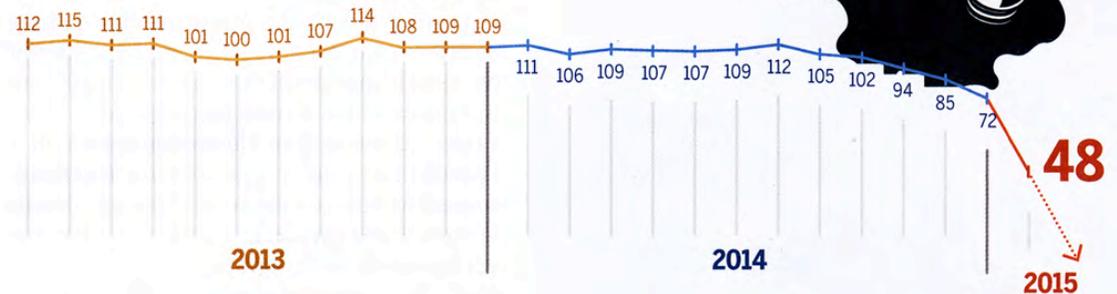
Pourquoi l'Arabie saoudite et les États-Unis font chuter le prix du baril.

L'ARABIE SAOUDITE DÉCLARE LA GUERRE

ÉTÉ 2014 : LE DÉBUT DES HOSTILITÉS

Le prix du baril de Brent, en dollars

SOURCE : <http://prixdubaril.com/>



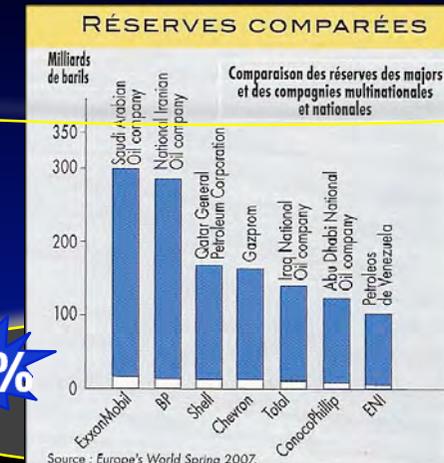
Production gaz de schiste au USA
Demande en baisse (stagnation EU, baisse croissance Chine...)
Refus de l'OPEP de diminuer leurs quotas de production

Nb prix de revient gaz de schiste: 22-111 \$
(moy 73 \$) > < Arabie Saoudite : 20\$ ou moins

'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 All/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



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

• = > 10^e PIB mondial

- Shell plus puissant que l'Autriche (n°20)
En 2006: Exxon-Mobil = major 1
avec 450 G \$ (>PIB Belgique ±393 G \$)

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



Les compagnies pétrolières gèrent 10% de la production mondiale

2013

Rang	Nom	Siège social	Pays	Chiffre d'affaires (millions \$)	Bénéfice (millions \$)	Employés	Branche
1.	Wal-Mart	Bentonville	États-Unis	476 294	16 022	2 200 000	Commerce de détail
2.	Royal Dutch Shell	La Haye	Pays-Bas	459 599	16 371	87 000	Pétrole
3.	Sinopec	Pékin	Chine	457 201	8 932	1 015 039	Pétrole
4.	China National Petroleum Corporation	Pékin	Chine	432 007	18 504	1 674 541	Pétrole
5.	ExxonMobil	Irving	États-Unis	407 666	32 580	88 000	Pétrole
6.	BP	Londres	Royaume-Uni	396 217	23 451	85 700	Pétrole
7.	State Grid Corporation	Pékin	Chine	333 386	7 982	849 594	Électricité
8.	Volkswagen	Wolfsbourg	Allemagne	261 539	12 071	549 763	Automobile
9.	Toyota Motor	Toyota	Japon	256 454	18 198	333 498	Automobile
10.	Glencore Xstrata	Baar	Suisse	232 694	-7 402	61 000	Négoce en matières premières
11.	Total	Courbevoie	France	227 882	11 204	97 126	Pétrole
12.	Chevron	San Ramon	États-Unis	220 356	21 423	62 000	Pétrole
13.	Samsung Electronics	Séoul	Corée du Sud	208 938	27 245	236 000	Électronique
14.	Berkshire Hathaway	Omaha	États-Unis	182 150	19 476	288 500	Finance
15.	Apple	Cupertino	États-Unis	170 910	37 037	76 100	Électronique
16.	AXA	Paris	France	165 893	5 950	94 364	Assurances
17.	Gazprom	Moscou	Russie	165 016	35 769	417 000	Pétrole et gaz
18.	E.ON	Düsseldorf	Allemagne	162 560	2 843	72 083	Énergie
19.	Phillips 66	Houston	États-Unis	161 175	3 726	13 500	Énergie
20.	Daimler AG	Stuttgart	Allemagne	156 628	9 083	275 087	Automobile

Belgique : 455 G\$ (2013)

Les pays au plus gros PIB (estimations 2015, prix courants)				
Rang	Pays	PIB 2015 (milliards \$)	PIB 2014 (milliards \$)	Evolution
1	Etats-Unis	18 287	17 416	5%
2	Chine	11 285	10 355	9%
3	Japon	4 882	4 770	2,40%
4	Allemagne	3 909	3 820	2,30%
5	Royaume-Uni	3 003	2 848	5,50%
6	France	2 935	2 902	1,10%
7	Brésil	2 357	2 244	5%
8	Inde	2 248	2 048	9,80%
9	Italie	2 153	2 129	1,10%
10	Russie	2 099	2 057	2%
11	Canada	1 873	1 794	4,40%
12	Corée du	1 561	1 449	7,70%
13	Australie	1 535	1 483	3,50%
14	Espagne	1 422	1 400	1,50%
15	Mexique	1 367	1 296	5,50%
16	Indonésie	915	856	6,90%
17	Pays-Bas	892	880	1,30%
18	Turquie	861	813	5,90%
19	Arabie Saoudite	805	778	3,50%
20	Suisse	680	679	0,20%

Source : FMI