

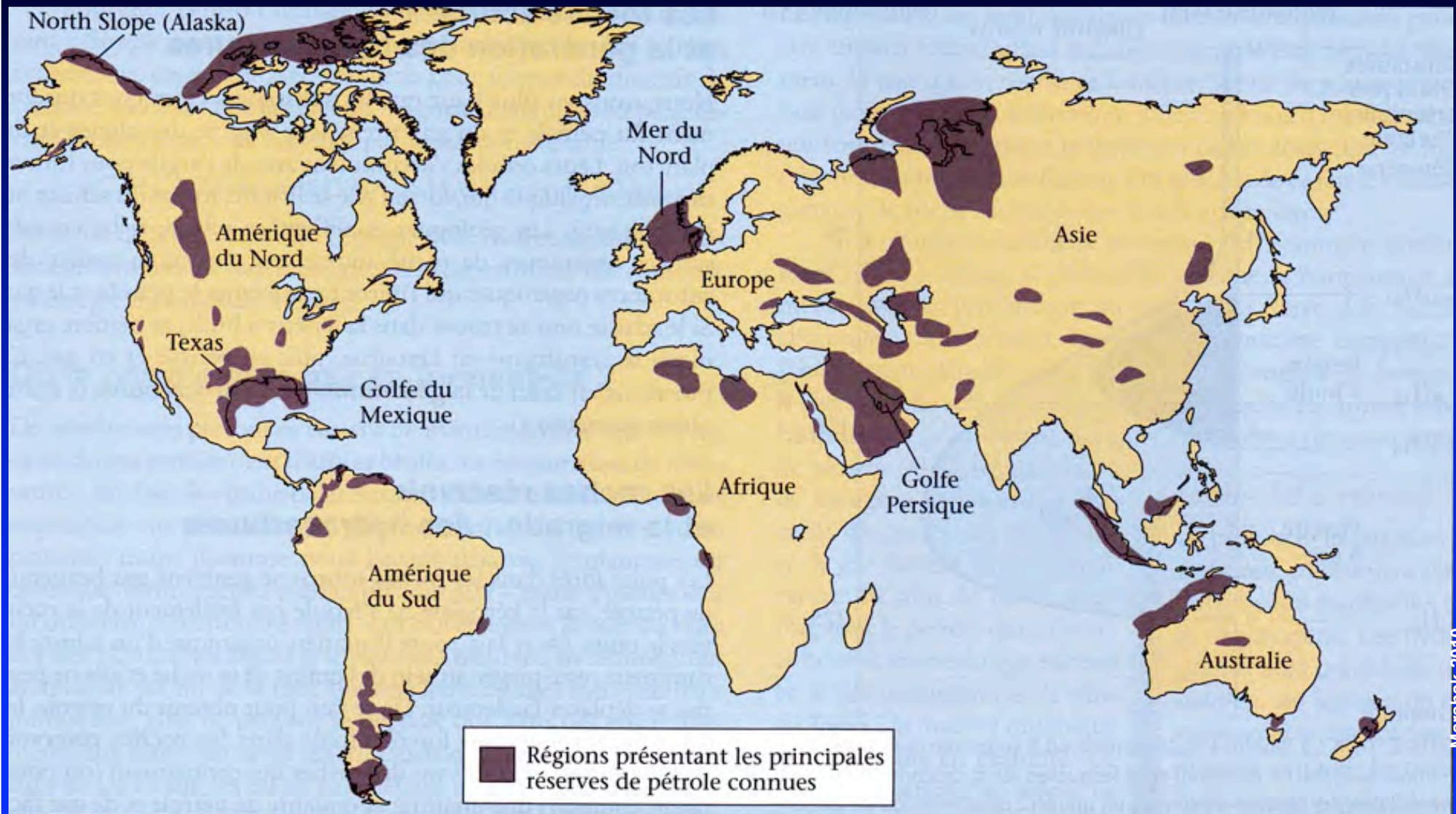
# LECON 3 -2015-

## LES BASSINS SEDIMENTAIRES [suite et fin]

### LA PLAQUE ARABIQUE

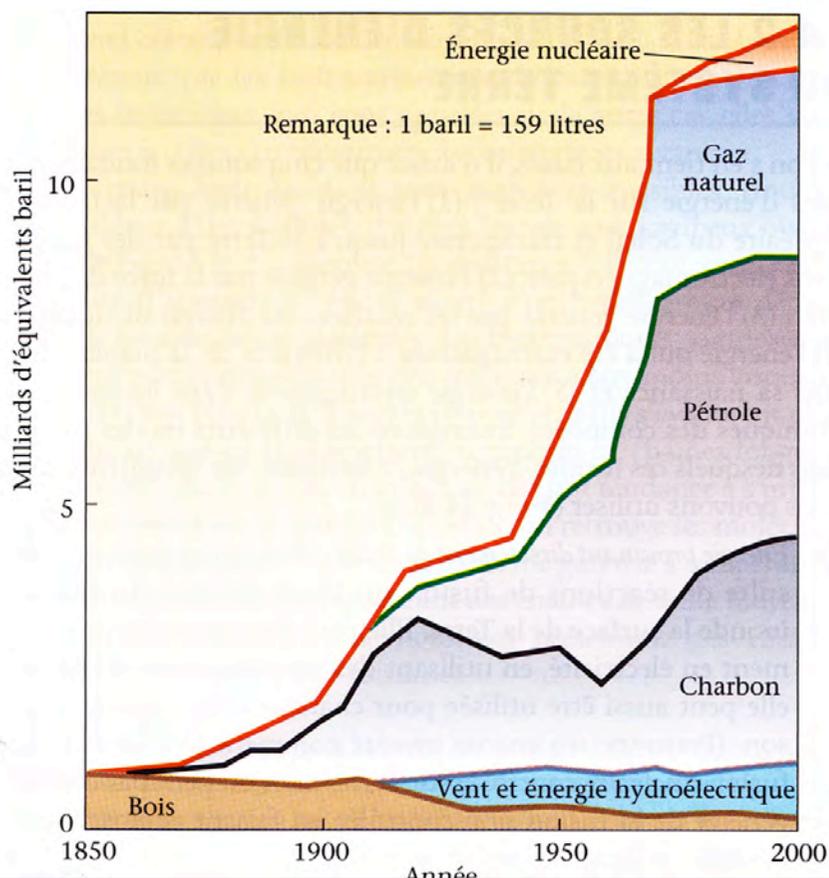
### L'ORIGINE ORGANIQUE DU PETROLE





Marshak 2010

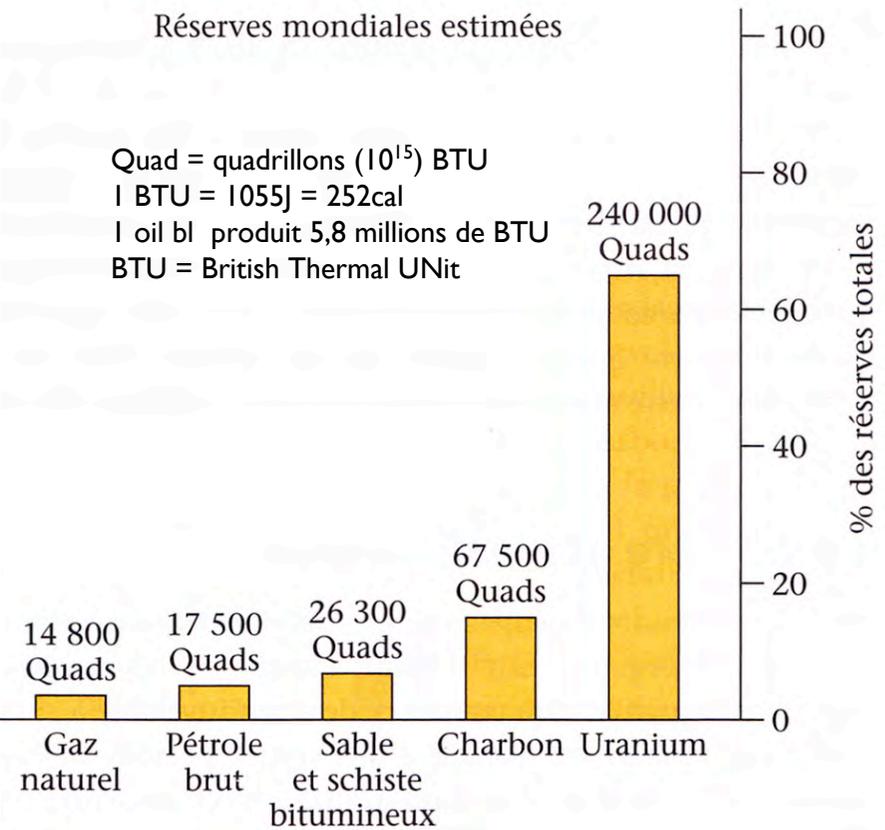
**Au total : environ 70 000 accumulations**



### Réserves mondiales estimées

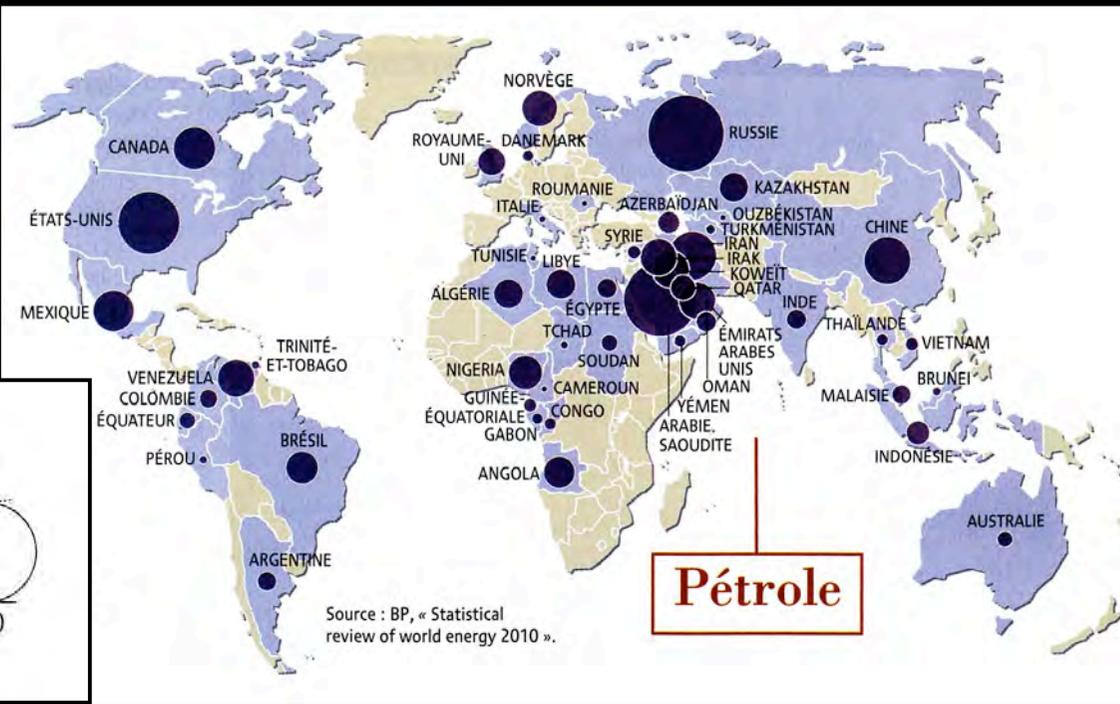
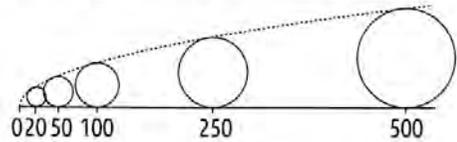
Quad = quadrillions ( $10^{15}$ ) BTU  
 1 BTU = 1055J = 252cal  
 1 oil bl produit 5,8 millions de BTU  
 BTU = British Thermal UNit

Marshak 2010



# PRODUCTION

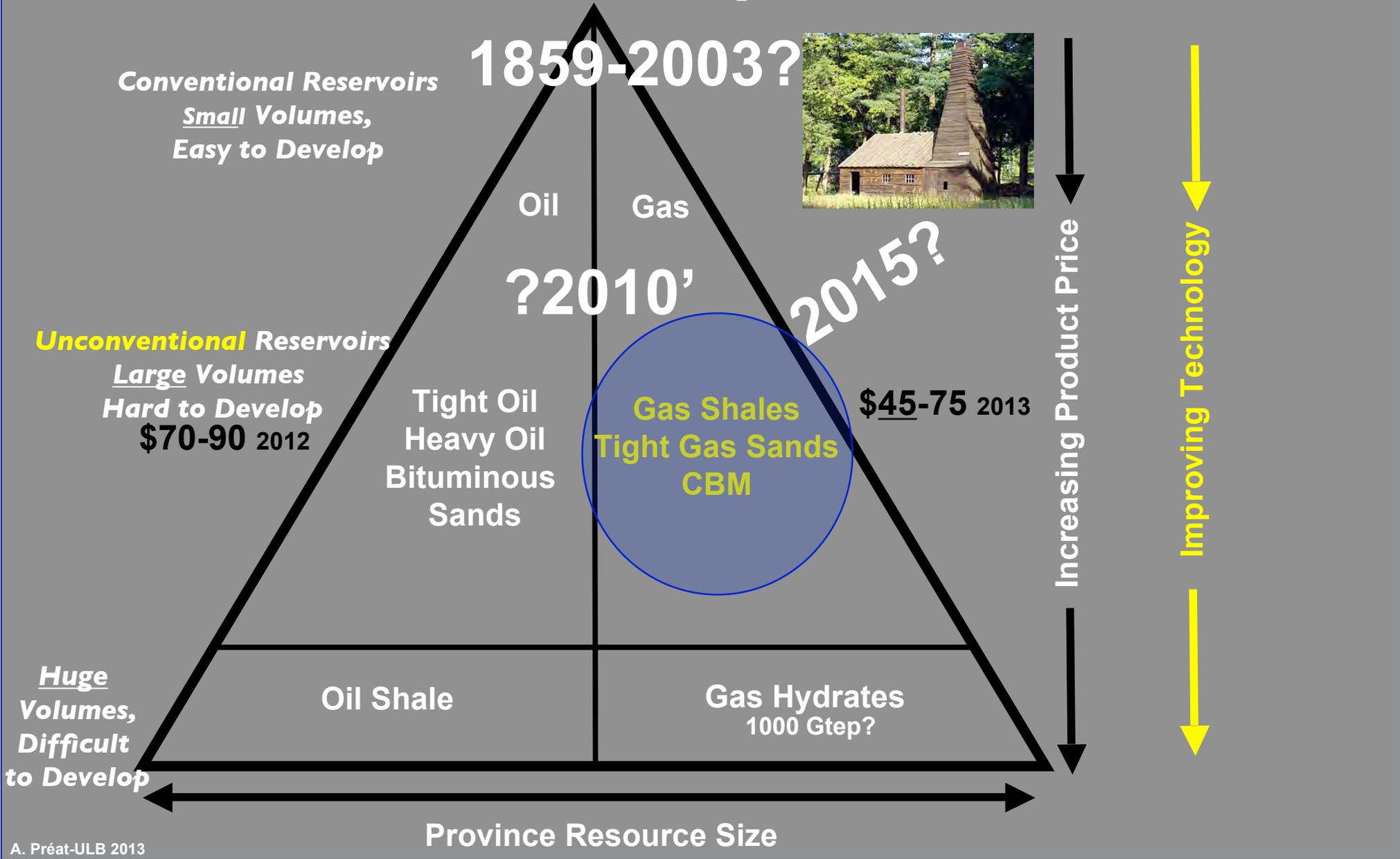
Production, en 2009  
Millions de tonnes équivalent pétrole



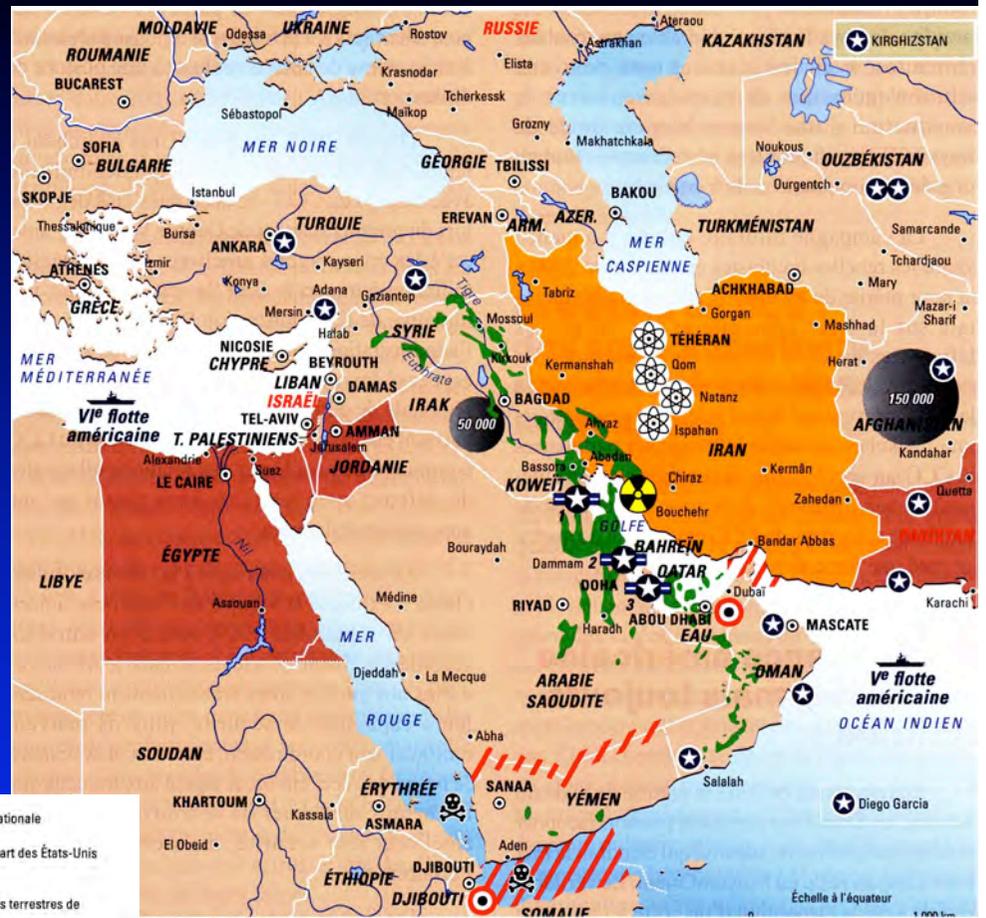
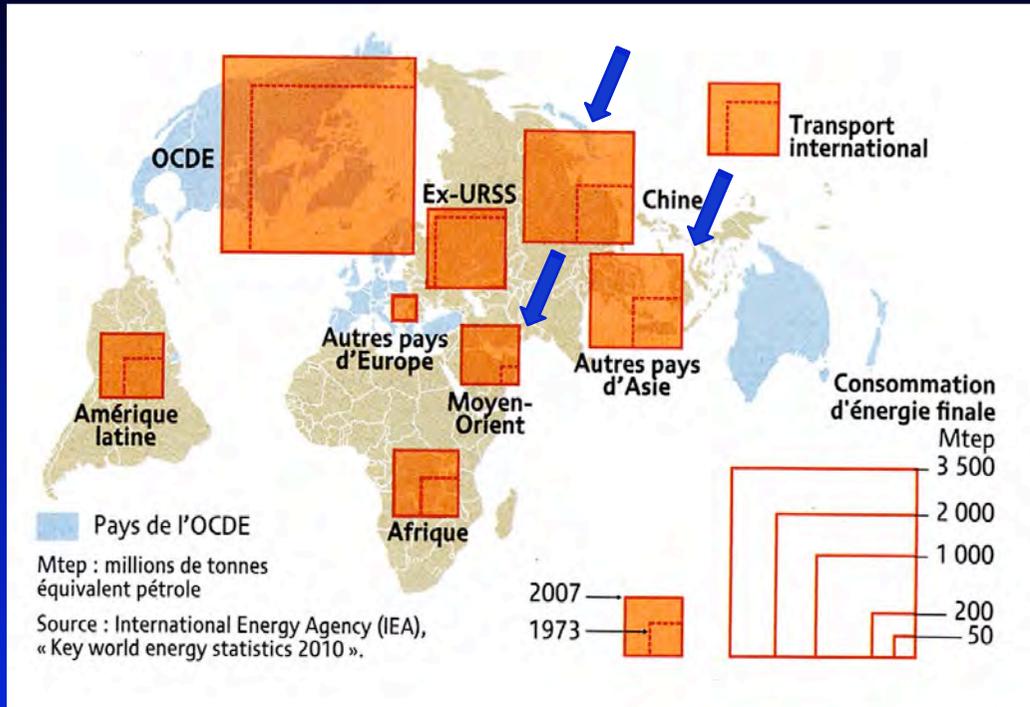
# PRODUCTION



# The Resource Pyramid



# CONSOMMATION



Questions Internationales 2010

« **GRAIN DE SABLE** »

« La Libye a invoqué un cas de force majeure pour interrompre toute exportation de produits pétroliers et a également bloqué les importations, a-t-on appris mardi 22 février de sources commerciales »

Afrique 2009

- 1 Nigeria
  - 2 Algérie
  - 3 Angola
  - 4 Libye 1,8 Mbbl/j
- 80% export = Europe  
avec les+ gdes réserves Afr (42Gbb)



plus haut niveau depuis sept 2008

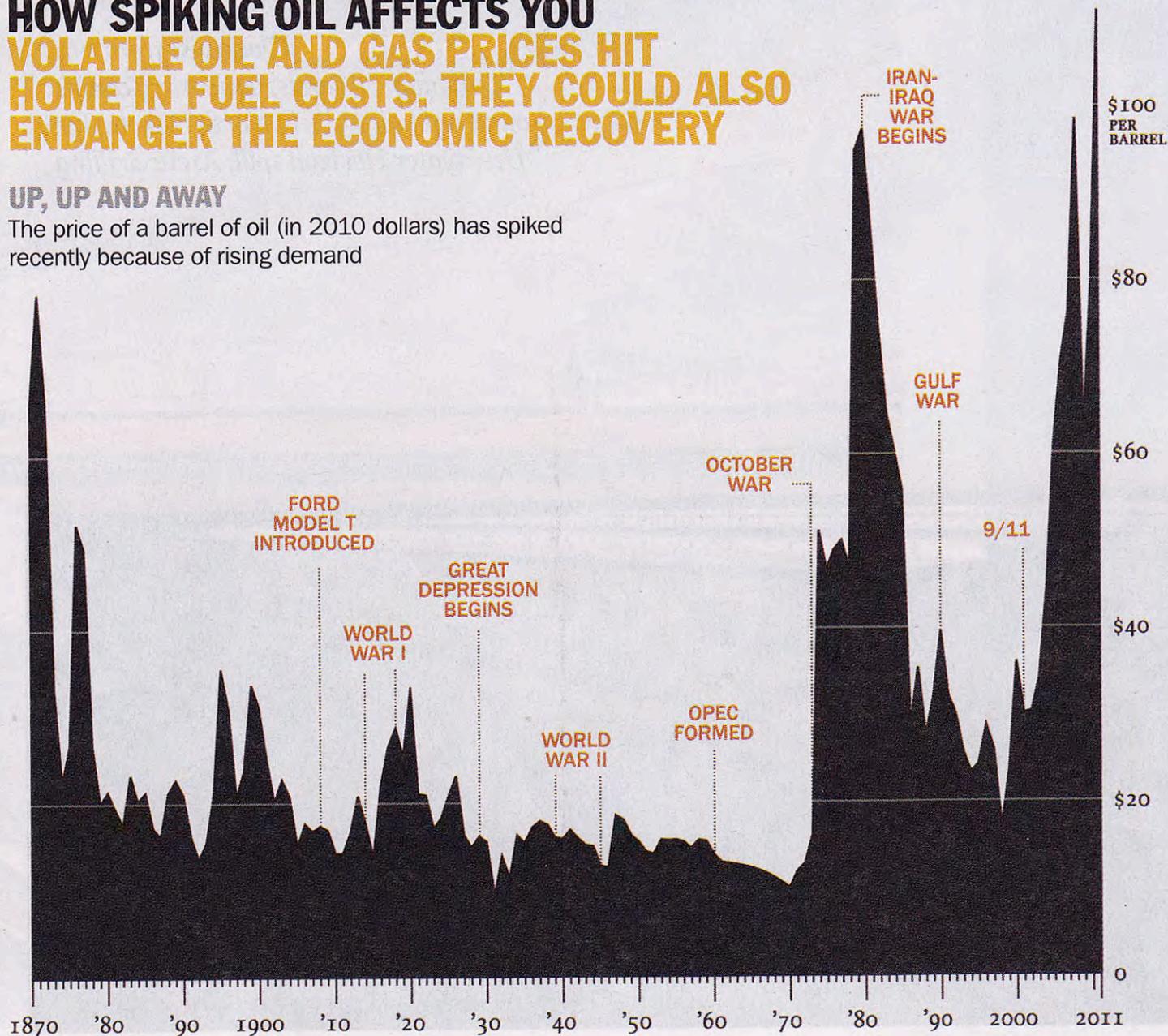
**Iran Omuz**  
21 fév 2012  
1 Million bbl de moins/j  
Nigeria/Soudan/Libye/Iran  
121\$ ou 91,49€ Brent  
> 2008 en euros  
+ht depuis 2008

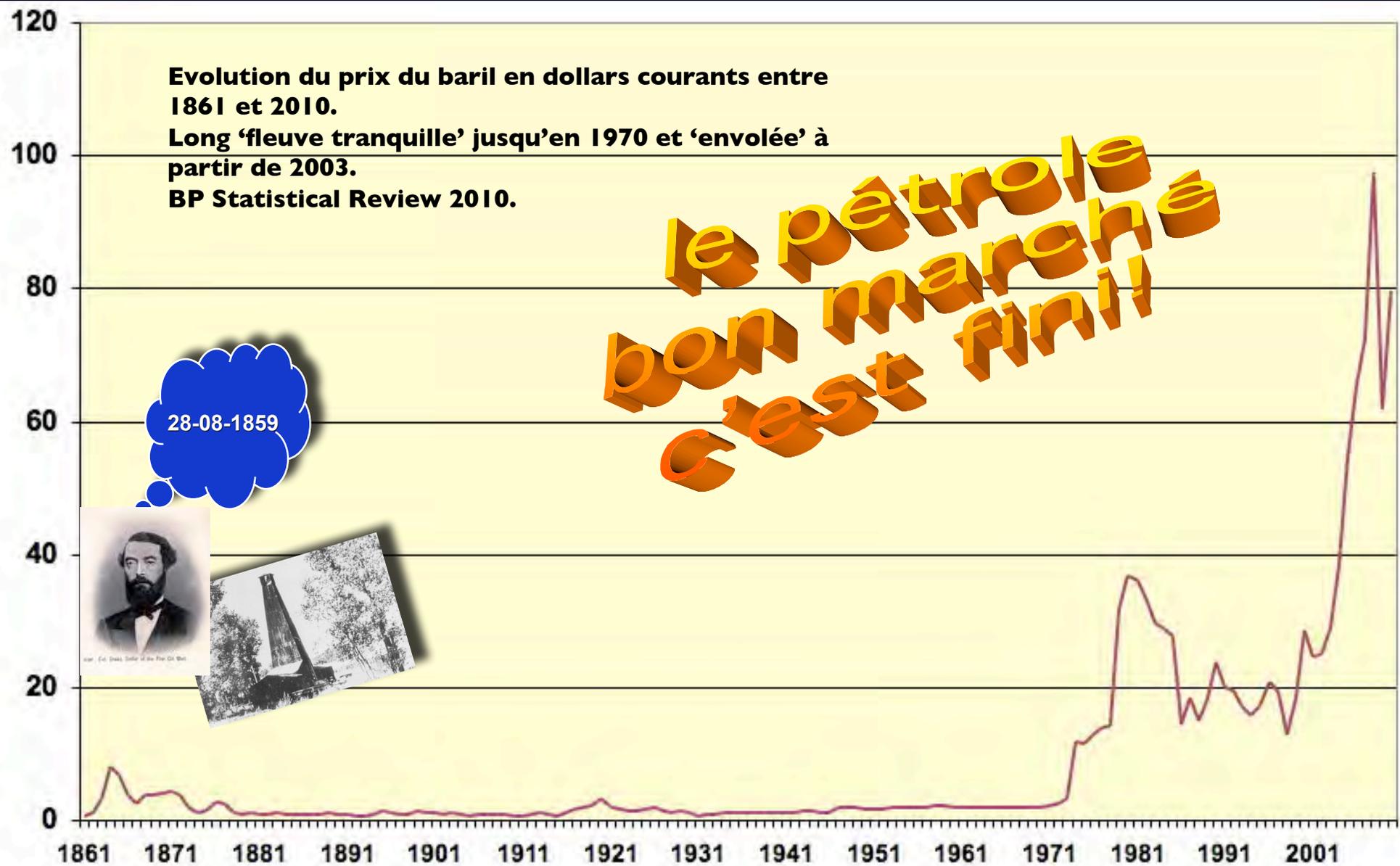
# HOW SPIKING OIL AFFECTS YOU

## VOLATILE OIL AND GAS PRICES HIT HOME IN FUEL COSTS. THEY COULD ALSO ENDANGER THE ECONOMIC RECOVERY

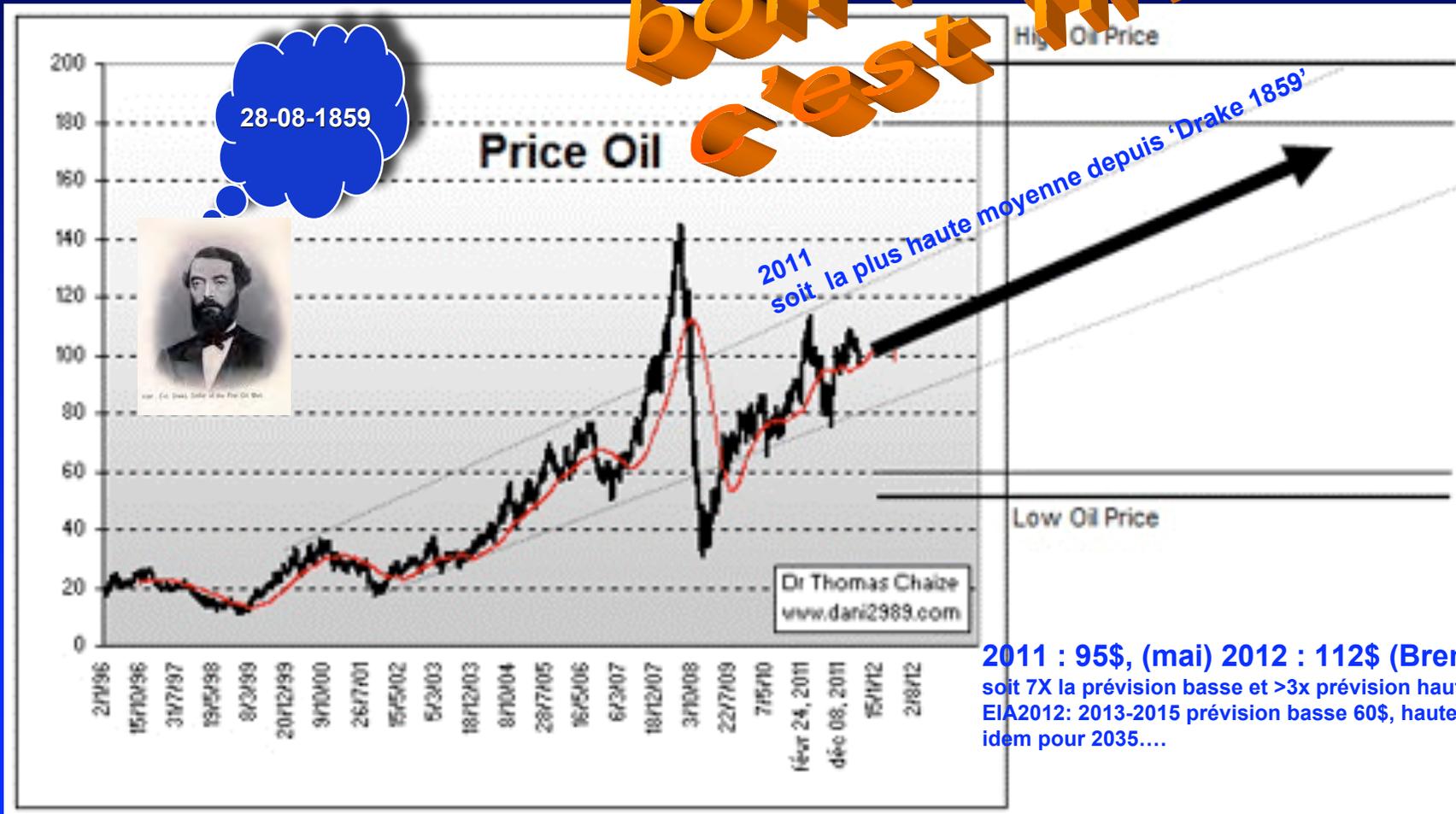
### UP, UP AND AWAY

The price of a barrel of oil (in 2010 dollars) has spiked recently because of rising demand





# le pétrole bon marché c'est fini!

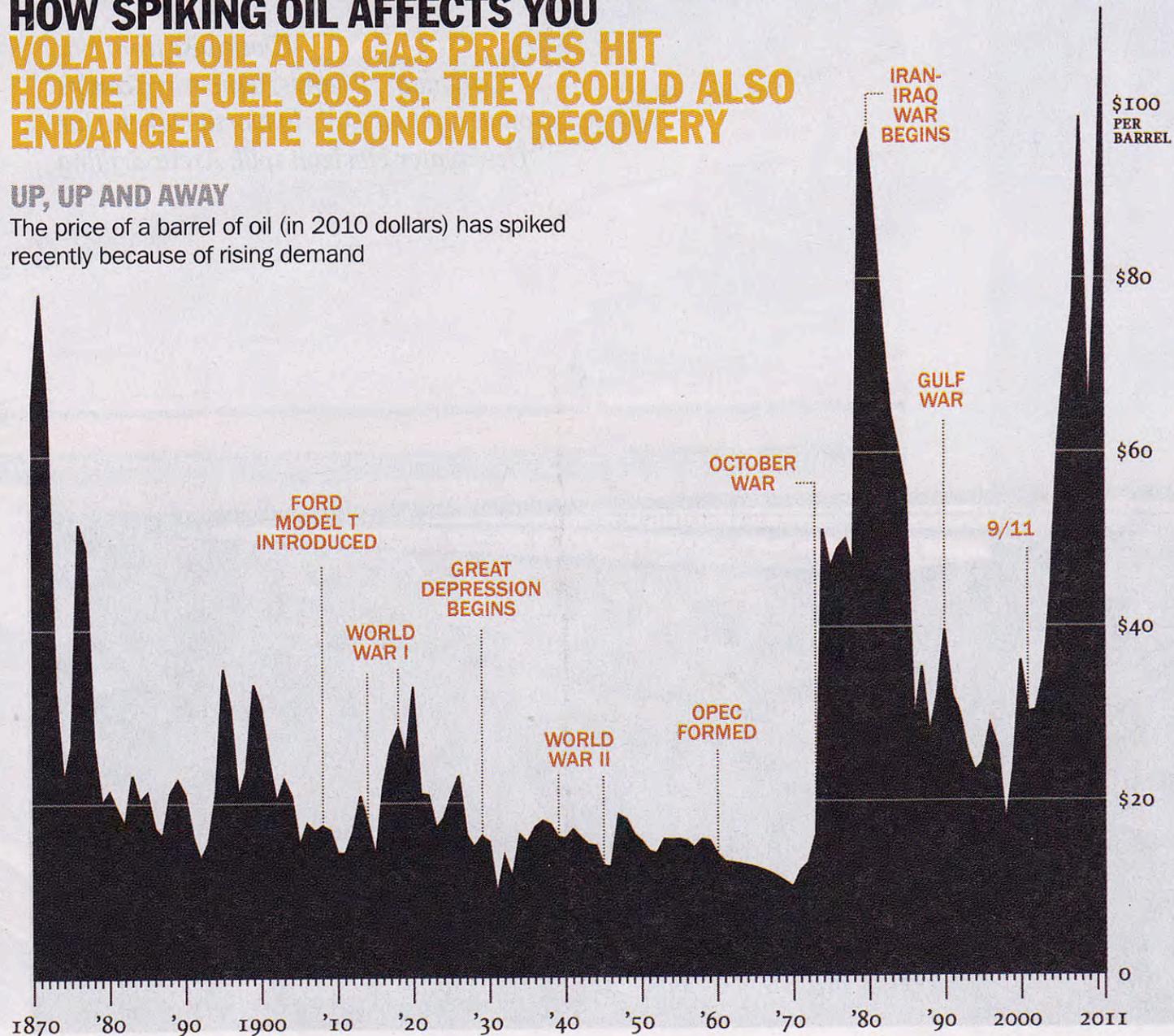


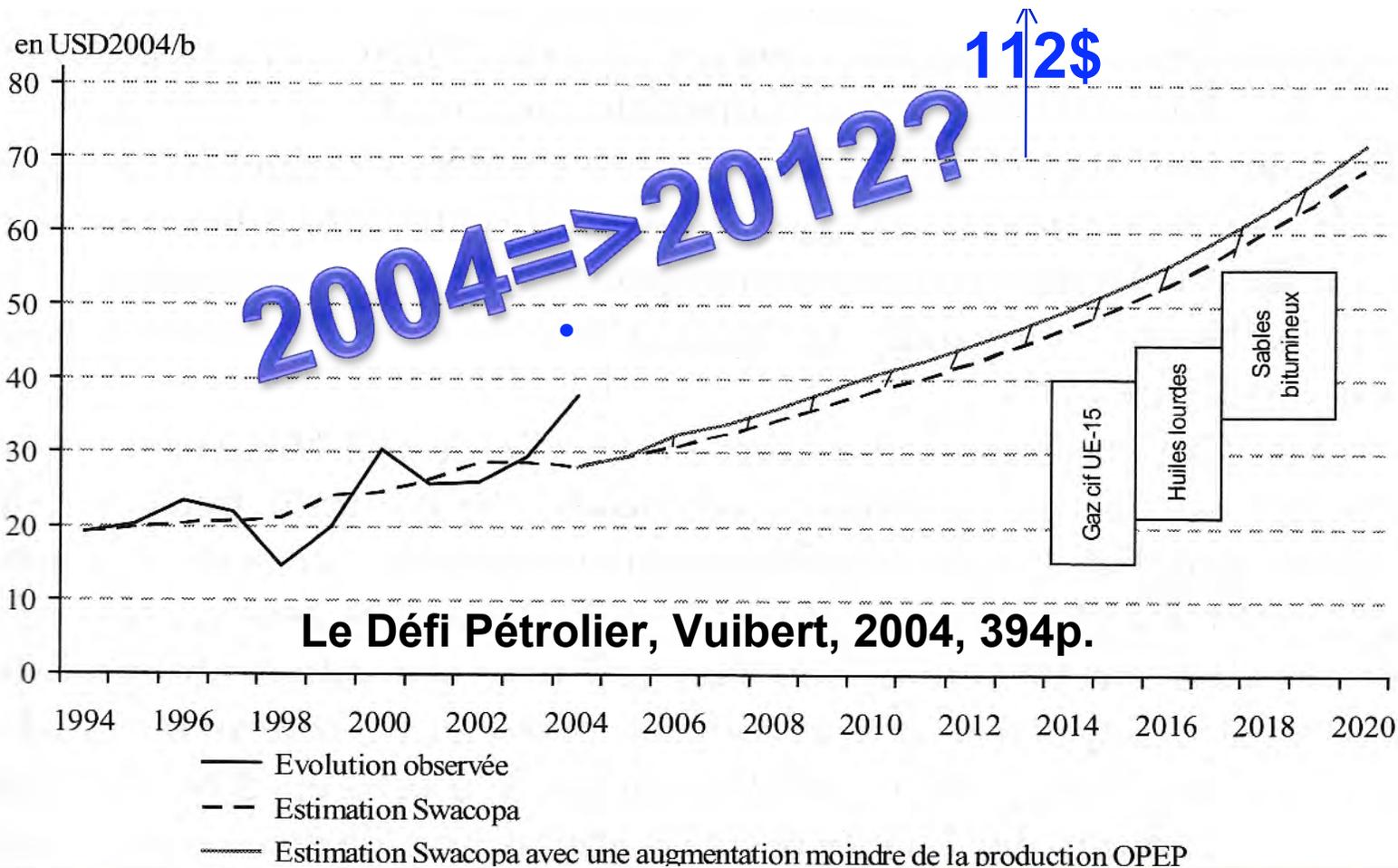
# HOW SPIKING OIL AFFECTS YOU

## VOLATILE OIL AND GAS PRICES HIT HOME IN FUEL COSTS. THEY COULD ALSO ENDANGER THE ECONOMIC RECOVERY

### UP, UP AND AWAY

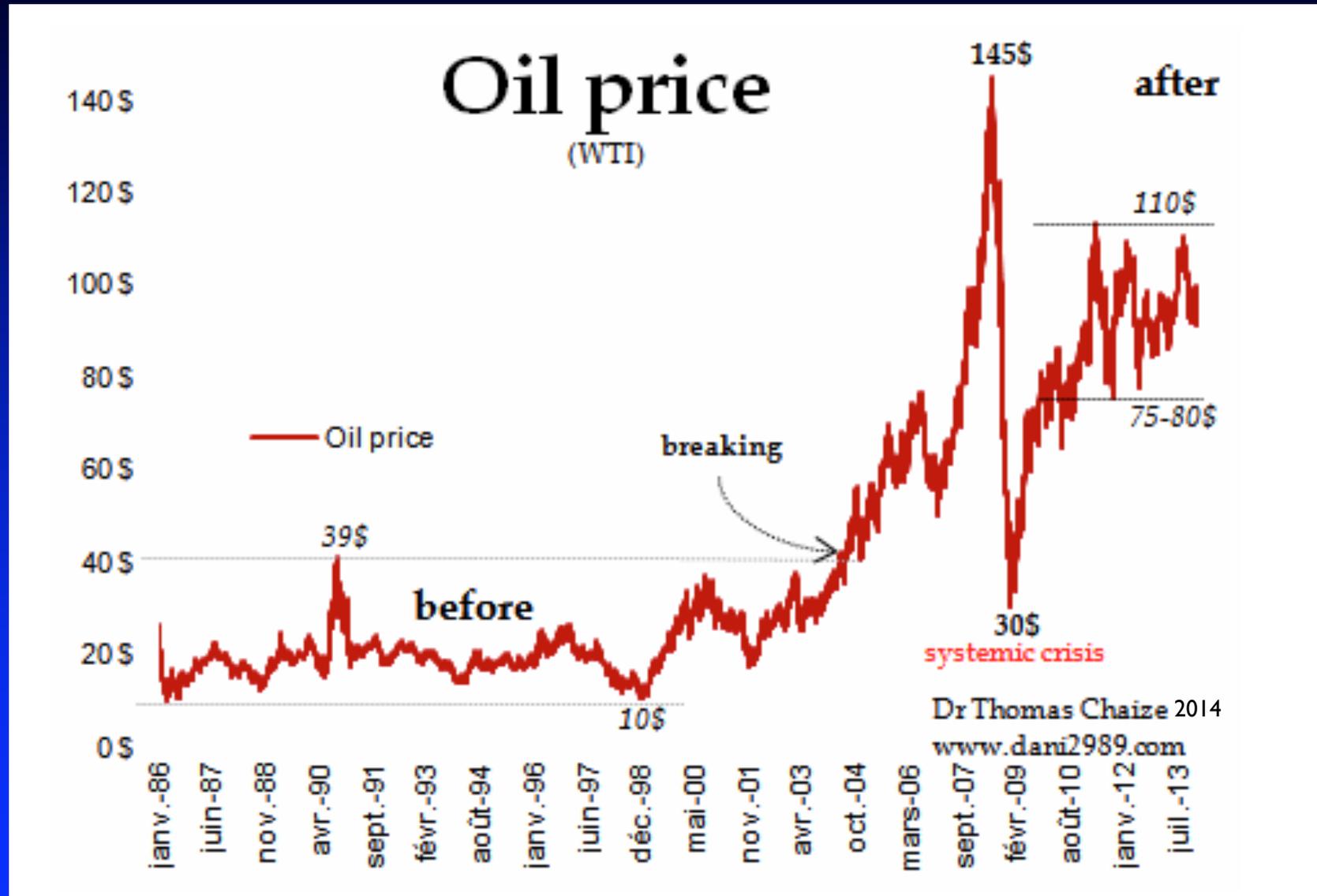
The price of a barrel of oil (in 2010 dollars) has spiked recently because of rising demand





Sadek BOUSSENA est ancien président de l'OPEP et ancien ministre algérien de l'Énergie. Jean-Pierre PAUWELS est membre du comité de direction de la Banque nationale de Belgique et ancien président de la société gazière nationale Distrigaz. Catherine LOCATELLI est docteur en sciences économiques de l'université Pierre Mendès-France de Grenoble et chargée de recherche CNRS. Carine SWARTENBROEKX est conseiller à la Banque nationale de Belgique.

# AUJOURD'HUI (2014/WTI)



## Les derniers articles sur le Prix du pétrole

### EN NOVEMBRE 2014, LE PRIX DU PÉTROLE CONTINUE SA CHUTE

En Novembre 2014, le cours du pétrole baisse encore fortement (-8,7 %), pour s'établir à 62,9 € en moyenne par prix du baril de Brent. Le

### EN OCTOBRE, LE PRIX DU PÉTROLE CHUTE ET ATTEINT SON PLUS BAS NIVEAU DEPUIS 2010

En octobre 2014, le cours du pétrole baisse fortement (-8,7 %), pour s'établir à 68,9 € en moyenne par prix du baril de Brent. Forte

### LE PRIX DU PÉTROLE CONTINUE DE BAISSER EN SEPTEMBRE 2014

En septembre, le cours du pétrole baisse nettement (-1,5 %), pour s'établir à 75,5 € en moyenne par baril de Brent. Nette baisse du

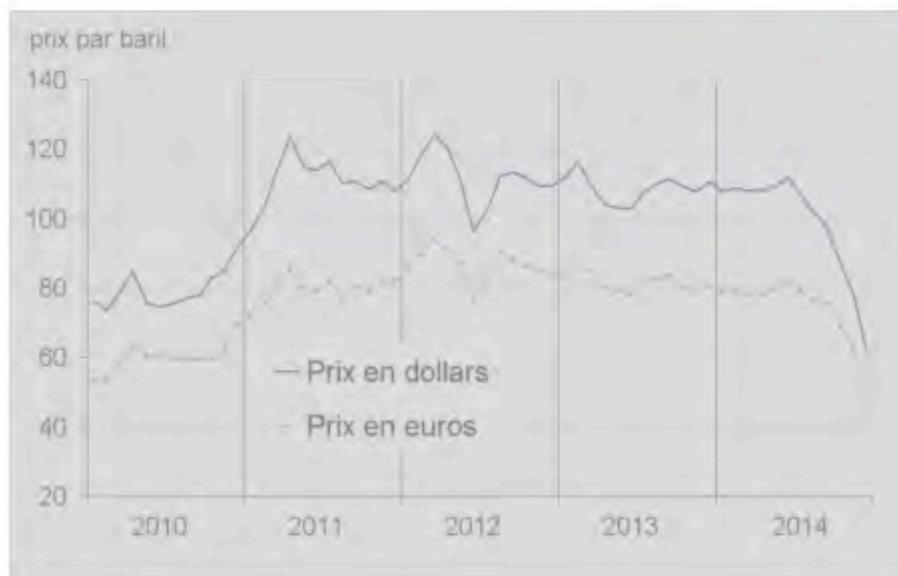
### LE PRIX DU PÉTROLE BAISSÉ CONSIDÉRABLEMENT EN AOÛT 2014

En Août 2014, le cours du pétrole baisse nettement (-3,3 %), pour se fixer à 76,6 € en moyenne par baril de Brent. Nette baisse du prix

- Voir toutes les Analyses des prix du baril

## En décembre 2014, le prix du pétrole chute de nouveau, retrouvant son niveau du début 2009

Vendredi, 16 Janvier 2015 | Commenter



En Décembre 2014, le cours du pétrole baisse encore fortement (-19,7 %), pour s'établir à 50,5 € en moyenne par prix du baril de pétrole Brent. Le cours du pétrole chute de nouveau, à un niveau inférieur de 44 % à celui de juin En Décembre, le prix du baril de pétrole de la mer du Nord (Brent) en dollars continue de baisser fortement (-20,8 % après -10,1 %). Depuis juin, il est tombé de 111,8 \$ à 62,2 \$, soit -44 ...

[Voir la suite...](#)



**OIL-PRICE.NET**  
The No.1 Oil Price Source

Distributeur électricité

Luminus baisse ses prix! Payez moins cher votre électricité

Choisir sa pub

Petrole

Future Oil

Oil Price

Oil Brent

Like 142

Pin it

g+1 5

Share 330

Tweeter 1 249

### Bienvenue sur oil-price.net

- ↳ Pétrole brut
- ↳ Tableau de bord du pétrole
- ↳ Jobs
- ↳ Newsletter
- ↳ Advertise
- ↳ Forum
- ↳ Liens
- ↳ Nous Contacter
- ↳ Sauver

Tableau de Bord (Dashboard) du Pétrole pour votre site

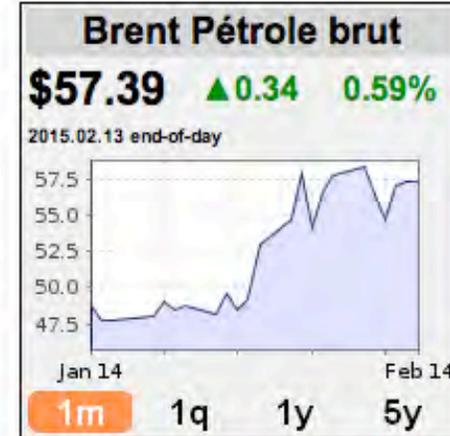
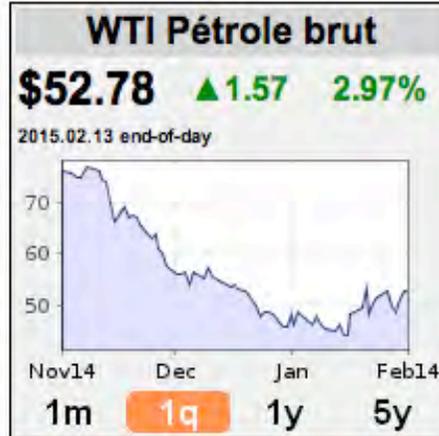
© Oil-price.net. All rights reserved.

**FINNAIR**

UW SNELSTE  
ROUTE NAAR

**AZIE**

Samedi 14 Février 2015 - 03:24:19



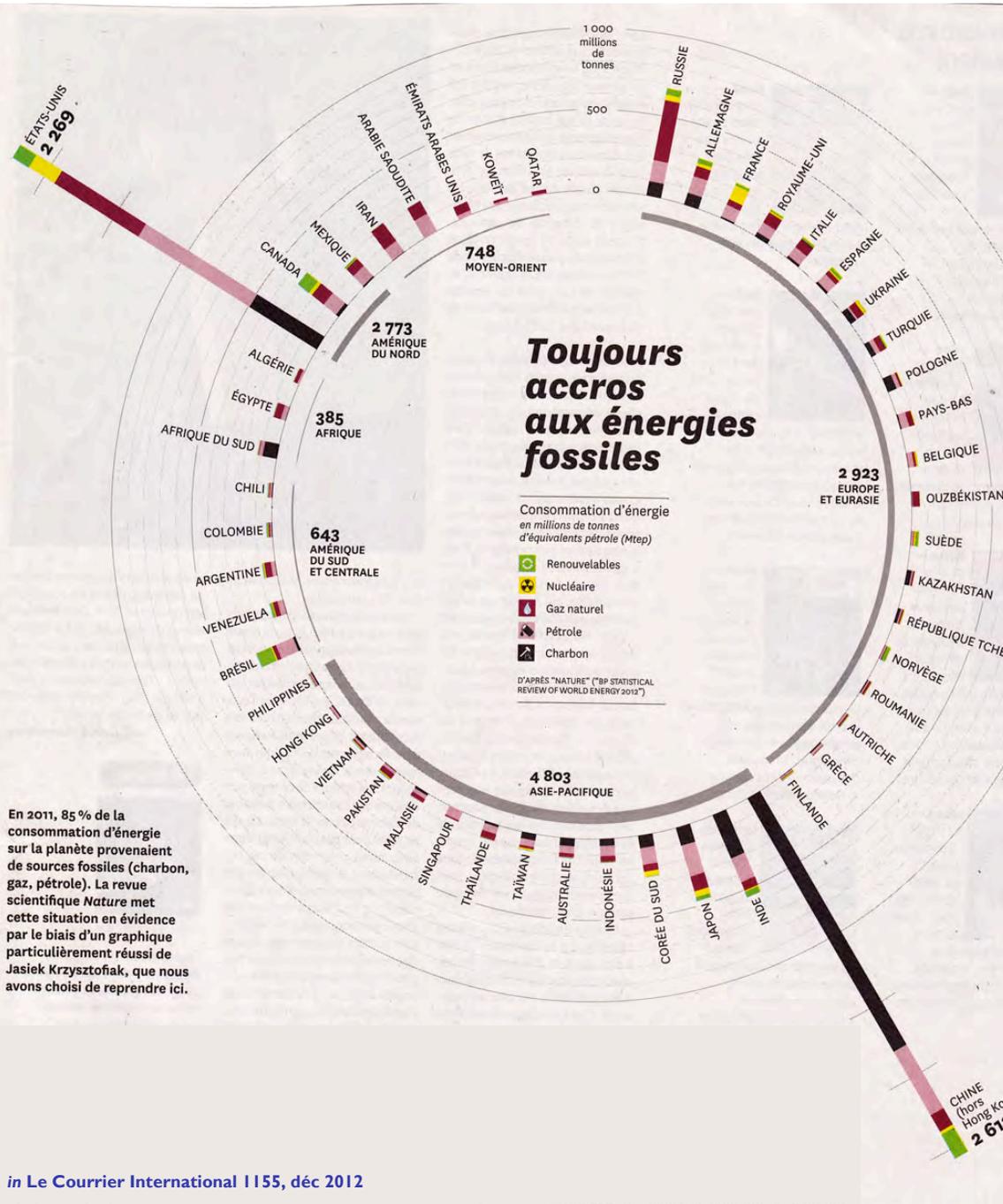
### Markets World Facile

50€ Offerts / Ouverture de Compte! Gagnez 89% avec Option Binaire ici.

Prix du pétrole par OIL-PRICE.NET

Prix	Var.
2015.02.13 - \$ 52.78	▲ 1.57 2.97% ▲
Prévision d'un an	
\$60 / Baril	

Tableau de Bord (Dashboard) du Pétrole pour votre site



En 2011, 85% de la consommation d'énergie sur la planète provenaient de sources fossiles (charbon, gaz, pétrole). La revue scientifique *Nature* met cette situation en évidence par le biais d'un graphique particulièrement réussi de Jasiak Krzysztofak, que nous avons choisi de reprendre ici.

© 2012 THE NEW YORK TIMES

85% E primaire  
12,3 Gtep 2011  
12,7 Gtep 2013

## Vers un bouleversement du marché du gaz ?

Le gaz naturel est le seul combustible fossile dont la demande dépasse en 2035 celle de 2008, quels que soient les scénarios. La demande de la Chine est celle qui devrait progresser le plus, avec une demande qui devrait passer de 130 milliards de m<sup>3</sup> en 2011 à 545 milliards de m<sup>3</sup> en 2035. Parallèlement, l'exploitation de gaz non conventionnel (gaz de schiste) devrait bouleverser le marché du gaz avec l'émergence de

nouveaux pays exportateurs (États-Unis) et de nouveaux flux commerciaux plus diversifiés, faisant pression sur les fournisseurs de gaz conventionnels et sur les mécanismes traditionnels de prix liés au pétrole pour le gaz. Cependant, ce secteur n'en est encore qu'à ses débuts, et il existe de nombreuses incertitudes quant à l'étendue et à la qualité de la base des ressources de gaz non conventionnel.

Source : AIE

### Projection des demandes énergétiques à l'horizon 2035 (millions de tonnes d'équivalent pétrole)

Type d'énergie	1990	2010	2020 Scénario politique actuelle	2035 Scénario politique actuelle	2020 Scénario nouvelles politiques	2035 Scénario nouvelles politiques
Charbon	2 231	3 474	4 417	5 523	4 082	4 218
Pétrole	3 230	4 113	4 542	5 053	4 457	4 656
Gaz	1 668	2 740	3 341	4 380	3 266	4 106
Nucléaire	526	719	886	1 019	898	1 138
Énergie hydraulique	184	295	377	460	388	488
Biomasse et déchets	903	1 277	1 504	1 741	1 532	1 881
Autres énergies renouvelables	36	112	265	501	299	710
<b>TOTAL</b>	<b>8 779</b>	<b>12 730</b>	<b>15 332</b>	<b>18 676</b>	<b>14 922</b>	<b>17 197</b>

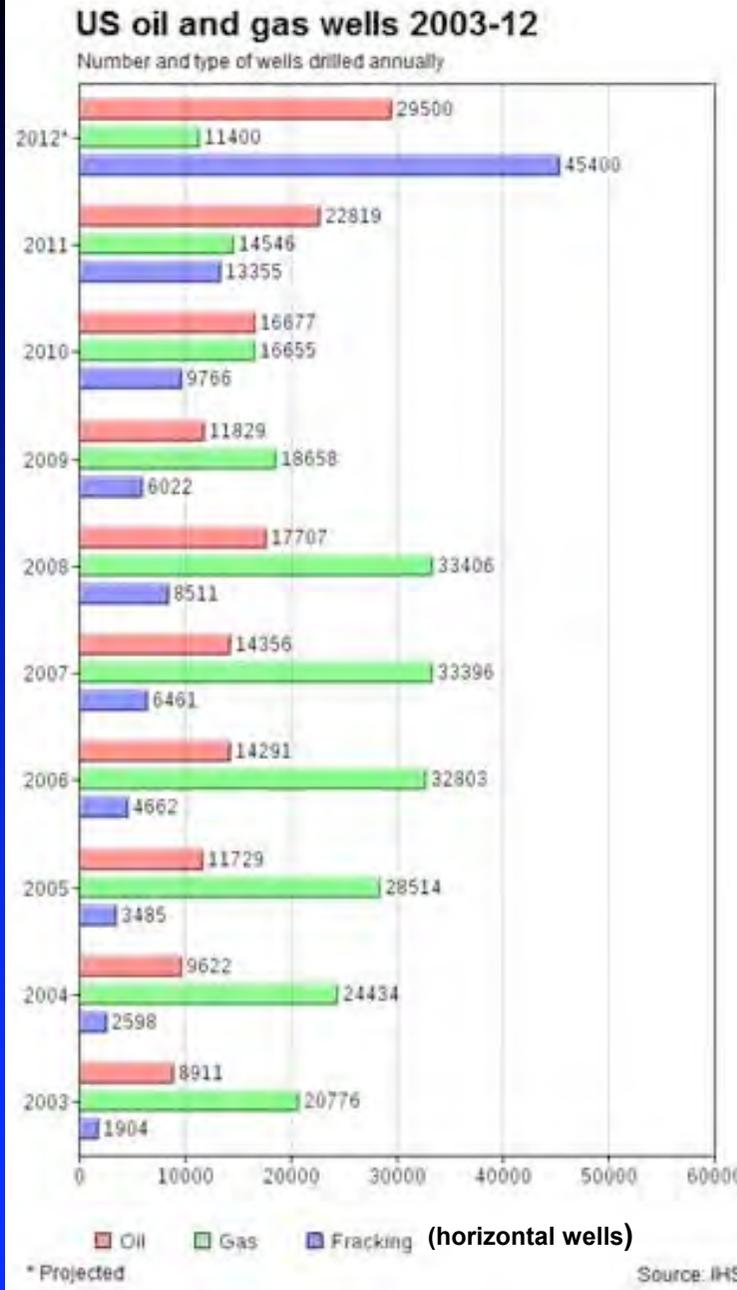
**nc WELLS**  
**2003-2012**  
**102,164 wells**  
**(millions of frackings)**

**c gas = opposite trend**

**500 000 frackings in 2012**  
**= 220Gm<sup>3</sup> or 1/3 gas prod USA**  
**(2% en 2000)**

[http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/sediment/pages\\_perso/Preat\\_fichiers/SPS310\\_ap.pdf](http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/sediment/pages_perso/Preat_fichiers/SPS310_ap.pdf)

<http://www.nbcnews.com/business/power-shift-energy-boom-dawning-america-1C8830306>



**45,400 wells**

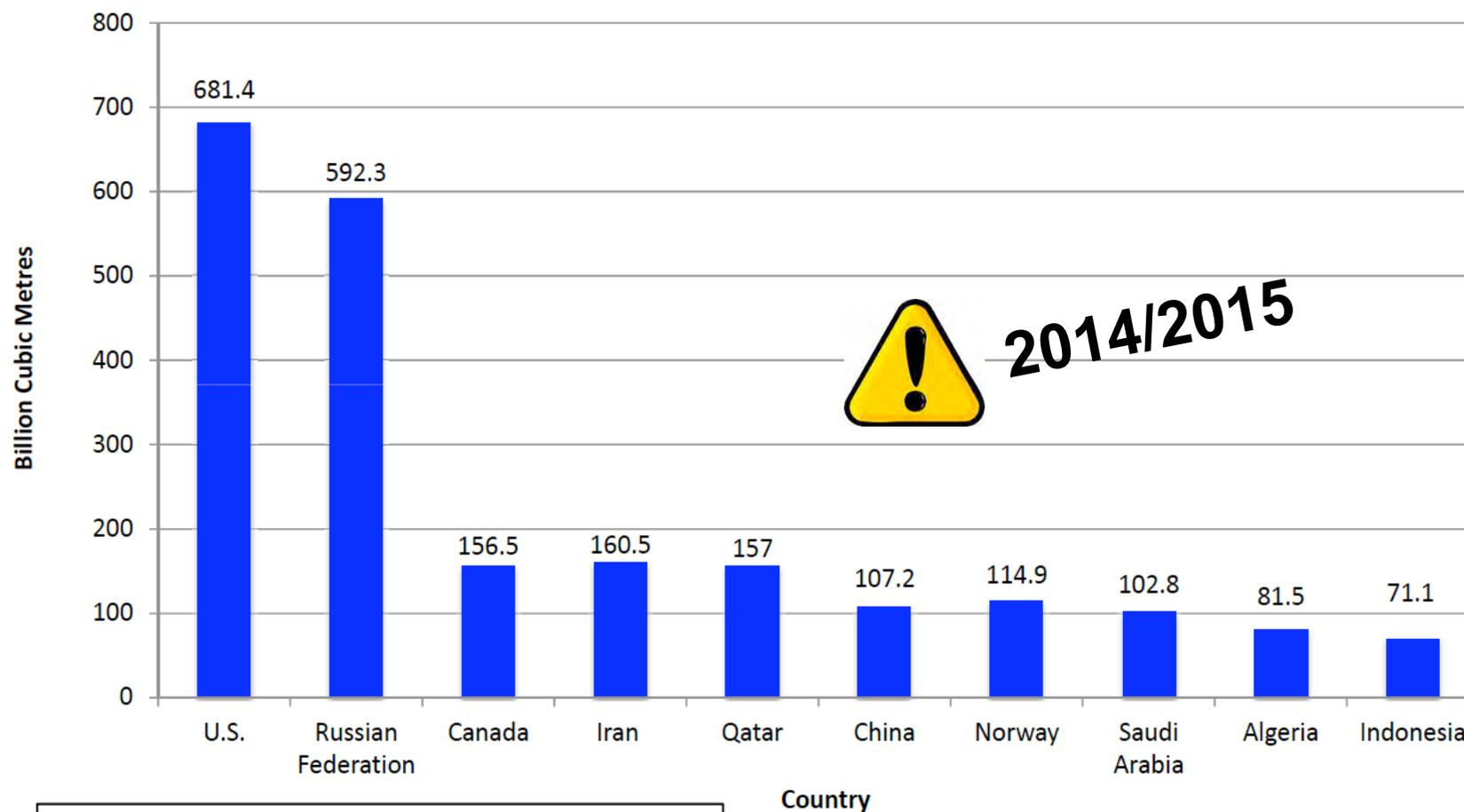
**in 10 yrs**  
**x ≈ 25**



**2014/2015**

**1904 wells**

## Top Natural Gas Producing Countries in 2012



Source: BP Statistical Review of World Energy June 2013

## MATIERE ORGANIQUE : ASPECT MACROSCOPIQUE



Déblais de “black shales” d’âge Silurien  
(Anti-Atlas, Maroc)



« Oil shales » d’âge Campanien-  
Maastrichtien (Jordanie)

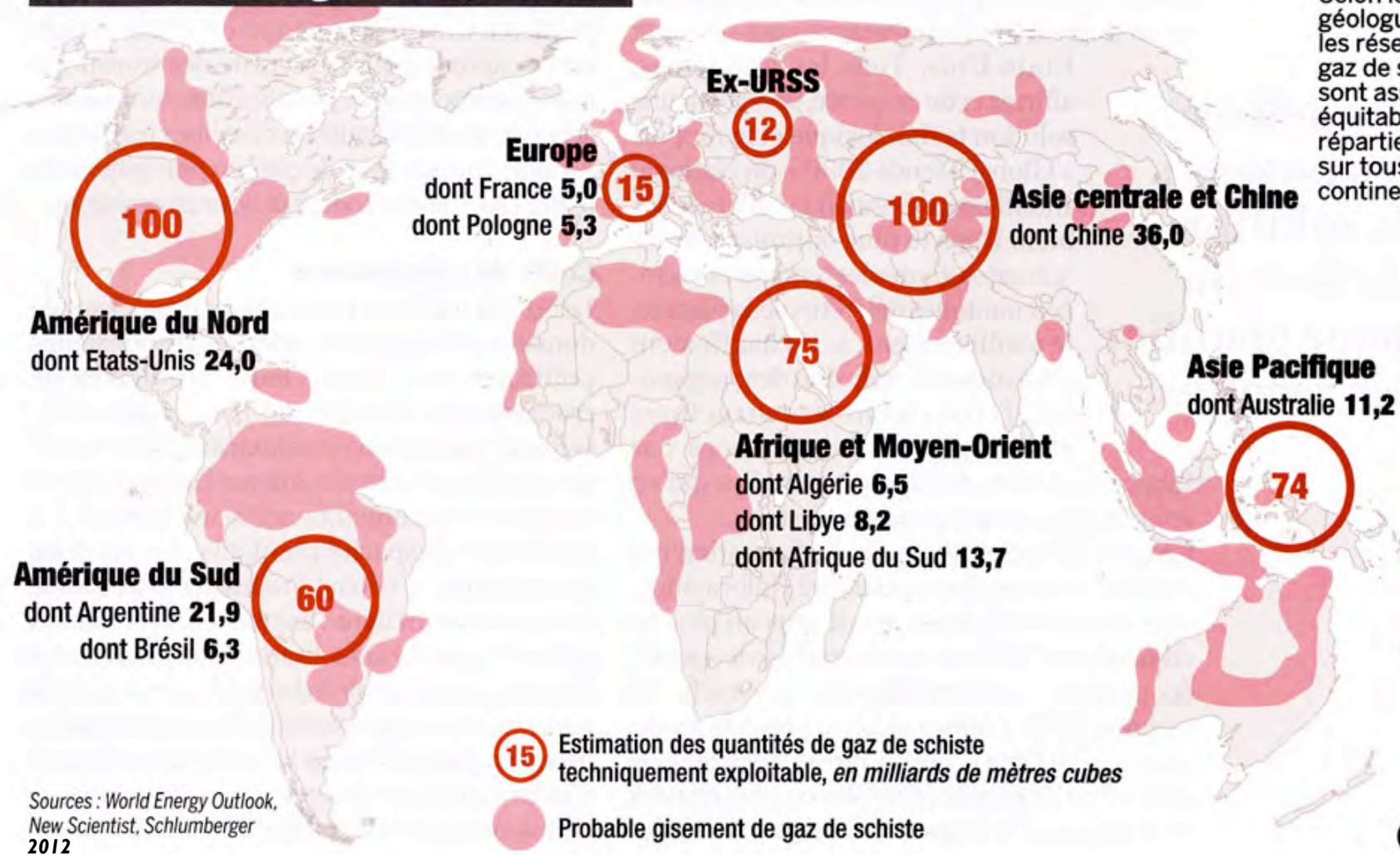
<http://www.blackshale.com/>



.....  
Total Professeurs Associés

GEOL F-510 L. de Walque / A. Préat – 2008

## Le miracle du gaz de schiste



Selon les géologues, les réserves de gaz de schiste sont assez équitablement réparties sur tous les continents.

Sources : World Energy Outlook, New Scientist, Schlumberger 2012

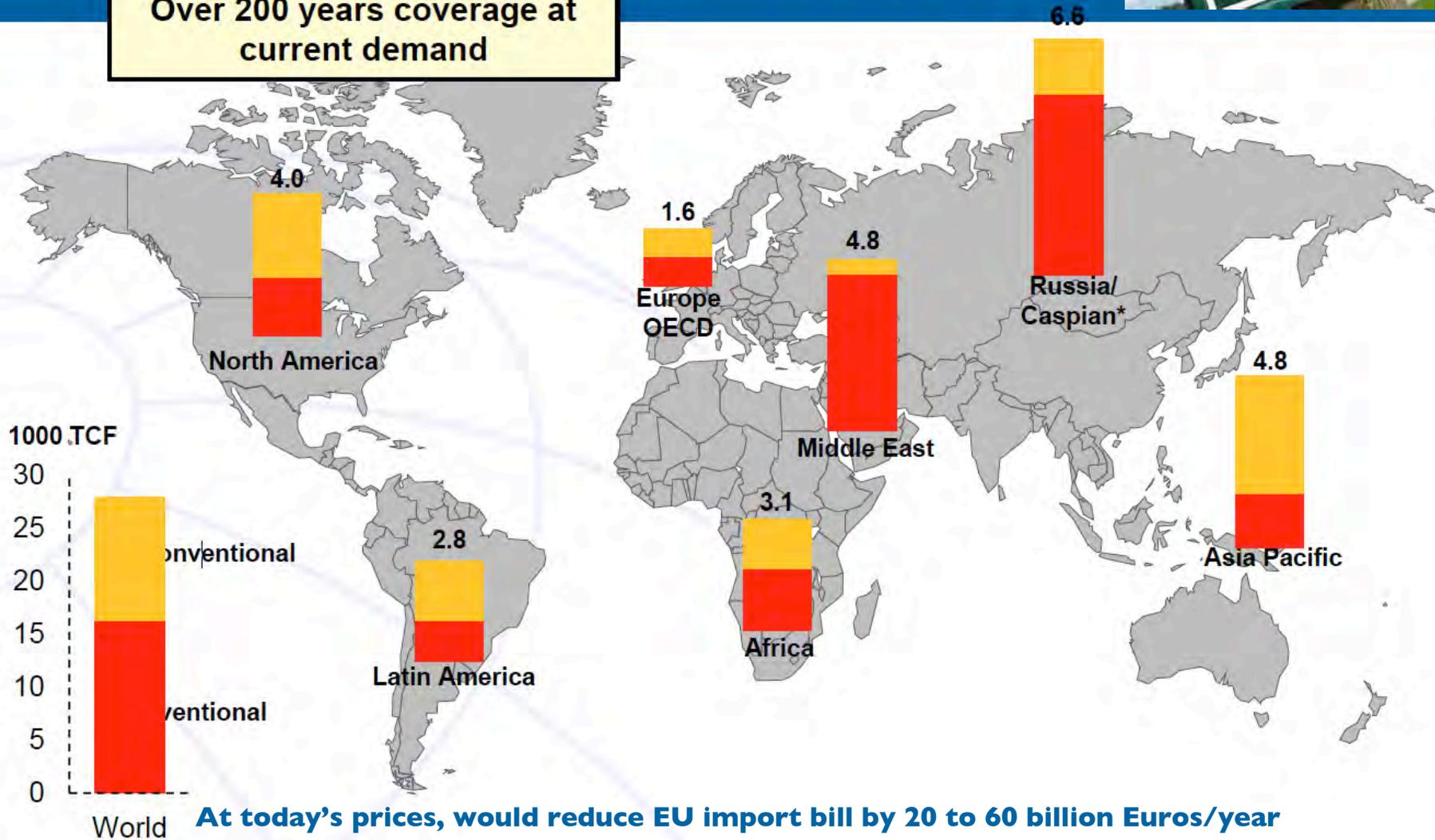


cf Conférence Académie Royale Belgique : La surprise du gaz non conventionnel, Furfari S & Prétat A, 2012  
 cf Conférence du 11/02/2014 : Aspects Exploitation et Environnement des gaz de schistes, Prétat 2014  
[http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/sediment/pages\\_perso/Preat.html](http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/sediment/pages_perso/Preat.html)

# Remaining Global Gas Resource



Over 200 years coverage at current demand



From Baeckelmans, Exxon 2013

Source: IEA; \*Includes Europe Non OECD

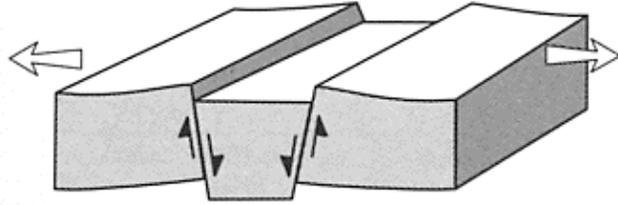
C

Y

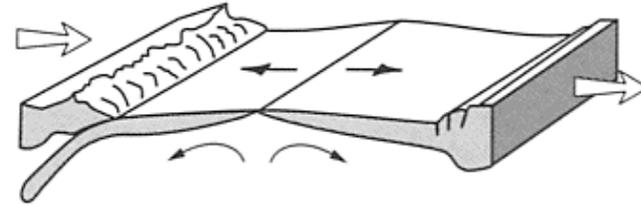
C

L

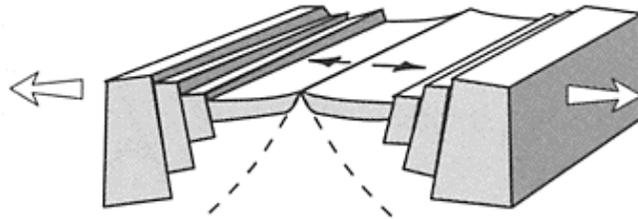
E



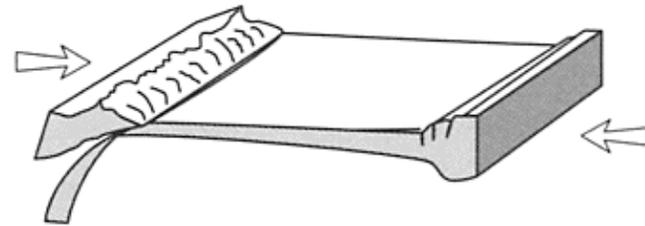
RIFT INTRACRATONIQUE (1)



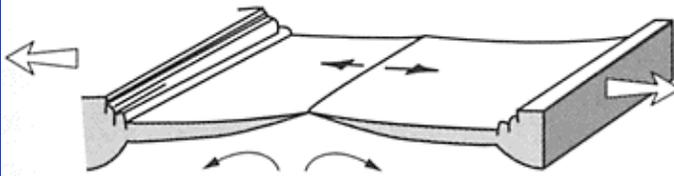
SUBDUCTION (4)



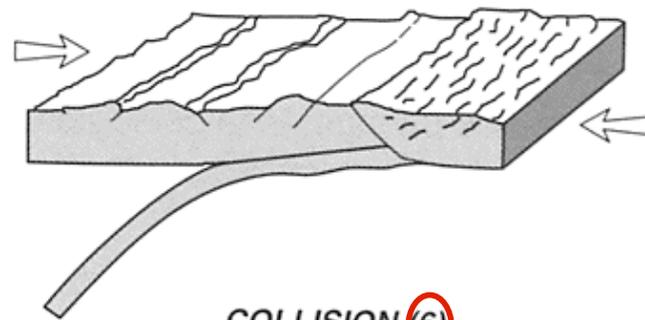
RIFT OCÉANIQUE (2)



SUBDUCTION DE LA RIDE OCÉANIQUE (5)



STADE OCÉAN (3)



COLLISION (6)

W

I

L

S

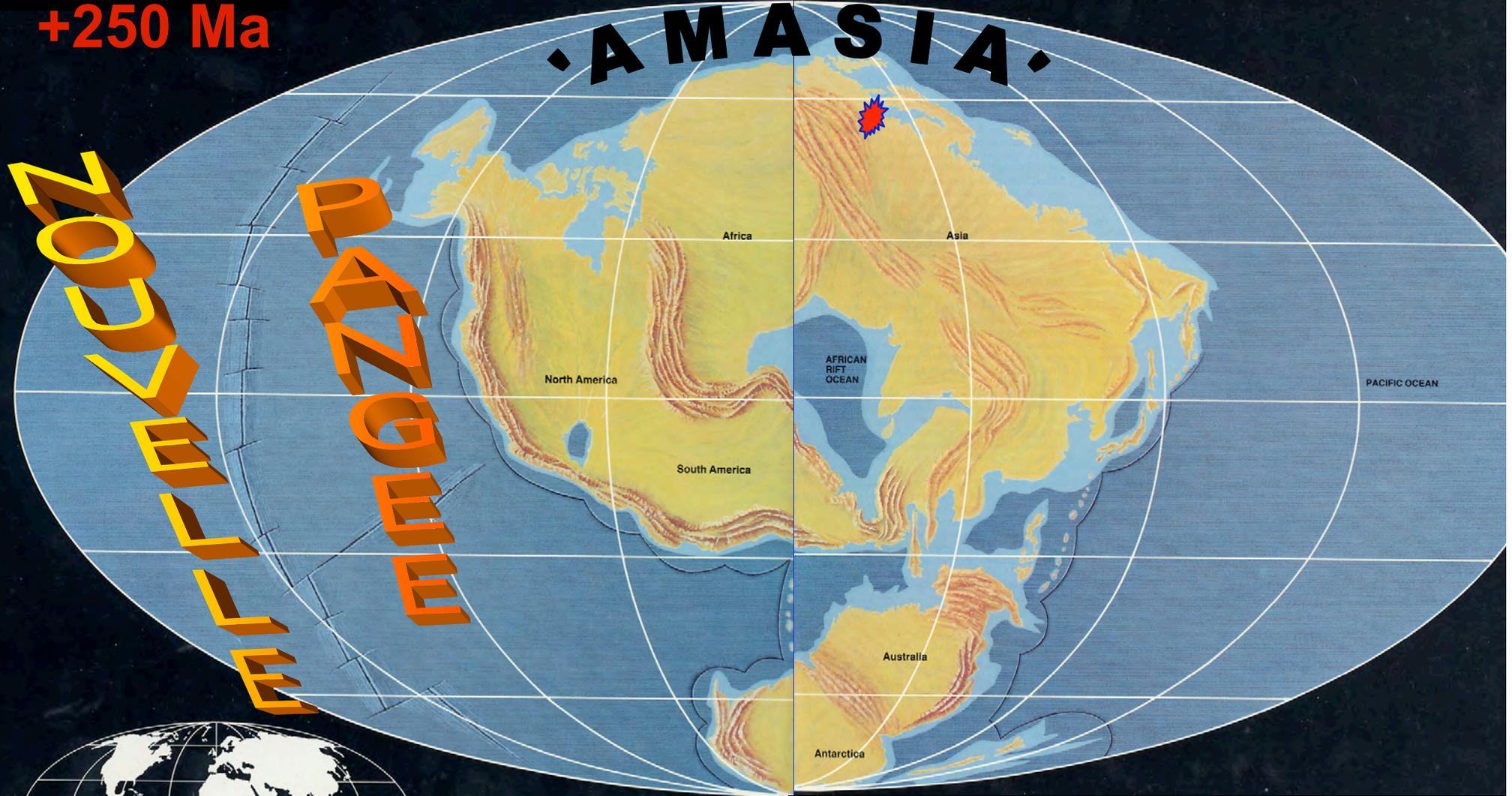
O

Z

**+250 Ma**

# • AMASIA •

**MIFFMKECOZ**  
**MMGZAP**





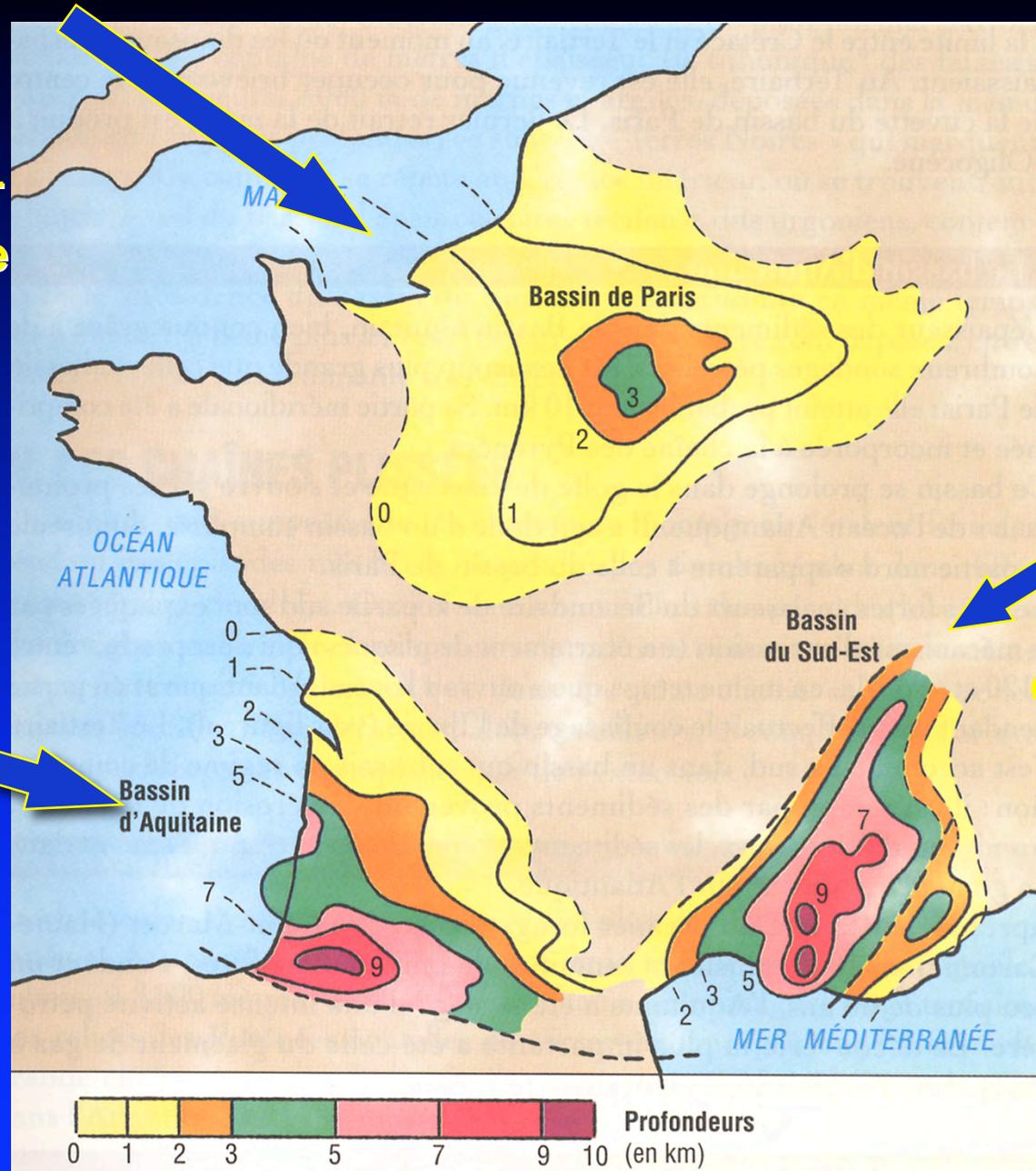
QUELQUES  
*LES ENERGIES FOSSILES*  
EXEMPLES

**LES BASSINS : CAS REELS DE SYSTEMES PETROLIERS**

**TRIAS-ACTUEL**  
**'intracratonique**

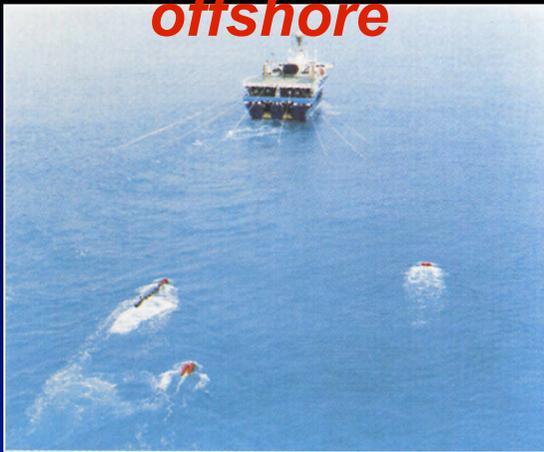
**Extension Atl**  
**Coulissage**  
**Ibérie**

**Tr-K**  
**Extension**  
**Compression**  
**(Pyrénées**  
**et Alpes)**



Sabouraud 2004

*offshore*



# SISMIQUE

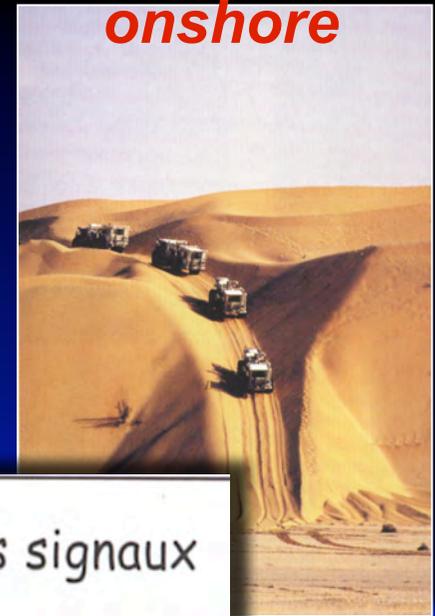
# REFLECTION

...ou (essayer de) lever

les incertitudes géologiques...

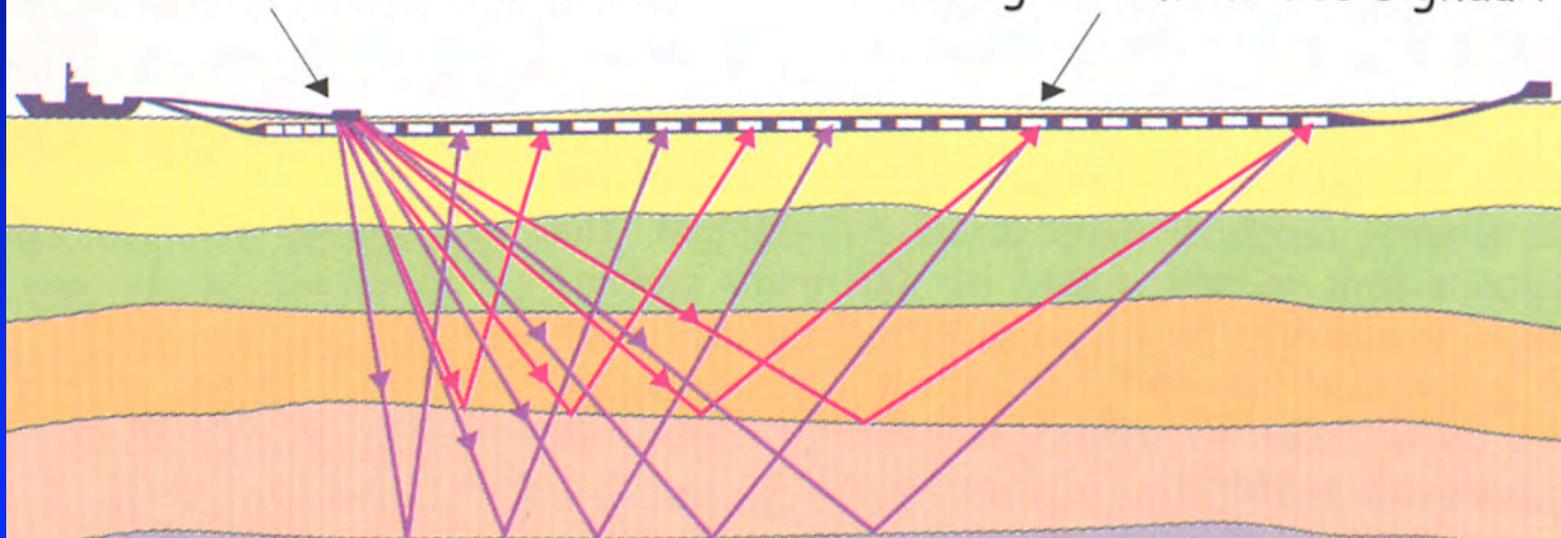
[=9/10ème du budget explo]

*onshore*



Source d'émission des ondes

Enregistrement des signaux

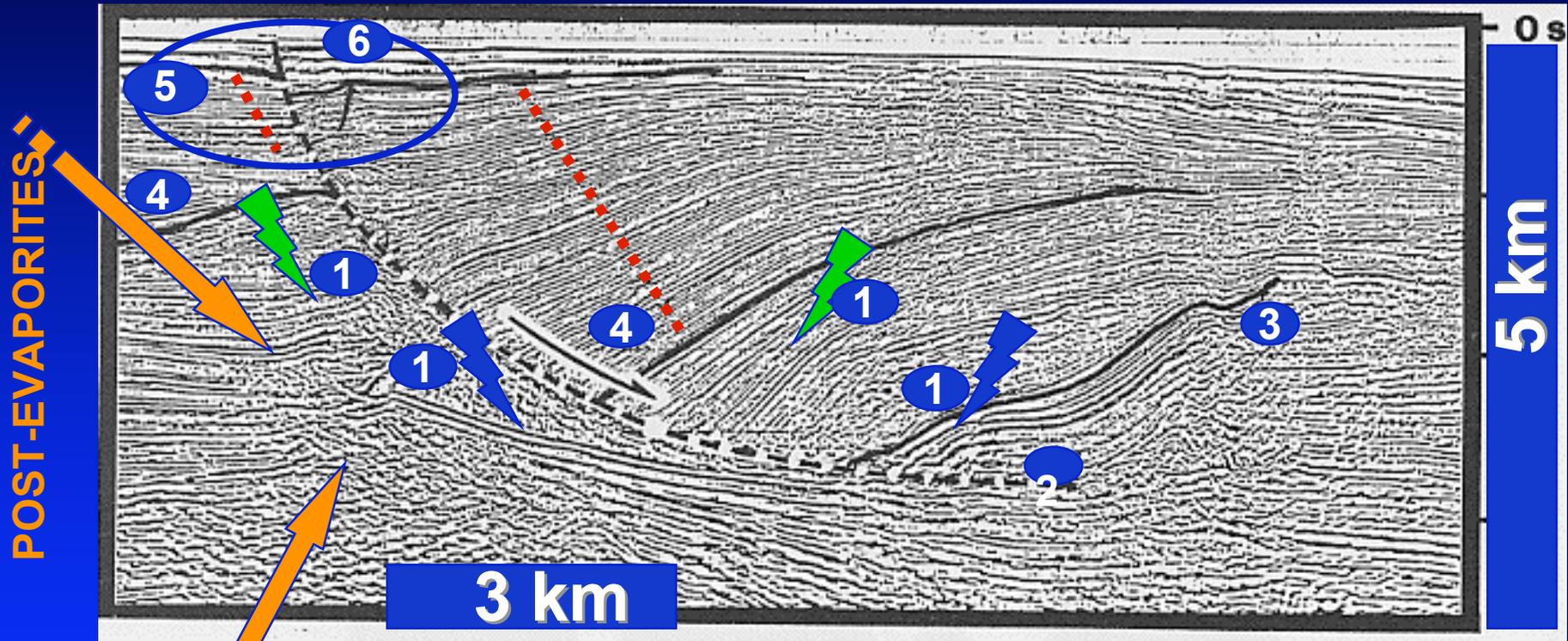


Imagerie sismique par onde de surface = IMPEDANCE càd produit de la vitesse de l'onde par la densité des terrains (roches), délimitation des interfaces [différentes résolutions]...

Bois de la Tour  
2004

HALOCINESE : déformations et percements 'salifères' (forte plasticité ==> décollement)

**Extension (rift) le long d'une faille courbe  
ou faille listrique: rotation-glissement des couches**



Faure & Chermette 1989

**Profil sismique réflexion (±20kmx5km)**

**1 réflexion = env. 100m d'épaisseur (sismique conventionnelle 60-120m)**

[sismique THR: 1-2 m, plus petite surface et profondeur 50-200m, HR 15-20m...]

**PRE-EVAPORITES**

**nb Evaporites = roches salifères = sulfates, chlorures, bromures...**

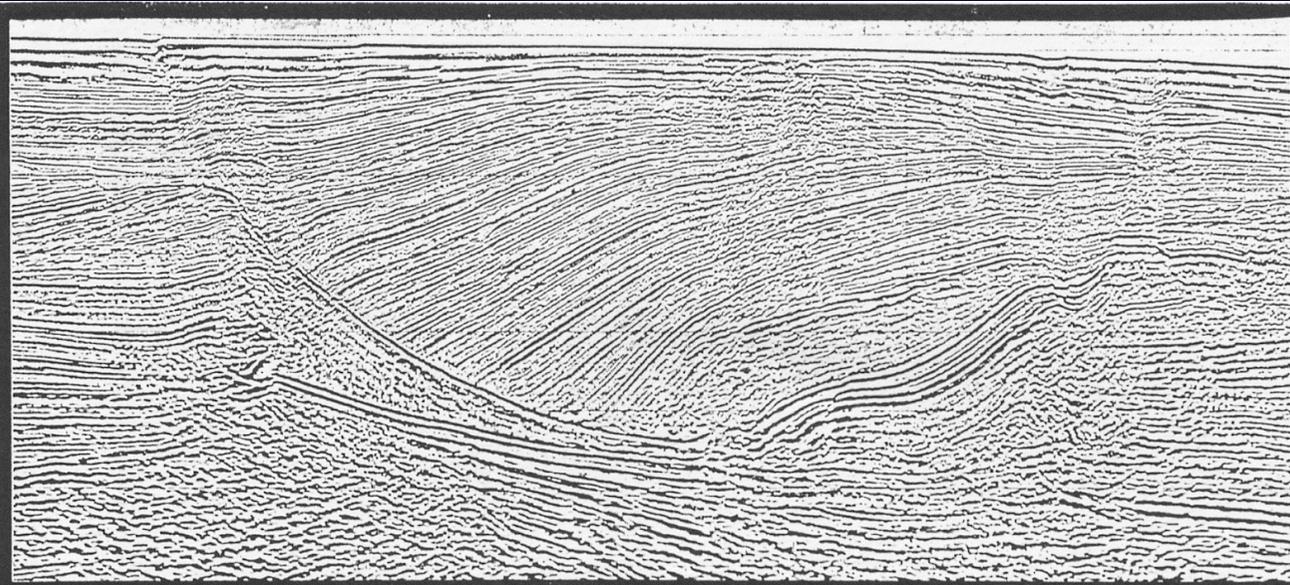
Une faille n'est jamais isolée  
=  
'champ de failles'  
ou  
réseaux conjugués  
à toutes les échelles  
...

Failles  
synthétiques  
dans le sens du  
pendage des couches  
><

Failles  
antithétiques

Faille listrique  
ou 'faille courbe'  
concave vers le haut,  
plane et horizontale  
en profondeur  
[= rift, basculement,  
rotation...]

Graben  
= fossé d'effondrement  
[suite à une activité  
tectonique d'extension]



5 km

Extension (rift) le long d'une faille courbe  
ou faille listrique: rotation-glissement des couches

TWT

Failles  
Planes  
et  
Verticales

Faure & Chermette 1989

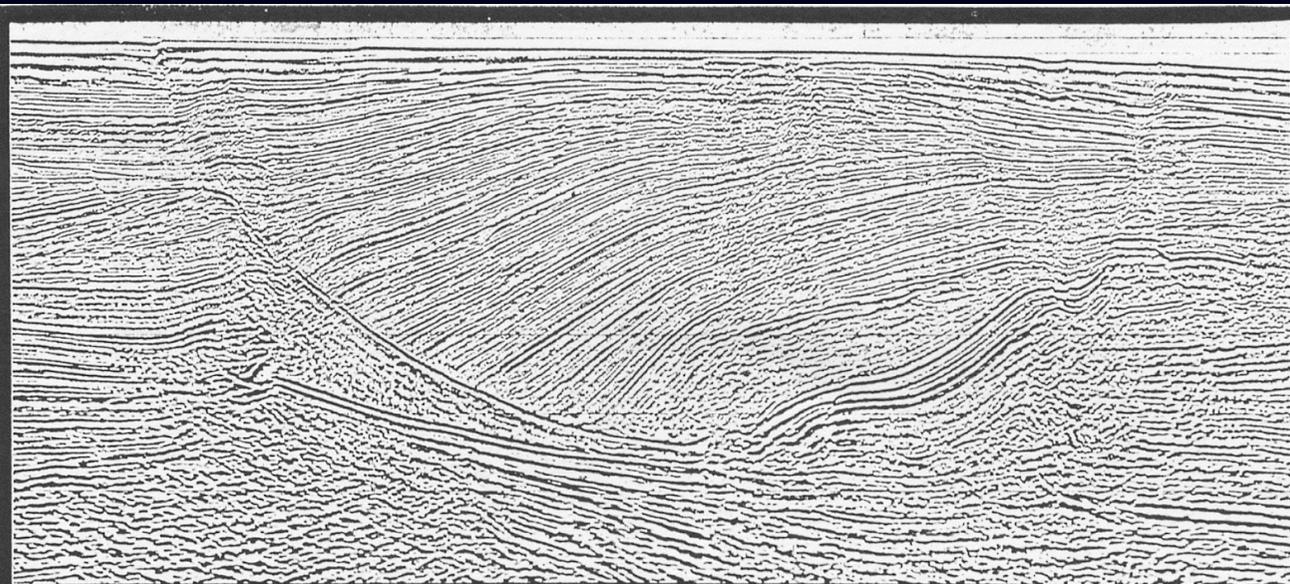
Une faille n'est jamais isolée  
 =  
 'champ de failles'  
 ou  
 réseaux conjugués  
 à toutes les échelles  
 ...

Failles synthétiques  
 dans le sens du pendage des couches  
 ><

Failles antithétiques

Faille listrique ou 'faille courbe' concave vers le haut, plane et horizontale en profondeur  
 [= rift, basculement, rotation...]

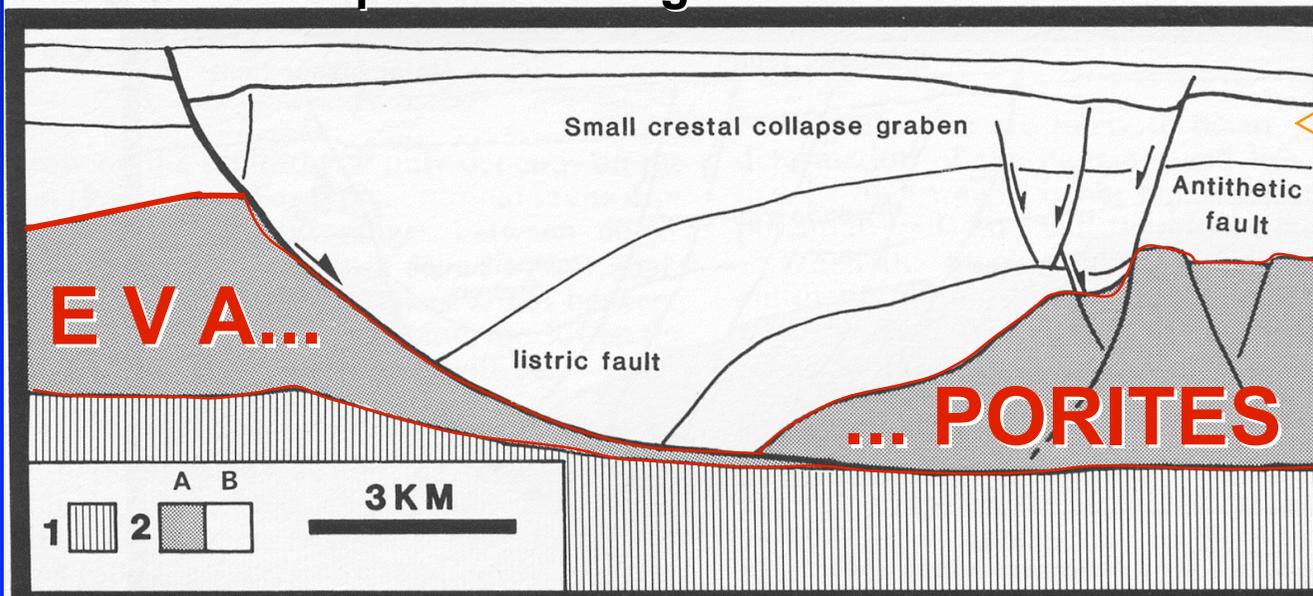
Graben = fossé d'effondrement [suite à une activité tectonique d'extension]



5 km

Extension (rift) le long d'une faille courbe ou faille listrique: rotation-glisserment des couches

TWT

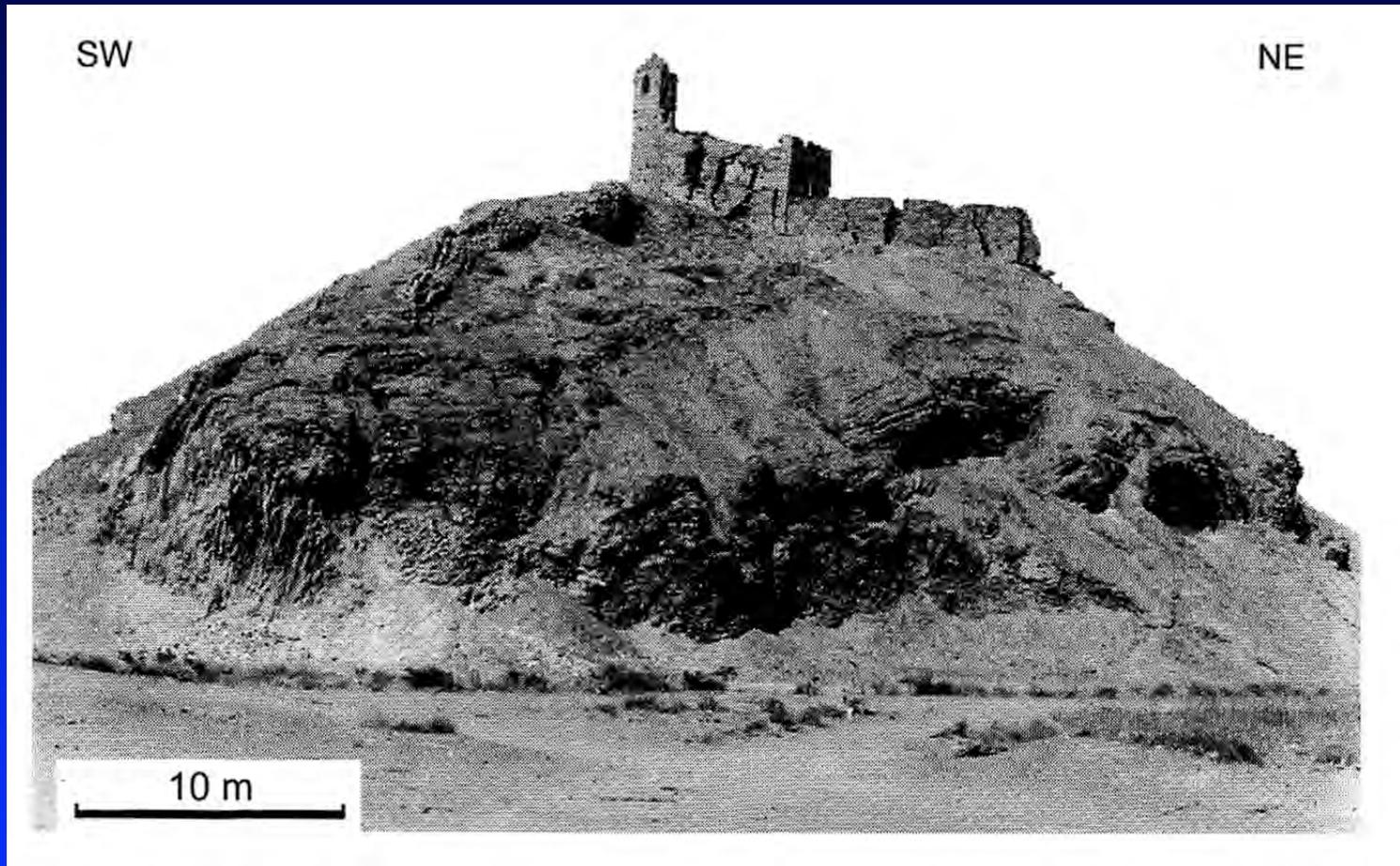


5 km

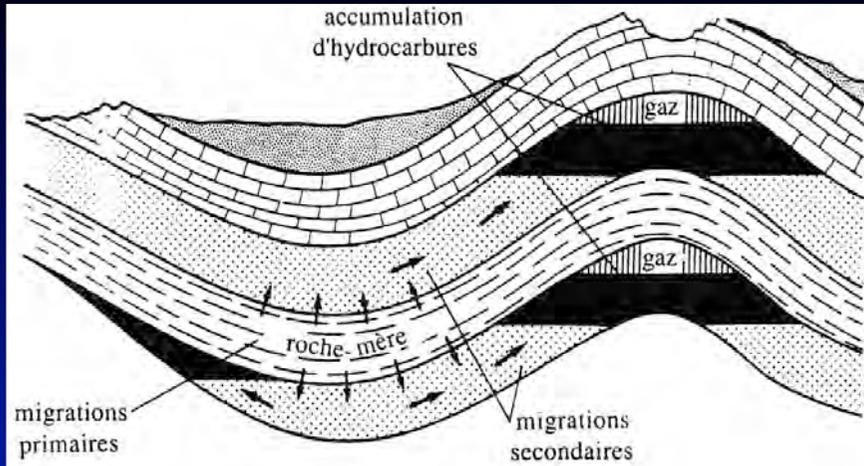
Failles Planes et Verticales

Faure & Chermette 1989

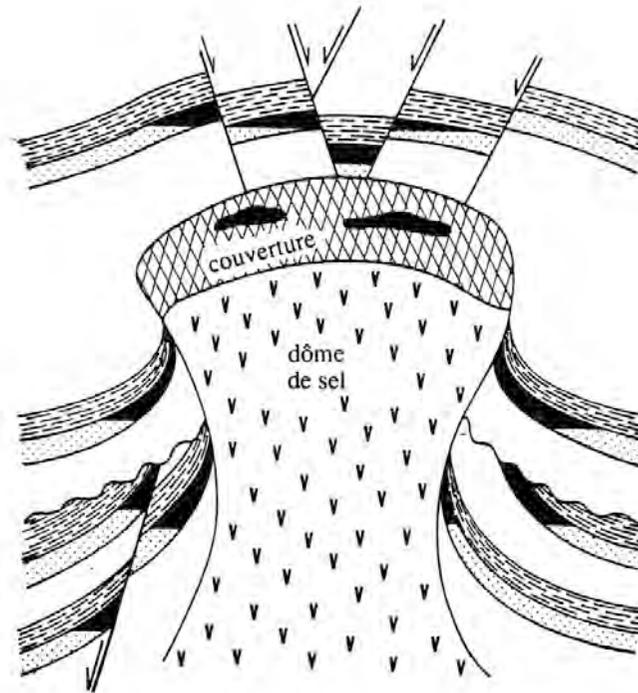
## TEMOIN (INATTENDU) DE DEFORMATION FRAGILE-DUCTILE



DIAPIR JABAL AL MIHL -YEMEN  
FENTES VERTICALES D'EXTENSION DANS MOSQUEE CONSTRUITE IL Y A 100 ANS  
= étirement de 14% accomodé par des failles normales [ $\pm 0.1\text{mm/an} = 100\text{m/Ma}$ ]



PIEGE 'SEDIMENTAIRE'  
(DIAGENESE/25%)

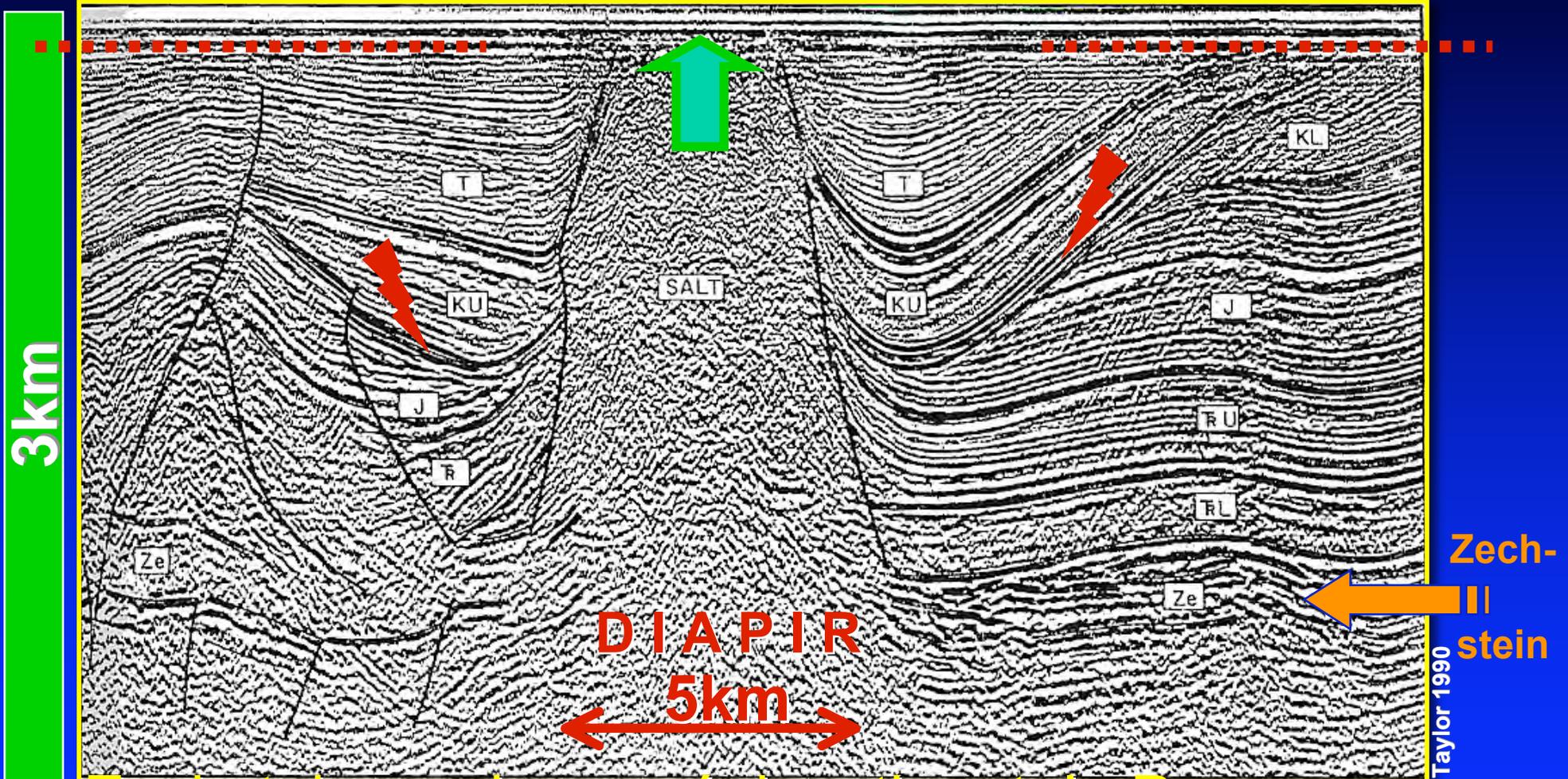


PIEGE 'STRUCTURAL'  
(ANTICLINAL/75%)

100' m-km

Tissot in Caron et al 1989

# Halocinèse Crétacé - Tertiaire inférieur [135-55Ma]

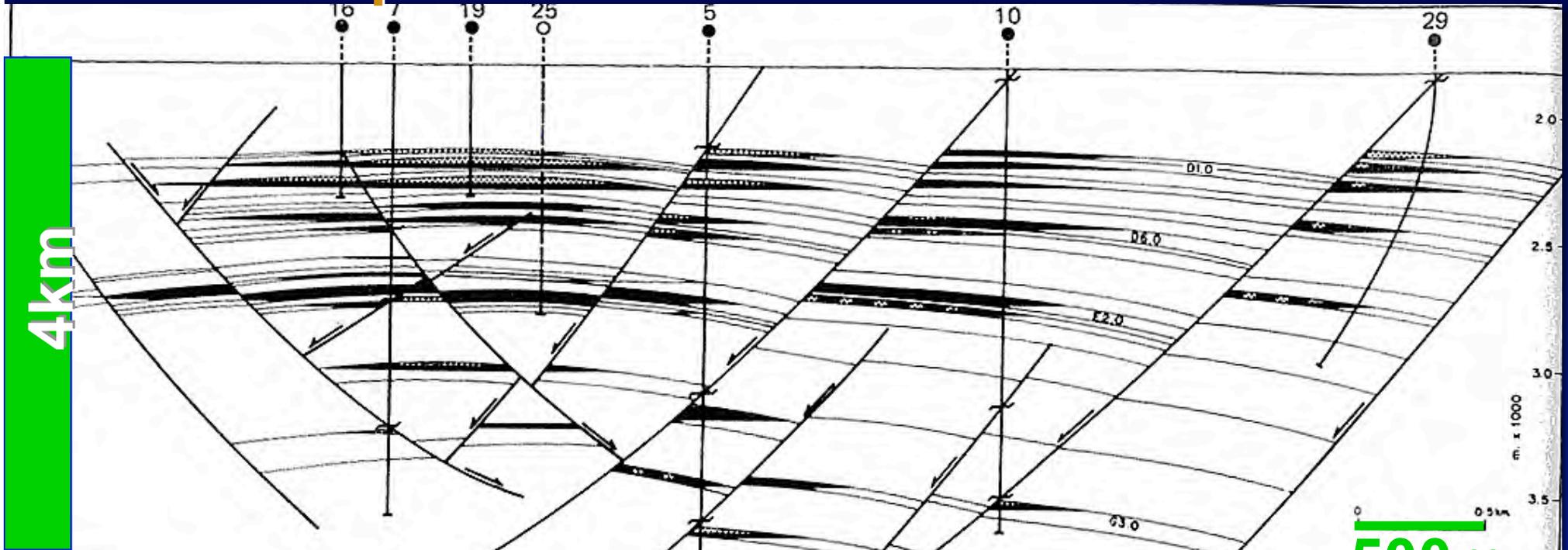


Zechstein = gde mer épicontinentale Pm sup [245Ma]  
Profil sismique réflexion, Mer du Nord

[25kmX3km] Résolution ± 15m

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

## puits NIGERIA



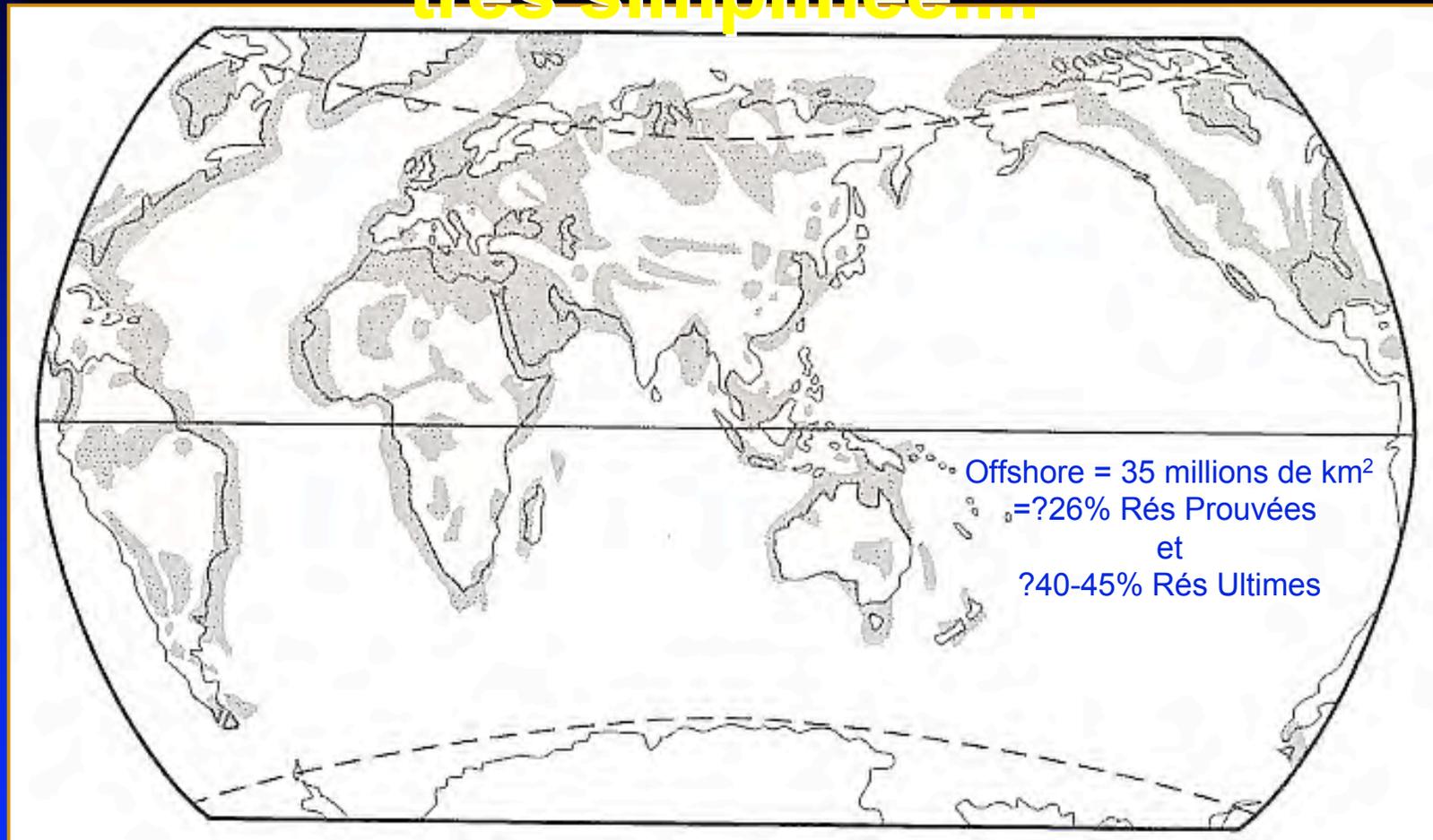
Nelson 1980

'Nembe Creek Structure' = anticlinal complexe 15kmL X 6kmI  
fortement faillé (réseaux conjugués) ==> blocs faillés

**NET OIL SDST = 11 intervalles totalisant 145 m**

**NET GAS SDST = 8 intervalles totalisant 87 m**

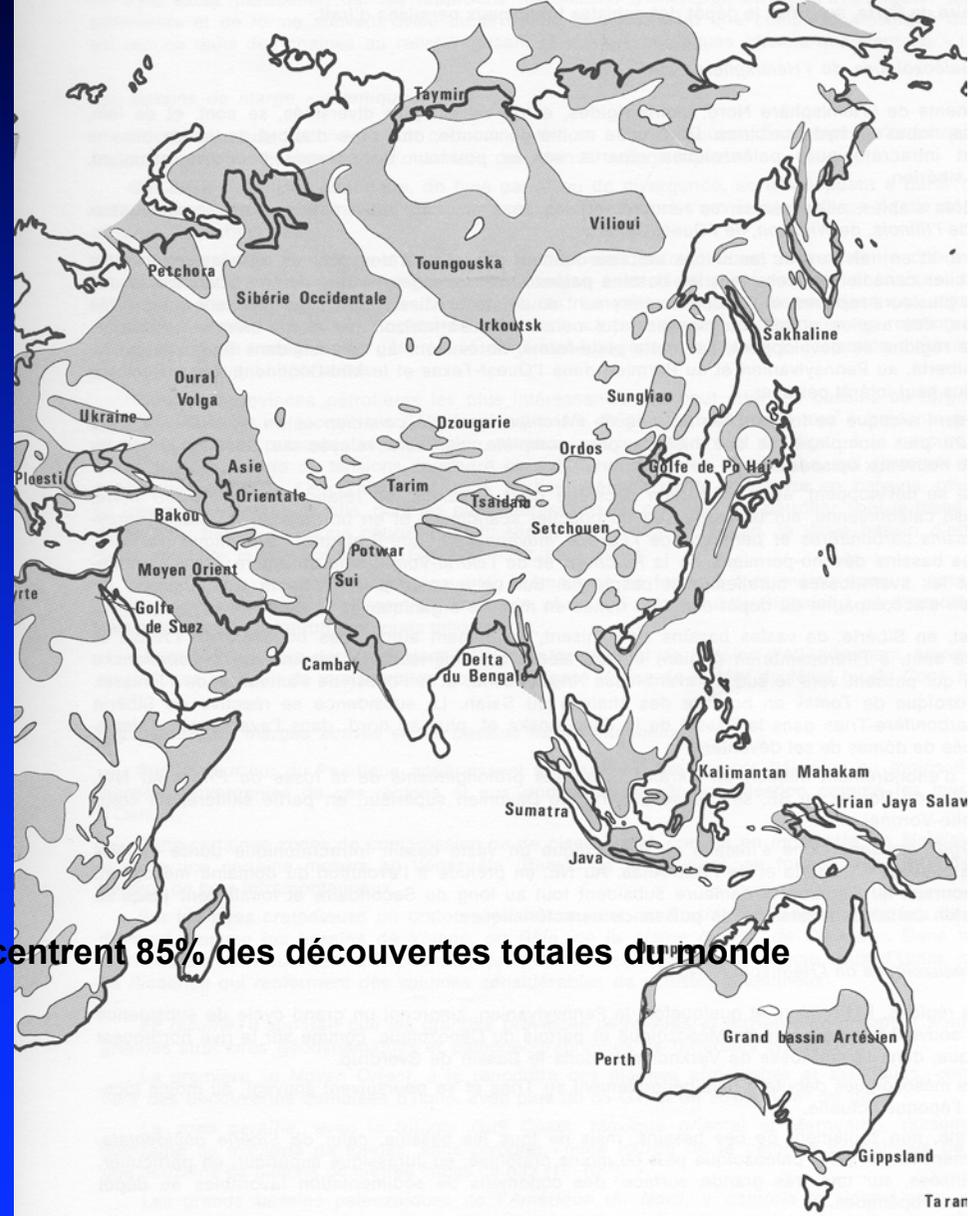
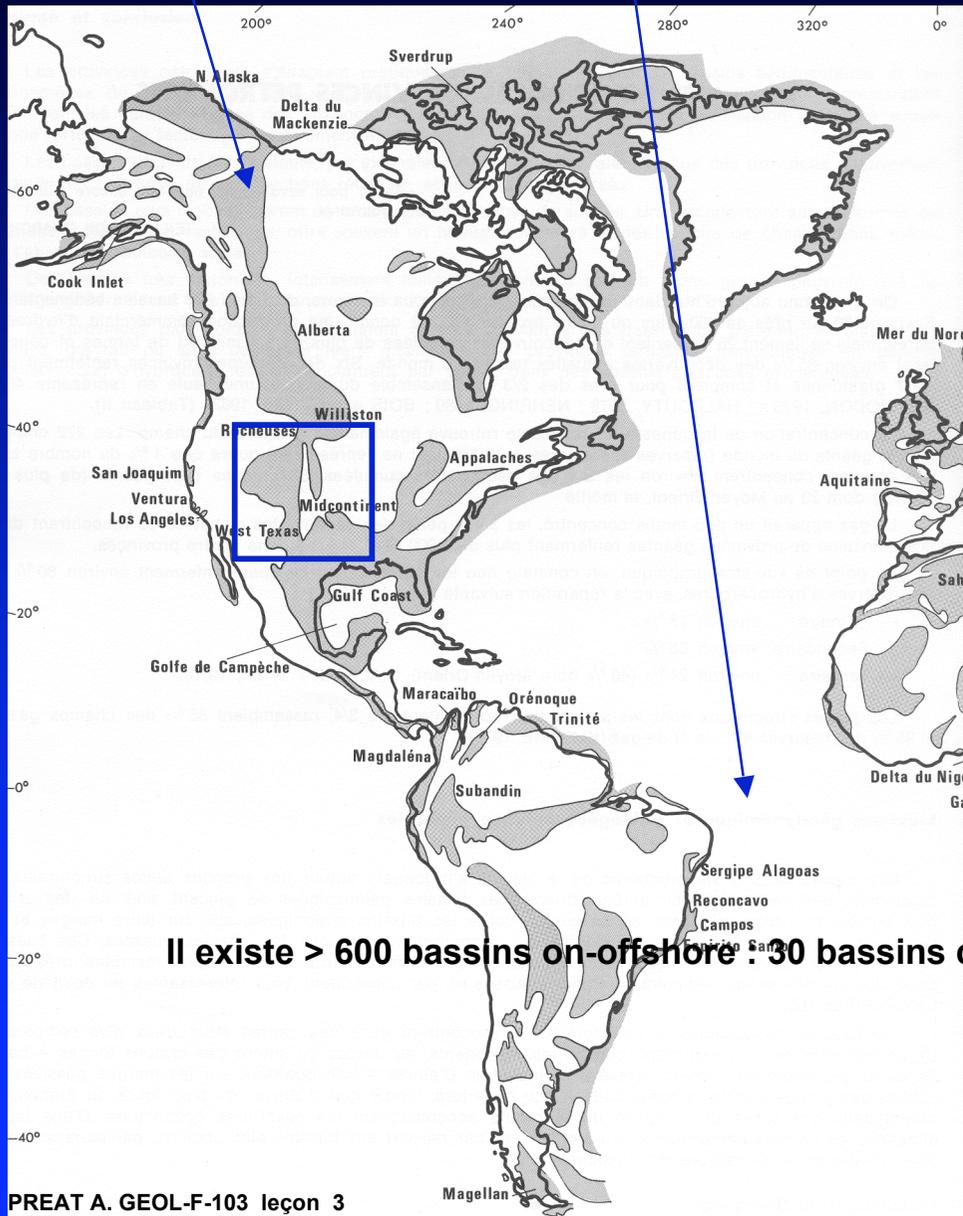
# Carte des grands bassins sédimentaires très simplifiée...



Les zones océaniques et les marges continentales représentent des bassins fonctionnels: il s'agit le plus souvent de bassins **structuraux résiduels** d'ensembles antérieurement plus vastes

# Carte des grands bassins sédimentaires

Onshore: 29 millions de km<sup>2</sup> et Offshore : 55 millions de km<sup>2</sup> (sur 362) avec ?70 bassins potentiels (en 2005)

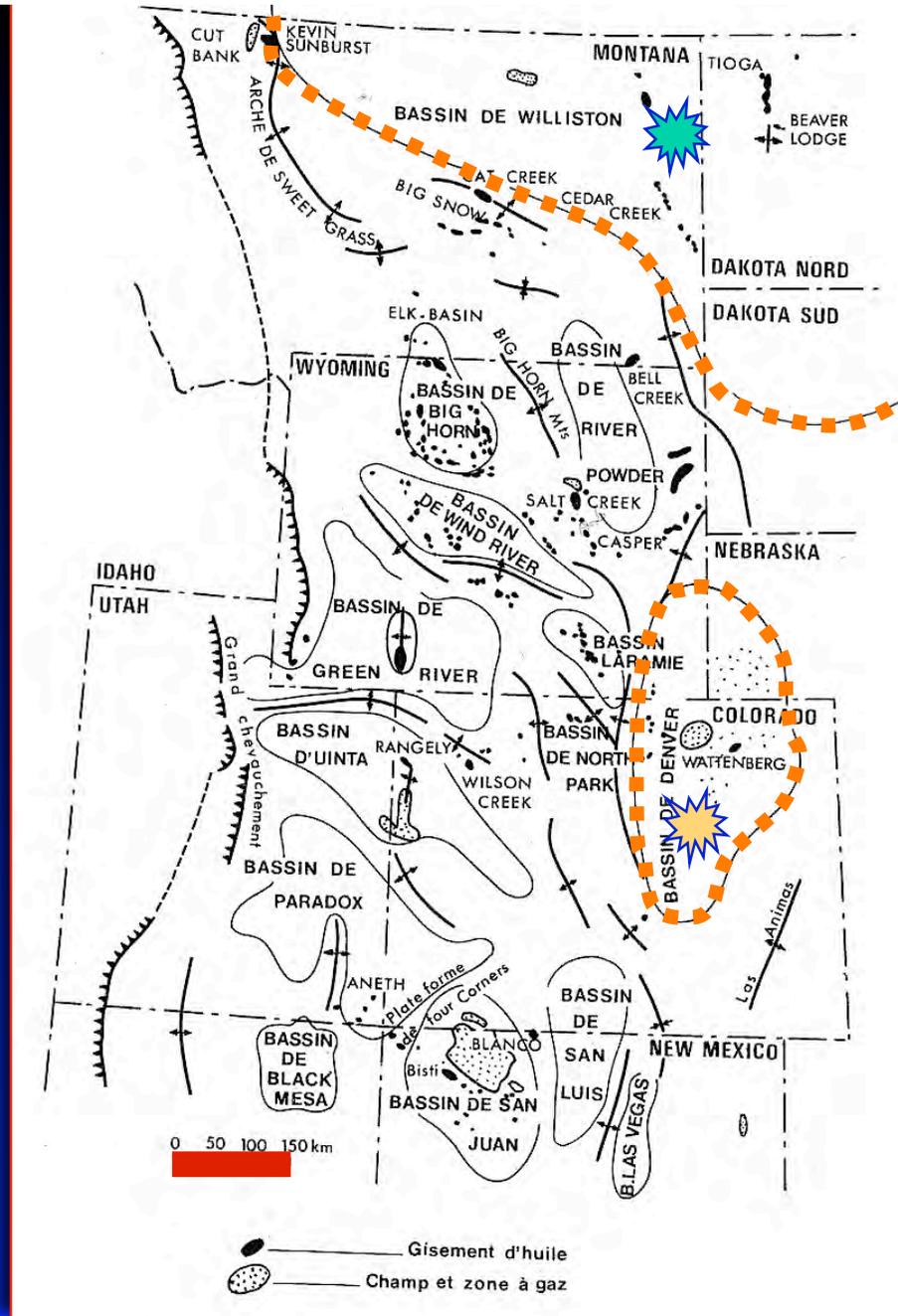


Il existe > 600 bassins on-offshore : 30 bassins concentrent 85% des découvertes totales du monde

Perrodon 1985

# Montagnes Rocheuses Canada

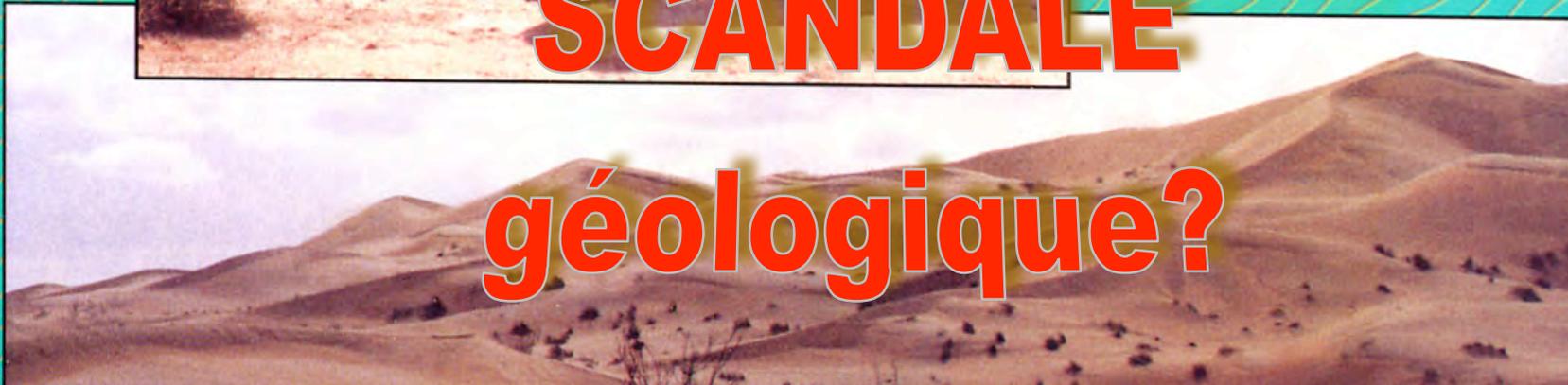
une vingtaine de bassins  
(productifs)  
Paléozoïque-Mésozoïque  
'découpés' après  
l'orogénèse LARAMIDE  
[Crétacé Sup]



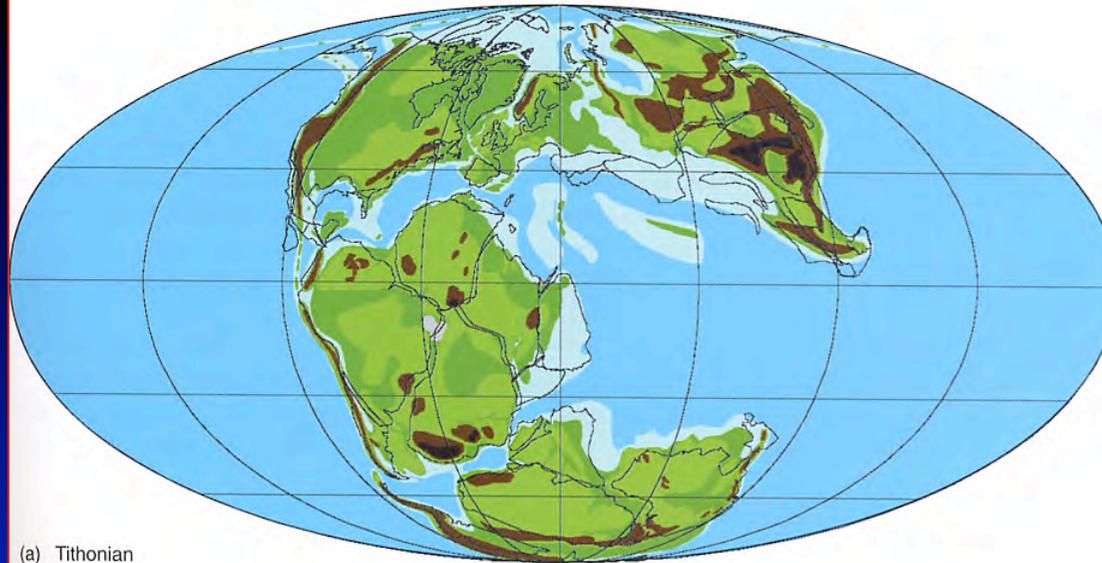
Bassin de Williston  
300.000km<sup>2</sup>  
(USA+Canada)  
Découvert en 1907

Bassin de Denver  
150.000km<sup>2</sup>  
>200 gisements

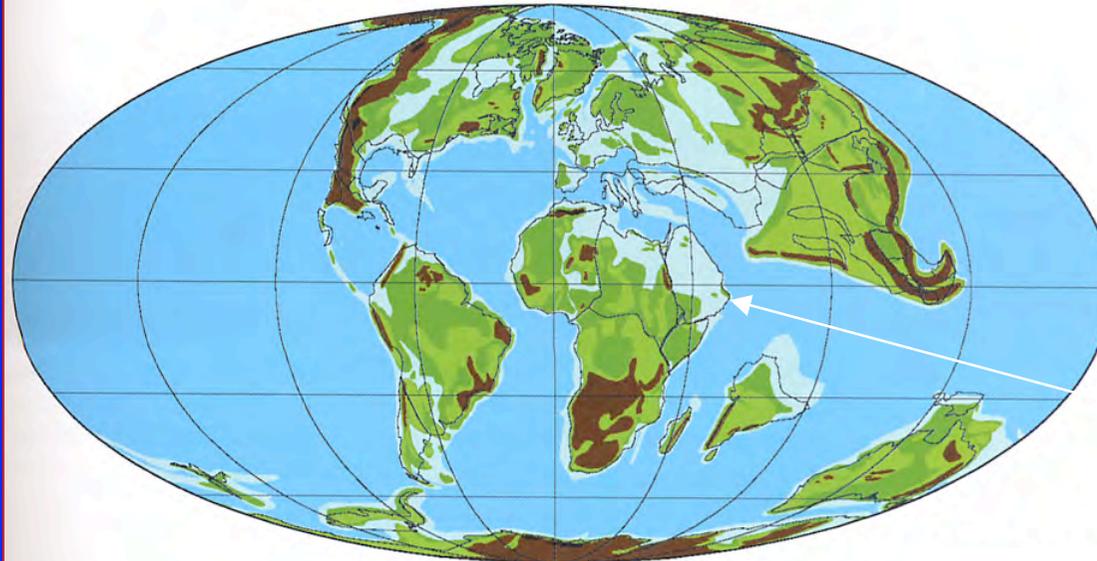
Perrodon 1985



**le MOYEN ORIENT ...  
ELDORADO  
ou  
SCANDALE  
géologique?**



(a) Tithonian



(b) Maastrichtian

Moteur principal  
= Rifting mer Rouge (30Ma-Oligocène)

Stelton 2003



**MARGE NE**  
**contient**  
**98%**  
**des HC**

**RR**  
**fin Paléozoïque**  
**à**  
**début Néogène**

**la partie centrale**  
**D'OMAN**

# SITUATION ACTUELLE

La faille de la Mer Morte **2**  
'transforme' la divergence de la Mer Rouge **1**  
en convergence au niveau des chaînes alpines **3**  
du Taurus-Zagros

**950 Ma**  
**CRATON**  
**ARABO-NUBIEN**

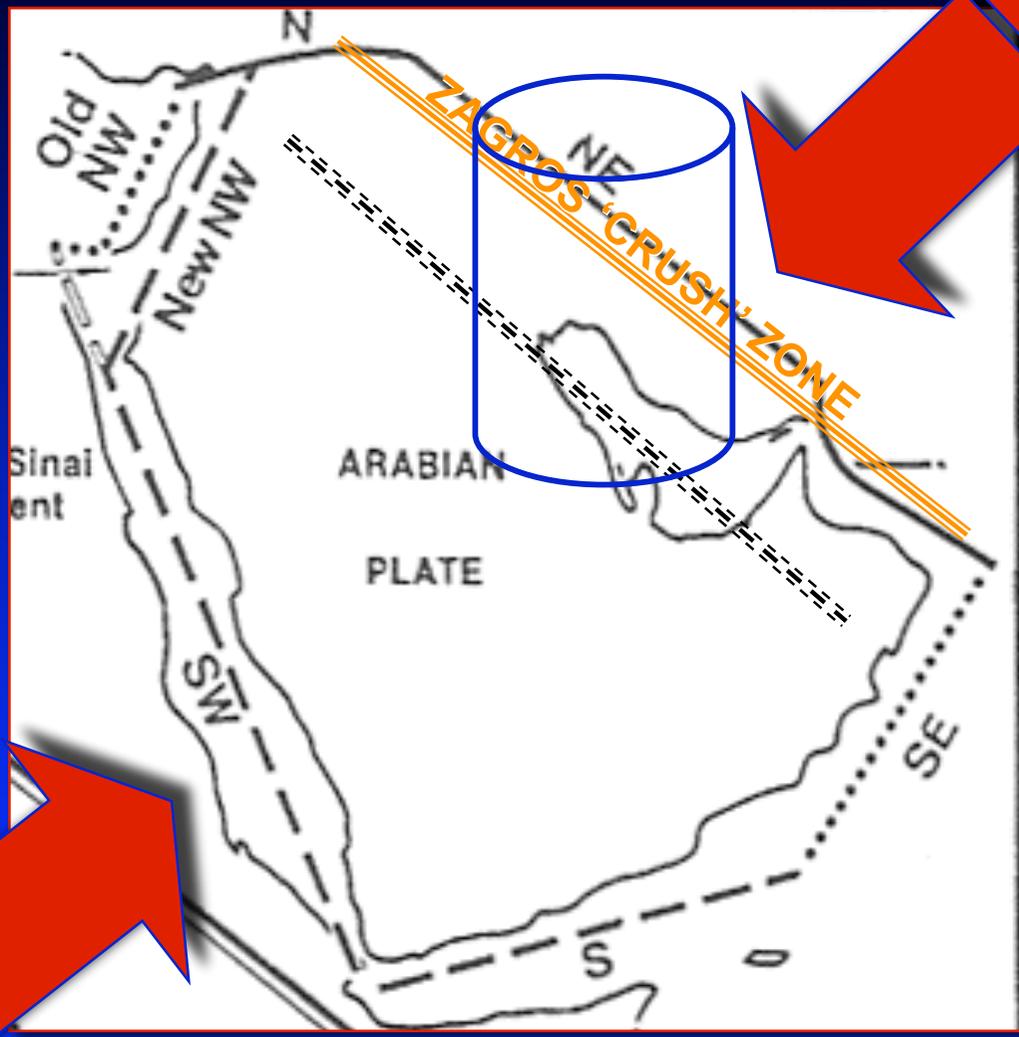
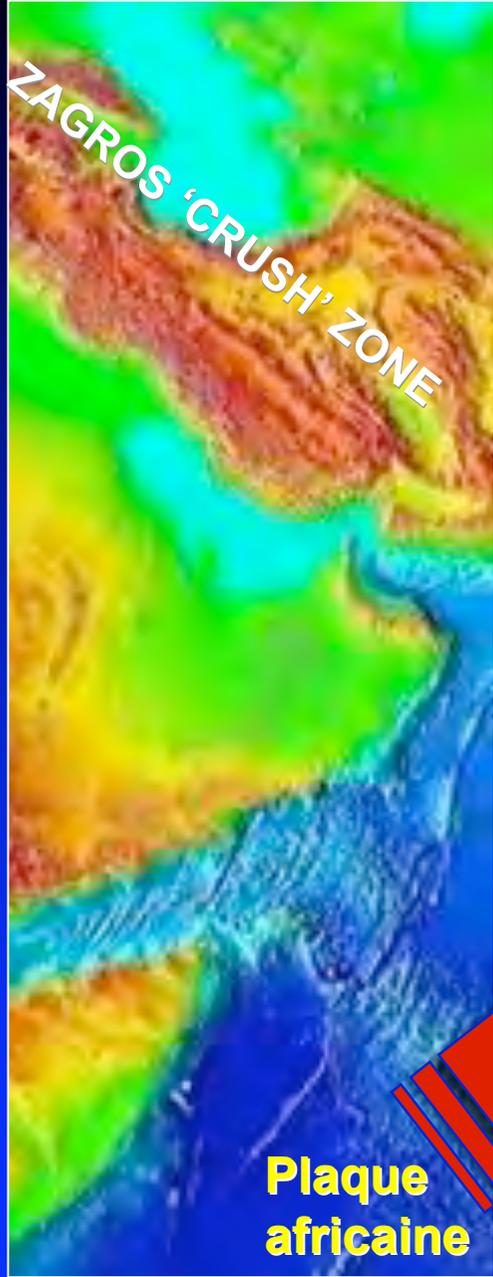
Roches plutoniques  
andésites, diorites...



EURASIE  
AFRIQUE

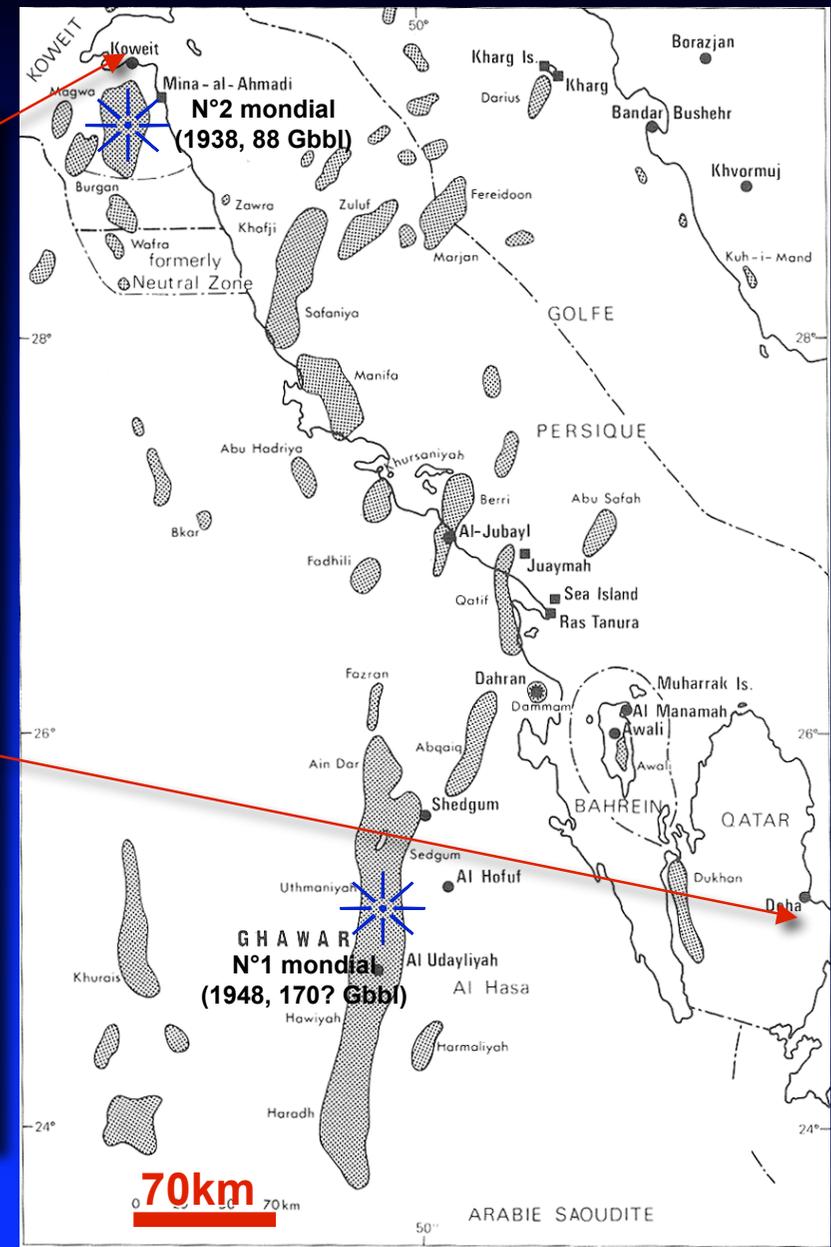
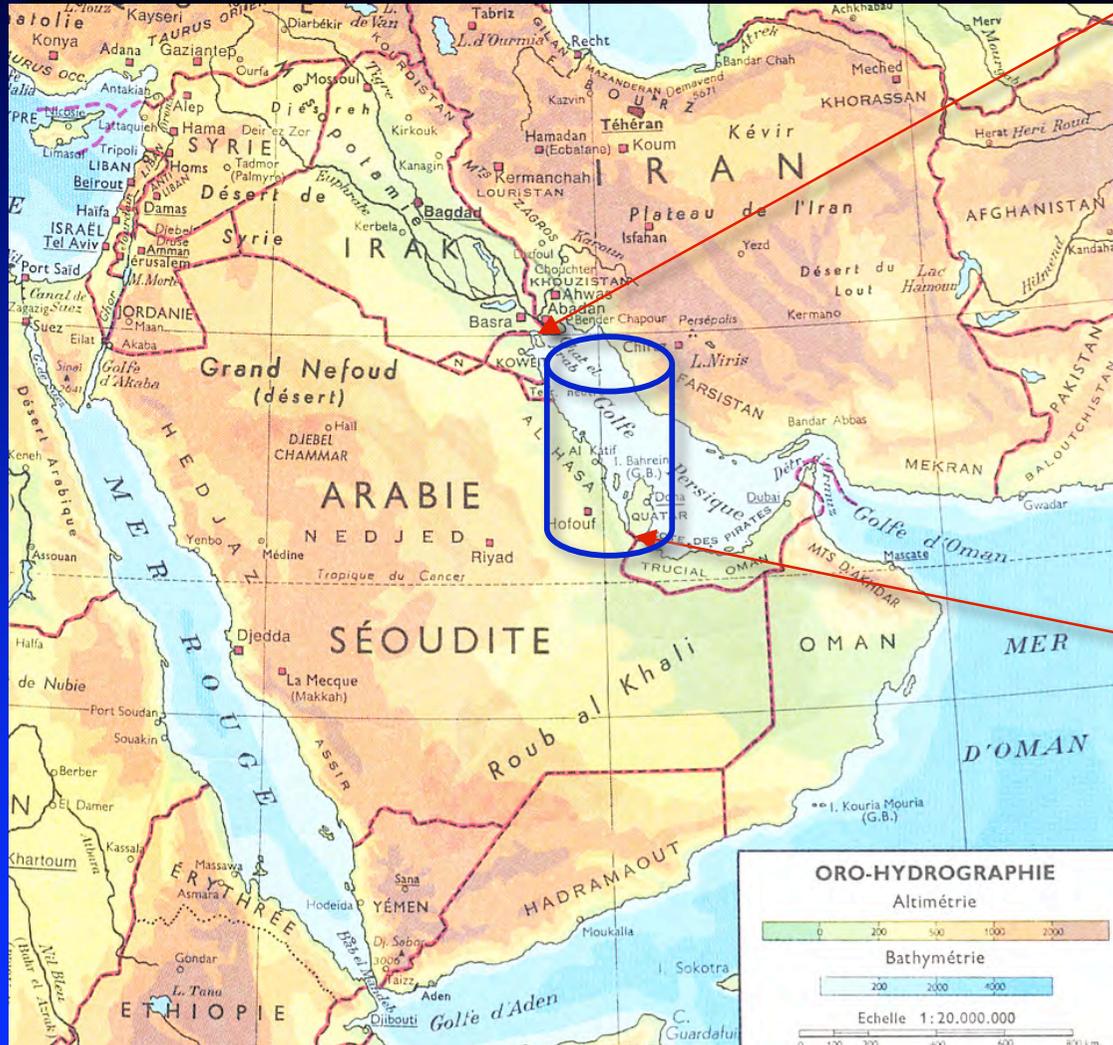
Trompette 2003

# ZONE DE CONVERGENCE



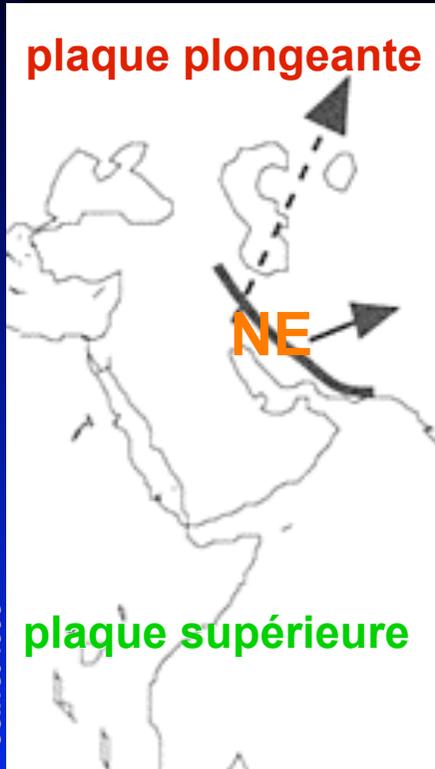
Beydoun 1991

# MARGE NE ...

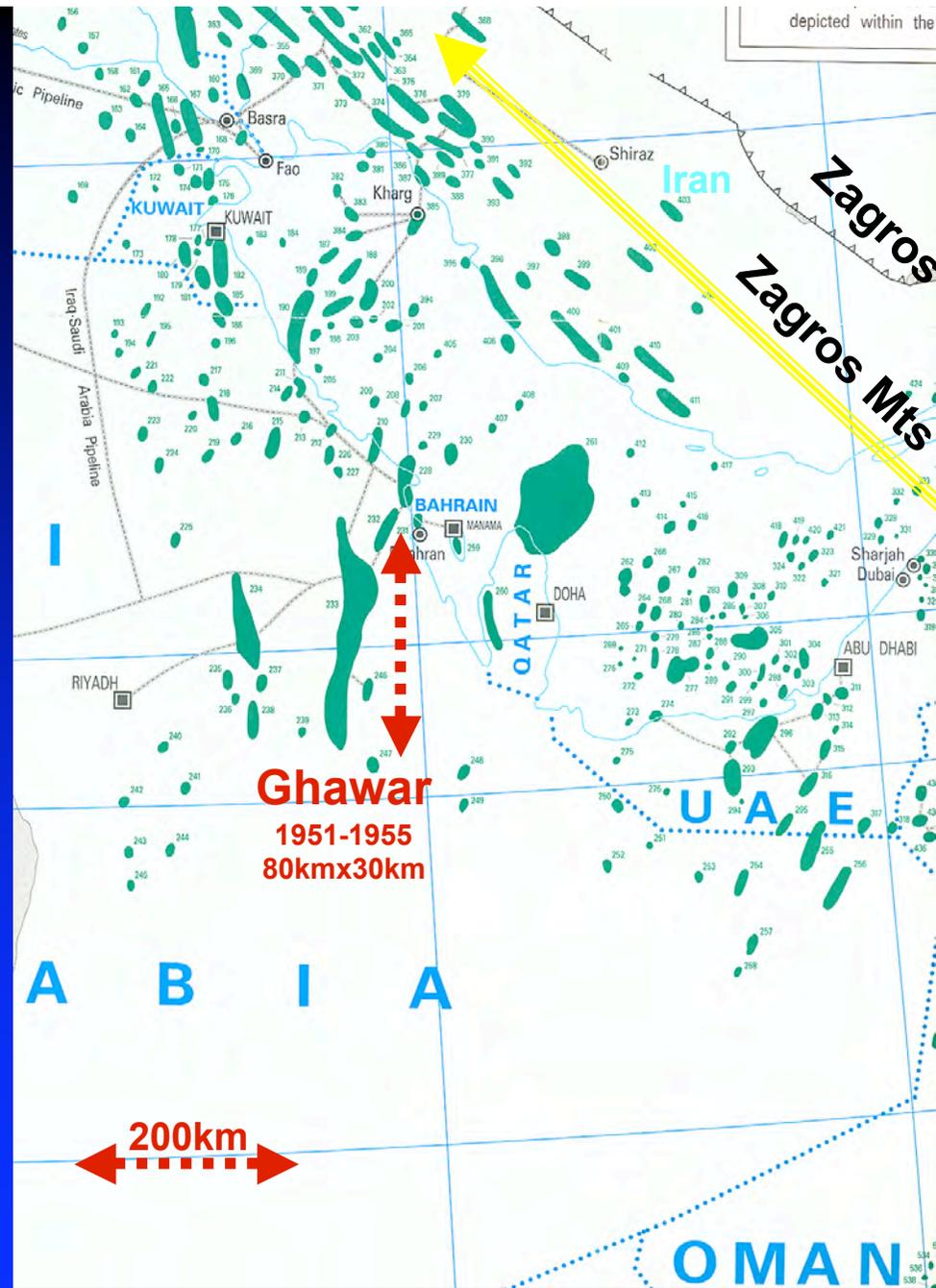


... la plus prolifique!

# DEPLACEMENTS ABSOLUS



**MARGE NE**  
ou  
**Zagros Crush Zone**

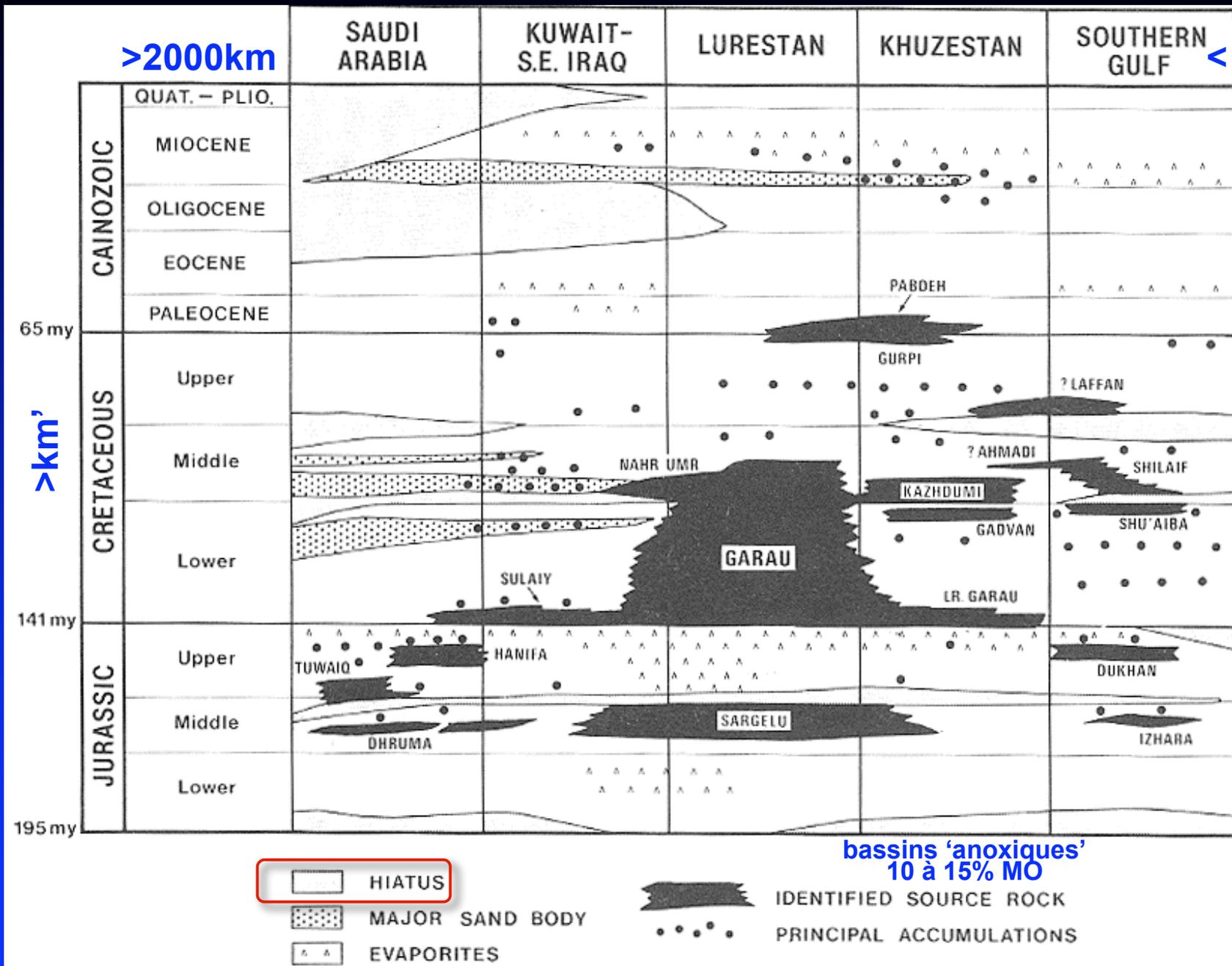


**Foot-Hills**

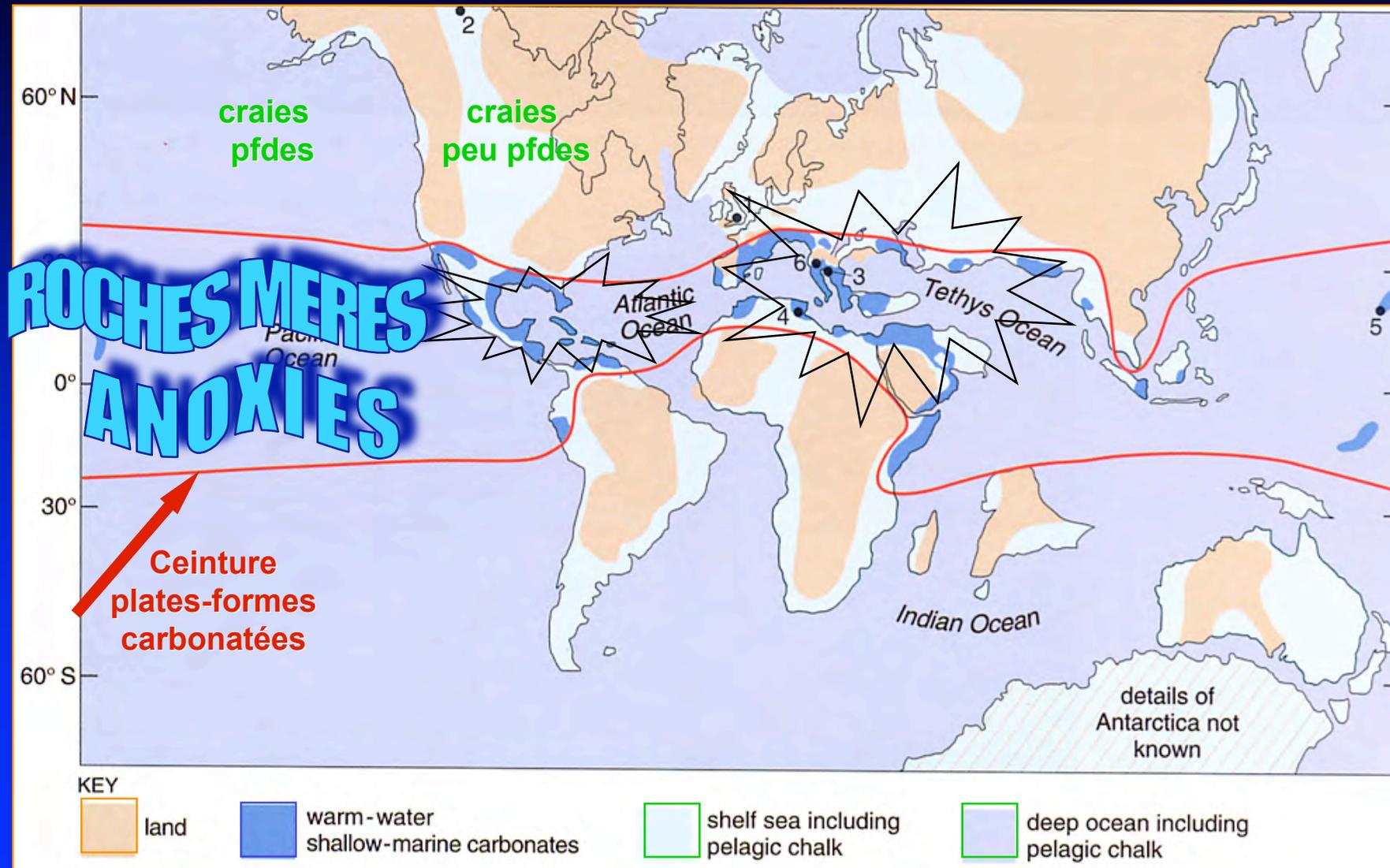
**Zagros Suture**

**Prov Arabique**

Beydoun 1991



# PALEOGEOGRAPHIE AU CENOMANIEN (K, 98 Ma)



## Le Moyen Orient: eldorado ou scandale géologique?

- vaste et complexe bassin sédimentaire disymétrique de 2,3 millions de km<sup>2</sup> dont 600.000 km<sup>2</sup> de zones productives,
  - le bassin est à la rencontre de la plaque africaine, qui correspond à l'avancée NE du continent africain, et de la plaque asiatique,
  - la zone de CONVERGENCE, située sur l'ancien domaine océanique 'téthysien' est caractérisée aujourd'hui par des séries marines épaisses, plissées et faillées.
- La province du Moyen Orient est ainsi délimité, à l'ouest par la grande flexure du Levant, au SW par la remontée du bouclier arabo-nubien, au NE par le grand chevauchement-cisaillement du Taurus-Zagros

### D'un point de vue structural, on a:

- un domaine de plate-forme 'stable' au SW avec quelques grands axes structuraux à très faible pendage, de direction méridienne,
- un domaine de compression, au NE, marqué par l'alignement de grands plis accusés de formation récente de direction NW-SE,  
... les structures sont causées ou compliquées par des déformations halocinétiques, soit profondes (=dômes simples'), soit récentes (=disharmonies régionales, 'foot hills ' d'Iran et d'Irak).

# ZONE DE CONVERGENCE COMPLEXE



Marges  
NE  
SE  
S  
SW  
New NW  
Old NW

début  
**MESOZOIQUE**  
  
modifié  
au  
**MESOZOIQUE**  
  
**TERTIAIRE**

Beydoun 1991

Marges

**NE**

S

SW

New NW

Old NW

SE

**NE = marge passive 2000km l x 3000km L**

**PF stable pendant très longtemps**

***[de la fin du Pcm jusqu'au milieu du Tertiaire]***

**Suturée à l'Eurasie: compression-collision Tertiaire**

**Modifiée dès l'inversion marge passive-active**

**La plus riche en huile, soit 98%!!!**

**'ZAGROS'  
Crush Zone**

**NW = marge formée au Trias ...**

**Ensuite fortement affectée par la tectonique fini-Jurassique avec 'block faulting' et érosion profonde...**

**S et SW = marges riftées (passives) formées au Miocène, liées à l'activité de la ride médio-océanique indienne à**

**Travers le Golfe d'Aden et la Mer Rouge**

**= SEPARATION ARABIE-AFRIQUE**

**SE = marge paléotéthysienne du Gondwana**

**Fonctionne depuis le Cambrien**

**Se sépare du Gondwana au Permo-Trias...**

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

'PANGÉE...'

A red arrow points downwards from the text 'PANGÉE...' to a missing puzzle piece in a map of the world. The map is composed of orange and blue puzzle pieces, with the missing piece located in the central Atlantic Ocean region.



## Histoire (géologique) de la marge NE, la plus prolifique en huile

1. Plate-forme très stable, très plate, très étendue du Jurassique à l'Eocène  
===> liée au rifting NEO-TETHYSIEN post Pm/T  
===> se termine lors de la collision-suture ZAGROS pré-Miocène (Tertiaire)
2. À l'Eocène (Tertiaire): collision continent-continent  
===> raccourcissement plate-forme et empilements de nappes de charriage (d'abord Taurus au N, ensuite suture Zagros au NE au Miocène inf)  
===> **suture avec l'EURASIE**
3. Au Miocène moyen: l'avant-pays ('foreland') se plisse avec failles dextres le long de la suture Zagros  
===> ré-empilements...  
===> le plissement et les charriages se poursuivent aujourd'hui...

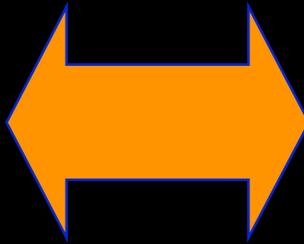
# **P I E G E conventionnel**

**avec**

**RScce**

**RR**

**Rcvture**



**Structuration**

On distingue habituellement deux grandes provinces pétrolières qui correspondent aux domaines géologiques esquissés

- A. **Une Province de plate-forme**, ou PROVINCE ARABIQUE, caractérisée par de vastes pièges à grand rayon de courbure, généralement allongés N-S, productifs dans le Jurassique et le Crétacé inférieur
  
- B. **Une Province plissée** ou des 'FOOT HILLS', en Iran et en Irak, productive dans des réservoirs du Crétacé et du Miocène-Oligocène fracturés au sein de longs anticlinaux coffrés, enfouis sous une couverture salifère et détritique, cause de profondes dysharmonies

#### **PLUSIEURS SYSTEMES PETROLIERS :**

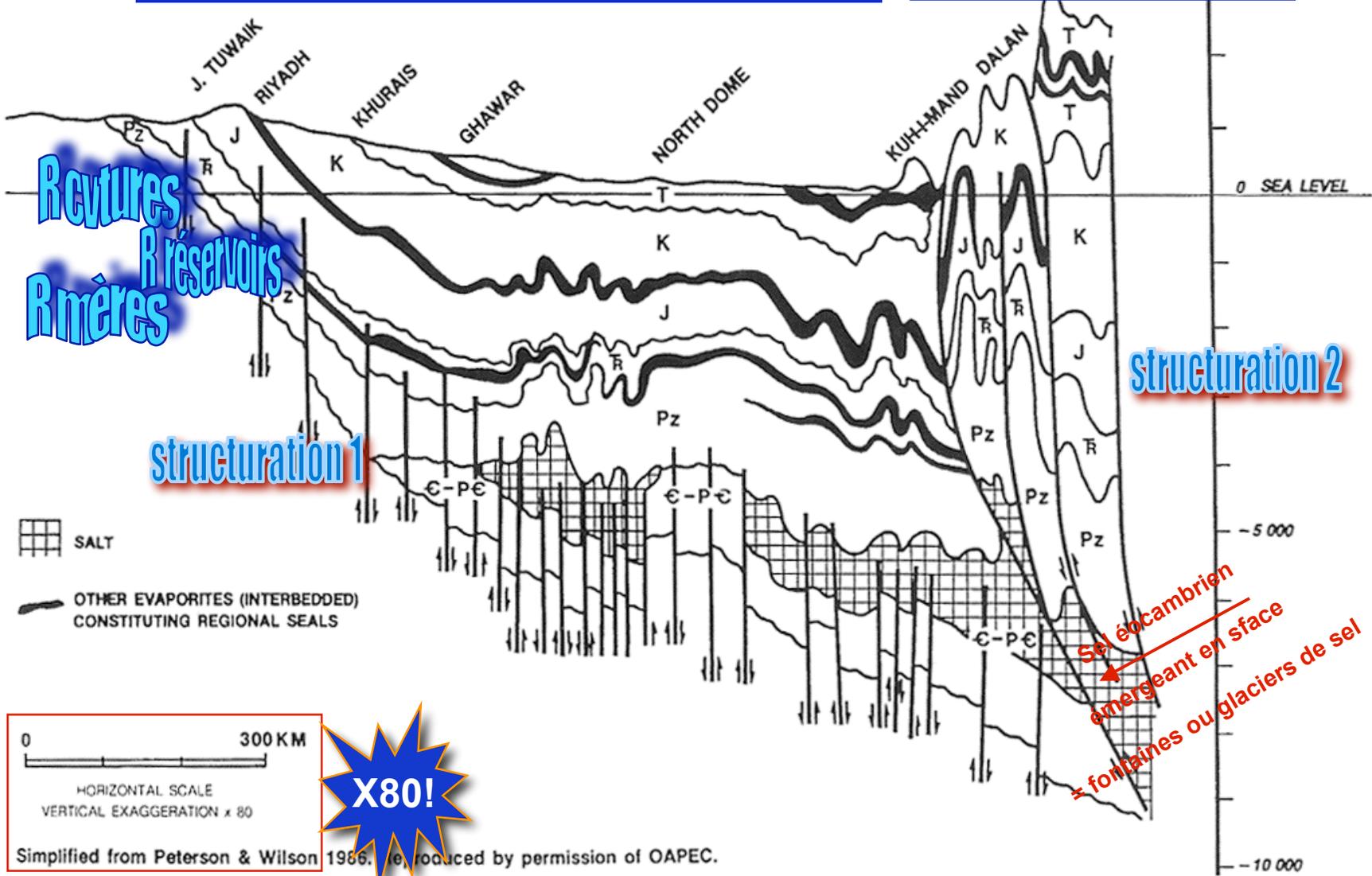
- **le KHUFF (Pm)**, productif de gaz, de l'Iran à Qatar (+ Arabie et Abu Dhabi),
- **l'ARAB ZONE (J)**, productif d'huile sur la plate-forme carbonatée,
- un **ENSEMBLE CRETACE**, gréseux ou carbonaté, assez complexe, plate-forme et zone plissée
- **l'ASMARI (Oligocène-Miocène)** dans la zone plissée

....

S.W.

# Province de 'plate-forme'

# P. plissée



 SALT  
 OTHER EVAPORITES (INTERBEDDED) CONSTITUTING REGIONAL SEALS

0 ————— 300 KM  
 HORIZONTAL SCALE  
 VERTICAL EXAGGERATION x 80  
 Simplified from Peterson & Wilson 1986. Reproduced by permission of OAPEC.

**X80!**

Beydoun 1991

# L'ARAB ZONE = 'système Js'

- ◇ Répétition de cycles sédimentaires (10'-100m) débutant par des faciès carbonatés à haute énergie (= **RR**, = les 4 réservoirs de l'Arab Zone) et se terminant par des couches d'anhydrite (= sel, = **RC**). La **RM** est constituée par les calcaires et marnes noires du Callovien-Oxfordien (Jm) portés à une maturation optimale sur une surface de plus de 100.000 km<sup>2</sup>.
- ◇ L'ensemble est productif au sein de vastes dômes et voûtes allongées, à très faible pendage (de l'ordre du d°) et de très vastes surfaces (100'-1000' km<sup>2</sup>). Les hauteurs fermées atteignent 300 à 400 mètres. Les structures sont surtout provoquées par la montée de dômes de sel profond, Cambrien.
- ◇ Débit des puits: 1000'-100000' bbl/j! (Ghawar: > 400 puits ... = env. 5 à 6 Mbbl/j = 60 à 65% prod. Arabie Saoudite, = 6,25% production mondiale en 2005 soit la consommation Chine + (gaz).

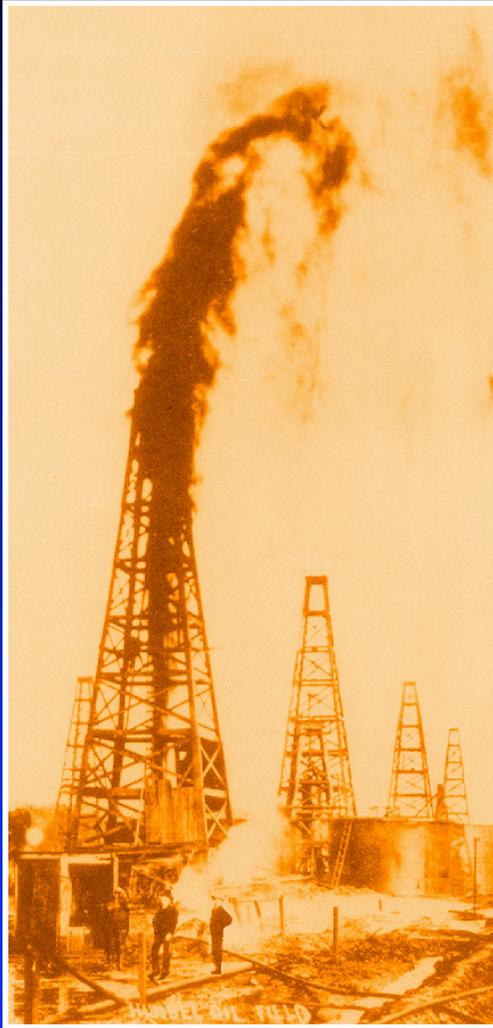
**Nb injection de >7 millions de bbl d'EAU DE MER/jour pour compenser la déplétion naturelle...  
Il faut injecter aujourd'hui 2bbl d'eau de mer pour obtenir un bbl oil!**

◇ ...

récupération Ir 15-30%



40% ...

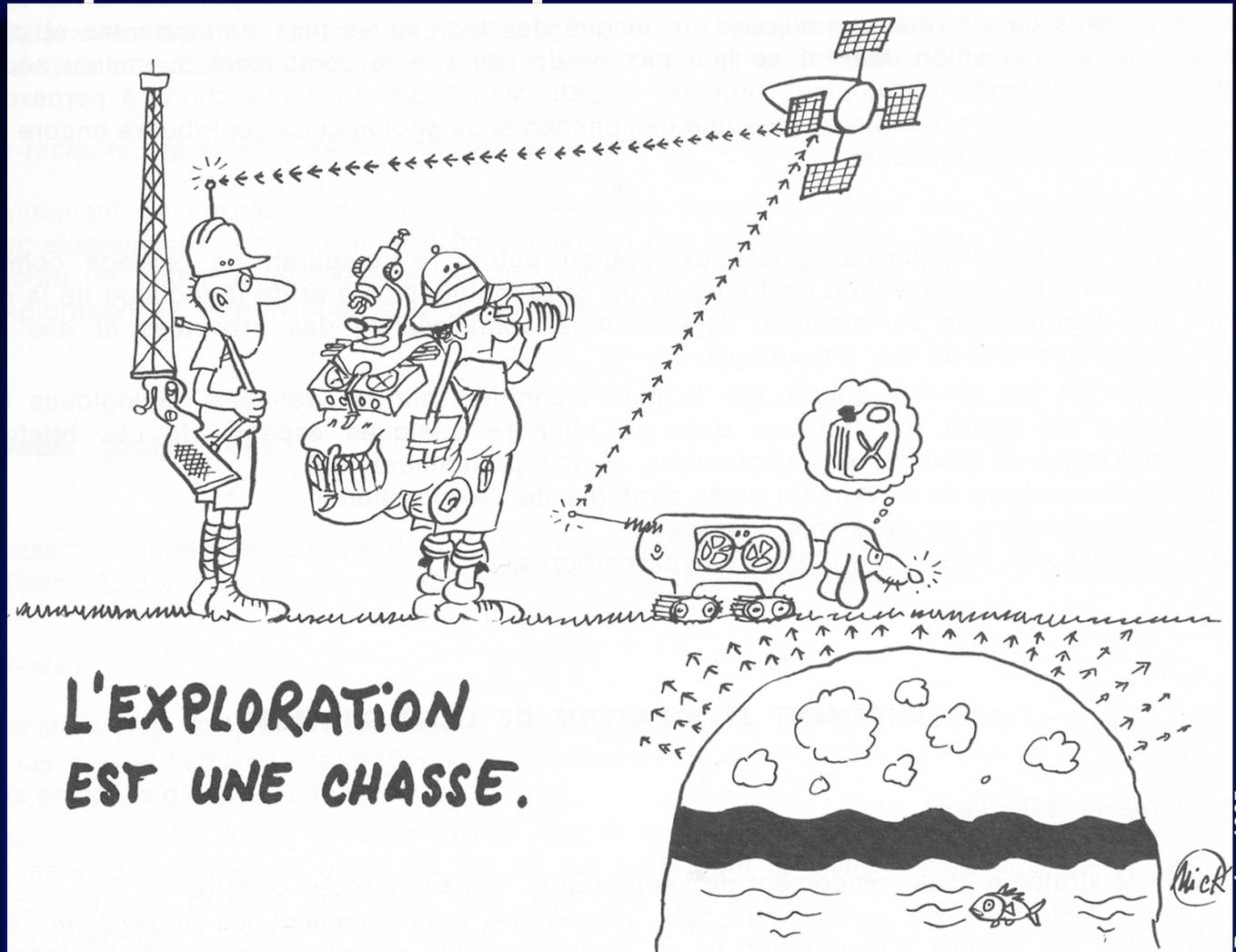
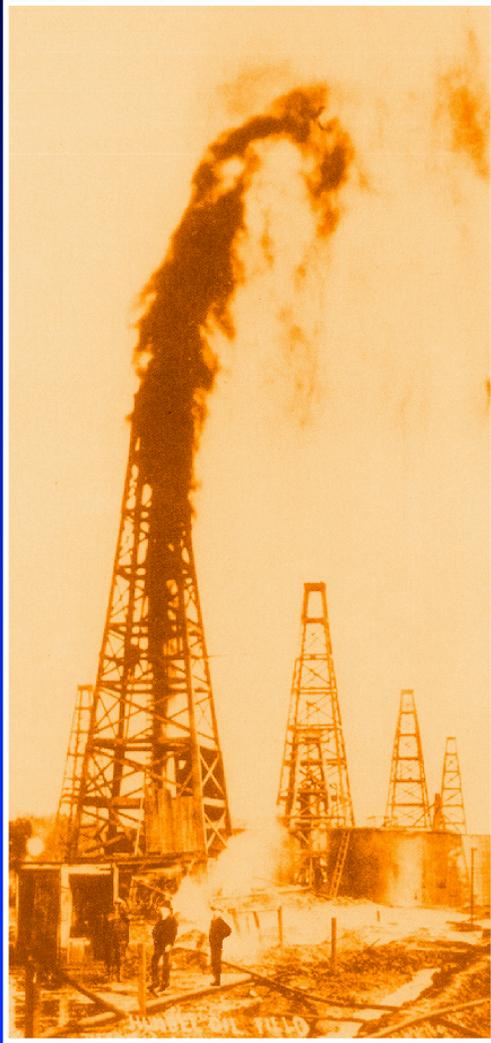


# La Recherche de l'Énergie...

ou

# l'Exploration Pétrolière

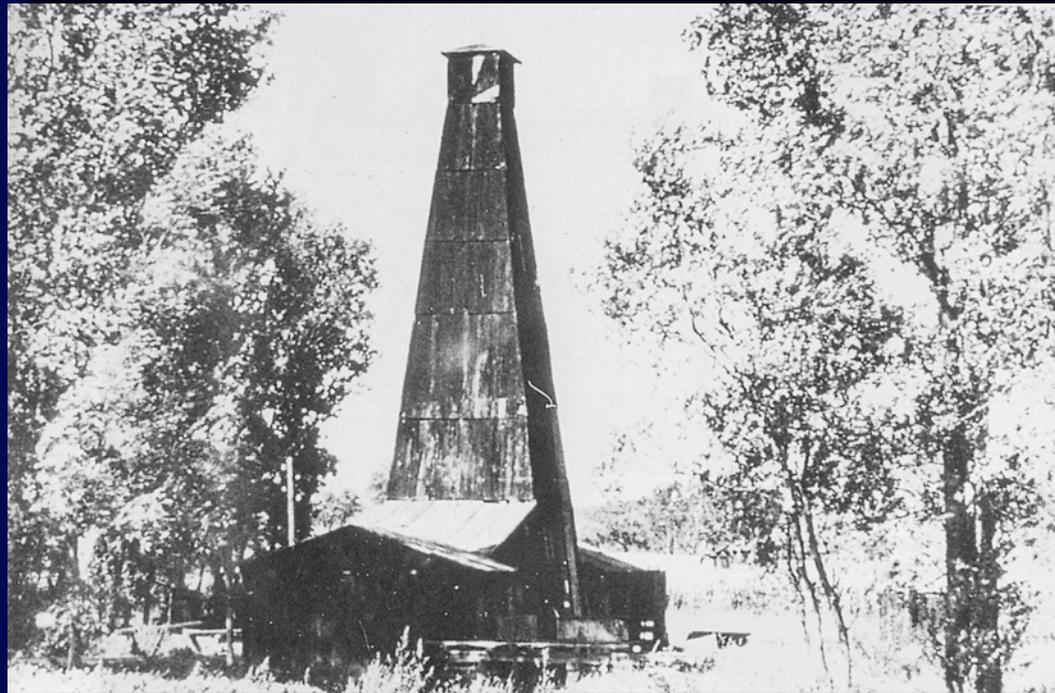
# l'exploration pétrolière



*Réserves = Incertitudes Géologiques...*

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

**28-08-1859**



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

**Venue d'huile de très bonne qualité à 70 pieds avec un  
débit variant de 10 à 25 barils/jour (1,6 à 6,5 m<sup>3</sup>/j) et 300t en 1859**

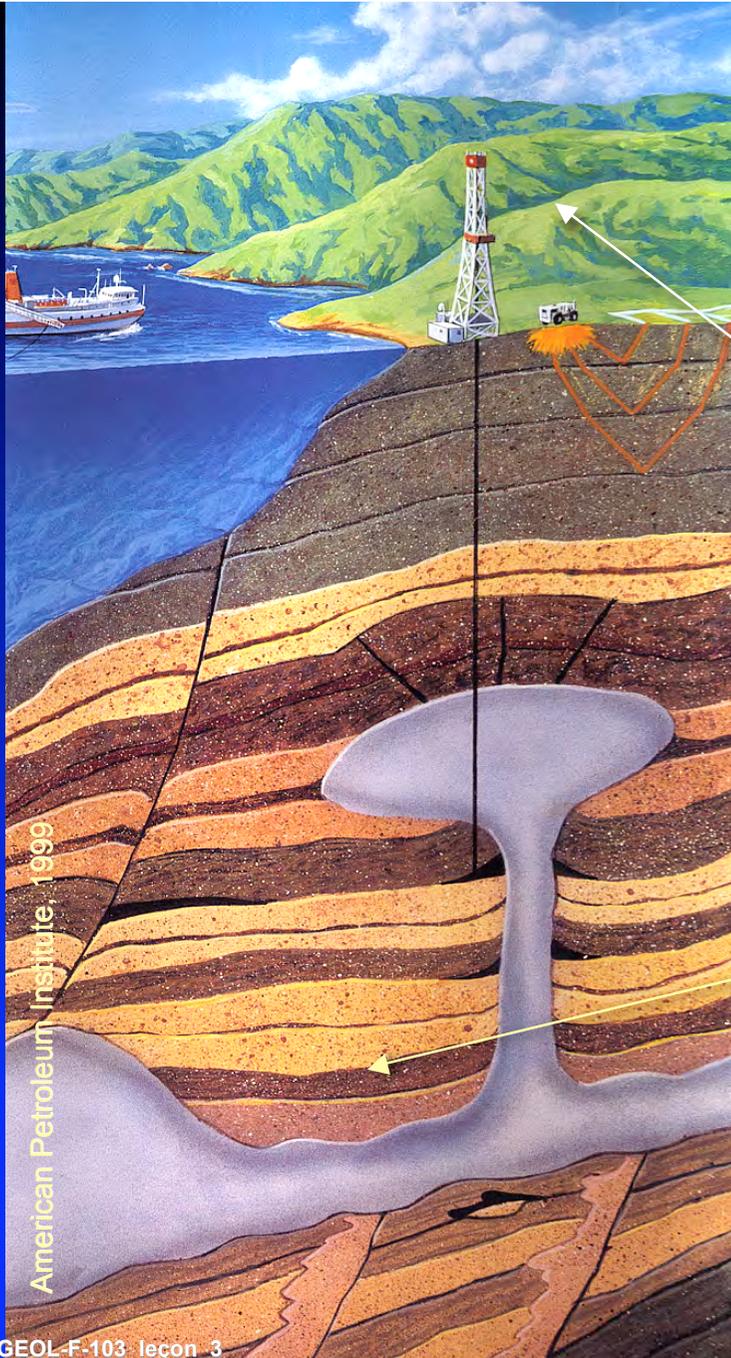
**...le 1er juin 1860: 19 puits sur Oil Creek + 8 sur deux autres sites et 25 000t en 1860**

# Défi de l' Exploration Pétrolière

Interpréter ce qui est caché

- Géologie de Surface
  - photos aériennes
  - cartes géologiques

- Analyse de Subsurface
  - Gravité
  - Magnétisme
  - Sismique Réflexion
  - Puits = 'Wells'



# Le Brut - "L'Or Noir"

Le 'pétrole' entre en composition essentielle dans près de 300 000 produits (pétrochimie = 8%)  
Le brut est exploité à partir de plus de 50 000 gisements majeurs d'hydrocarbures

**Light Texas Crude**  
Palo Pinto Field  
North Texas

**Heavy Texas Crude**  
Humble Oil Field  
Southwest Texas



'léger'

'moyen'

'lourd'

'extra-lourd'

American Petroleum Institute, 1999

# Qu'est ce que le Pétrole?

*'petra oleum = huile de pierre'*

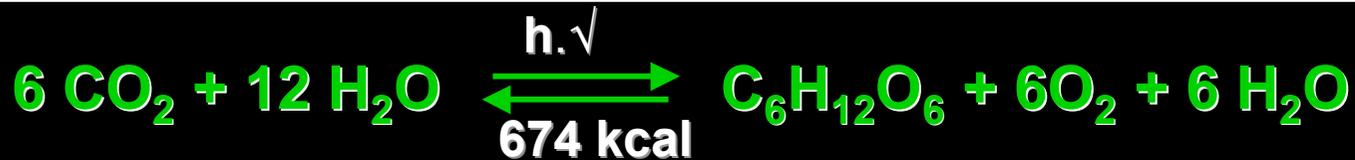
- **Pétrole: un hydrocarbure liquide naturel, jaune à noir, inflammable, situé sous la surface terrestre**
- **Hydrocarbure: composé organique formé d'atomes d'hydrogène et de carbone (= 'HC')**

# Qu'est ce que le Pétrole?

= transformation thermique de matière organique (M.O.)  
Sur Terre: le processus majeur de fabrication de la M.O.  
est la **PHOTOSYNTHESE** à partir de la lumière



*c h l o r o p h y l l e*



Rendement max à l'échelle cellulaire 30% (**Glucose**)  
Biomasse = rendement à l'échelle de la culture <<6% [0,4 à 1% en France, Belgique...]

**Polysaccharides**

**Les premiers (micro)organismes CYANOBACTERIES ont commencé à produire de la M.O. il y a au moins 3,5 Ga = 'autotrophes primitifs'. Ils ont remplacé les hétérotrophes qui utilisaient des molécules organiques 'abiotiques'...**

[http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/sediment/pages\\_perso/Preat\\_fichiers/SPS311%20petrole\\_precambrien.pdf](http://www.ulb.ac.be/sciences/dste/sediment/pages_perso/Preat_fichiers/SPS311%20petrole_precambrien.pdf)

# HYDROCARBURES

⇒ **Bitumes** (*du latin bitus = bois résineux*)

huiles et gaz solubles dans les solvants organiques

⇒ **Kérogène**: insoluble dans les solvants organiques

⇒ **Asphalte**: produits HC épais et solides

⇒ **Naphte** (*Mésopotamie = 'napata' ou flamber*)

produits pétroliers liquides

**Les pétroles et gaz naturels sont des fluides, qui se présentent généralement à l'état liquide ou à l'état gazeux dans les conditions habituelles.**

**Ils sont constitués d'HC (= carbone et hydrogène) dont une des propriétés majeures est de se dissoudre intimement les uns dans les autres.**

**Un 'BRUT' est donc un mélange en proportions variées  
de pétroles  
de gaz  
d'eau 'salines' ou non...**

....

**Il n'existe pas deux pétroles bruts rigoureusement  
identiques: ils contiennent des centaines de milliers  
de molécules différentes...**

**classées en trois grandes familles  
dont les caractéristiques physiques  
et chimiques reflètent ces mélanges  
eux-mêmes conséquences du cadre  
et de l'histoire géologique**

# Court terme (prix 'spot') vs long terme (contrat de gré à gré, 10 à 20 ans) Géopolitique : GDF\_Suez-France... (fusion GDF et Suez) ... 2010' (= take-or-pay contract)

## Spot crude prices

US dollars per barrel	Dubai \$/bbl*	Brent \$/bbl†	Nigerian Forcados \$/bbl	West Texas Intermediate \$/bbl‡
1976	11.63	12.80	12.87	12.23
1977	12.38	13.92	14.21	14.22
1978	13.03	14.02	13.65	14.55
1979	29.75	31.61	29.25	25.08
1980	35.69	36.83	36.98	37.96
1981	34.32	35.93	36.18	36.08
1982	31.80	32.97	33.29	33.65
1983	28.78	29.55	29.54	30.30
1984	28.06	28.78	28.14	29.39
1985	27.53	27.56	27.75	27.98
1986	13.10	14.43	14.46	15.10
1987	16.95	18.44	18.39	19.18
1988	13.27	14.92	15.00	15.97
1989	15.62	18.23	18.30	19.68
1990	20.45	23.73	23.85	24.50
1991	16.63	20.00	20.11	21.54
1992	17.17	19.32	19.61	20.57
1993	14.93	16.97	17.41	18.45
1994	14.74	15.82	16.25	17.21
1995	16.10	17.02	17.26	18.42
1996	18.52	20.67	21.16	22.16
1997	18.23	19.09	19.33	20.61
1998	12.21	12.72	12.62	14.39
1999	17.25	17.97	18.00	19.31
2000	26.20	28.50	28.42	30.37
2001	22.81	24.44	24.23	25.93
2002	23.74	25.02	25.04	26.16
2003	26.78	28.83	28.66	31.07
2004	33.64	38.27	38.13	41.49
2005	49.35	54.52	55.69	56.59
2006	61.50	65.14	67.07	66.02
2007	68.19	72.39	74.48	72.20
2008	94.34	97.26	101.43	100.06
2009	61.39	61.67	63.35	61.92
2010	78.06	79.50	81.05	79.45
2011	106.18	111.26	113.65	95.04
2012	109.08	111.67	114.21	94.13
2013	105.47	108.66	111.95	97.99

\*1976-1985 Arabian Light, 1986-2013 Dubai dated.  
†1976-1983 Forties, 1984-2013 Brent dated.  
‡1976-1983 Posted WTI prices, 1984-2013 Spot WTI (Cushing) prices.

Source: Platts.



**finalement près de 500 espèces chimiques sont majeures  
et environ 150 constituent plus de la moitié des composants  
des bruts**

*En 1964, Mair identifie plusieurs milliers d'HC différents dans un brut du puits Brett #6 à Ponca City, Oklahoma*

**nb: tout est donc basé sur la chimie du carbone**

**Chimie ORGANIQUE >< Chimie Minérale**

**(distinction remontant en 1777, Bergman: « étude des  
composés du monde vivant, animal et végétal, par  
opposition aux composés venant du monde inanimé »)**

# HYDROCARBURES

## Bitumes

*du latin bitus*

*= bois résineux*

Les bitumes ne sont pas des 'sables bitumineux'!

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

*... ne pas confondre avec*

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

# N O X X E M E C Q M I H O H C R B

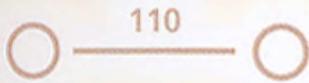


# Distance: $10^{-9}\text{m}$

## Quelques molécules

Distances en milliardièmes de millimètre ou nanomètres :

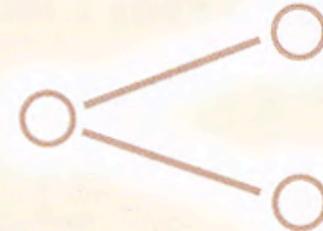
Molécule d'azote  $\text{N}_2$



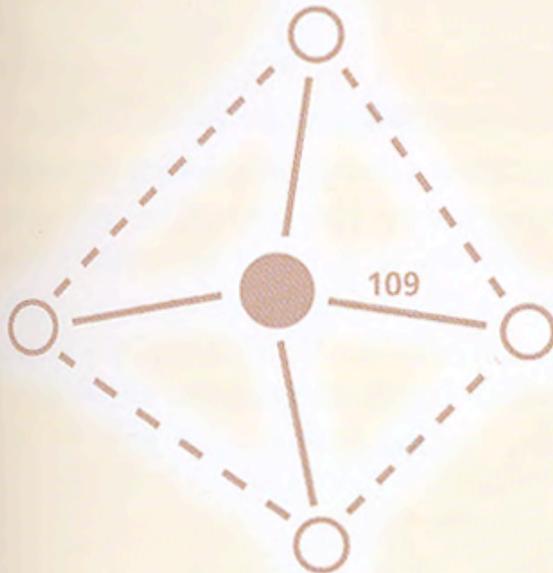
Molécule de dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$



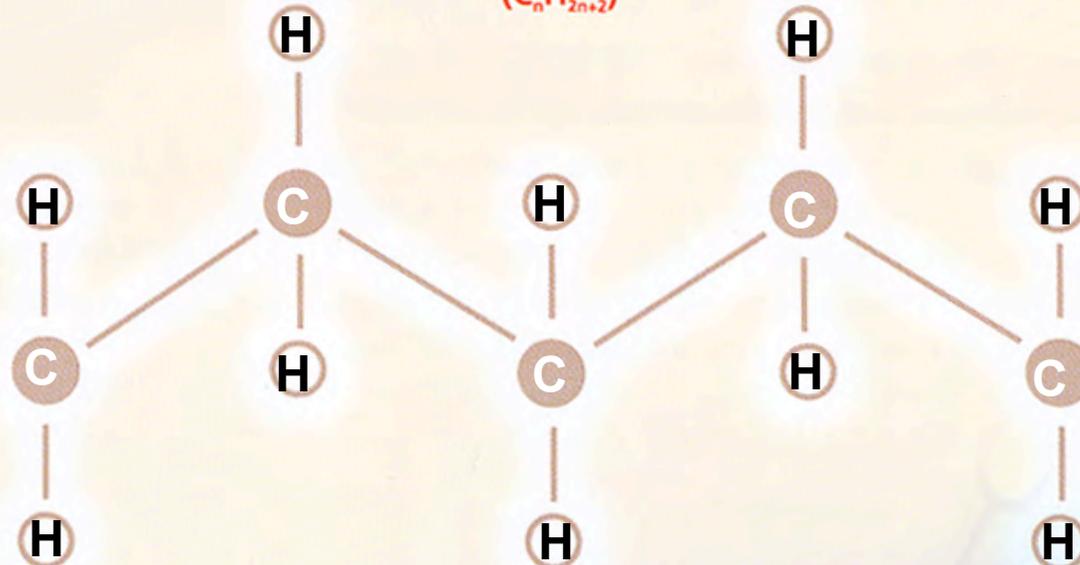
Molécule d'eau  $\text{H}_2\text{O}$



Molécule de méthane  $\text{CH}_4$



Molécule de chaîne paraffinique  
( $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ )



# Les trois grandes familles d'hydrocarbures

1. les HC saturés ou alcanes ou paraffines
2. les HC non saturés (alcènes, naphténo-aromatiques et aromatiques)
3. les résines et asphaltènes

*nb 1 uniquement liaisons covalentes normales  $C_nH_{2n+2}$ , 2 avec double/triple liaisons  $C_nH_{2n}$ ,  $C_nH_{2n-2}$   
3 très forte polymérisation (= 'poids lourds' moléculaires)  
+ en chaînes linéaires et ramifiées (=ouvertes ou aliphatiques), cycliques (aromatiques...)*

**1. Les HC saturés sont les plus importants quantitativement: 50 à 60%**  
Ils se répartissent en 3 familles principales

- les n-alcanes: chaînes  $\pm$  longues  $C_1$  à  $C_{40}$  [gazeux, liquides, solides]  
**les C impairs sont surtout synthétisés par les organismes=marqueurs biologiques (algues  $\neq$  végétaux supérieurs  $\neq$  ... Les autres (C pairs et C impairs particuliers = *diagenèse matière organique...***
- les iso-alcanes: groupe méthyle, souvent par chlorophylle...
- les cyclo-alcanes ou 'naphténes': HC cycliques = 30% dans les bruts

# Les trois grandes familles d'hydrocarbures

1. les HC saturés ou alcanes ou paraffines
2. les HC non saturés (alcènes, naphténo-aromatiques et arom.)
3. les résines et asphaltènes

.....

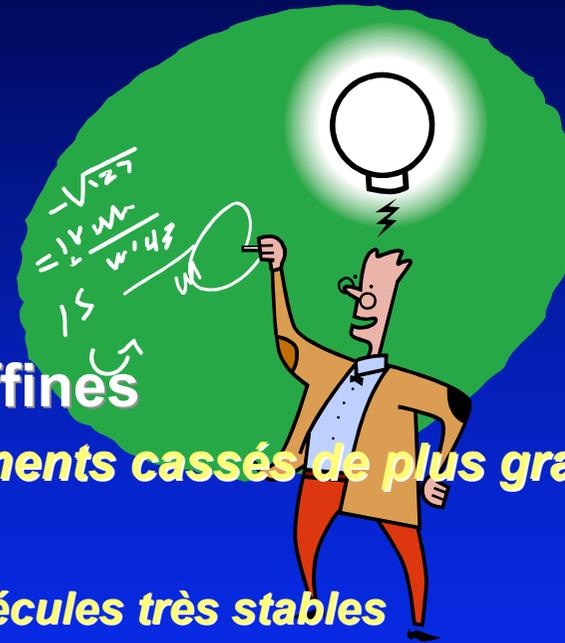
---

1. les alcanes: méthane  $\text{CH}_4$ , éthane  $\text{C}_2\text{H}_6$ , propane  $\text{C}_3\text{H}_8$ , butane  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ , pentane  $\text{C}_5\text{H}_{12}$ , hexane  $\text{C}_6\text{H}_{14}$  .....  
*nb: point d'ébullition méthane  $-161^\circ\text{C}$ , éthane  $-89^\circ\text{C}$ ....heptane  $+98^\circ\text{C}$*
2. les HC non saturés: isoprène, toluène, tétraline, éthylnaphtalène....
3. les résines: = 'asphaltes' = poids moléculaire très élevé ( $\text{C}_{26}$  à  $> \text{C}_{36}$ ), très inertes et point d'ébullition environ  $500^\circ\text{C}$

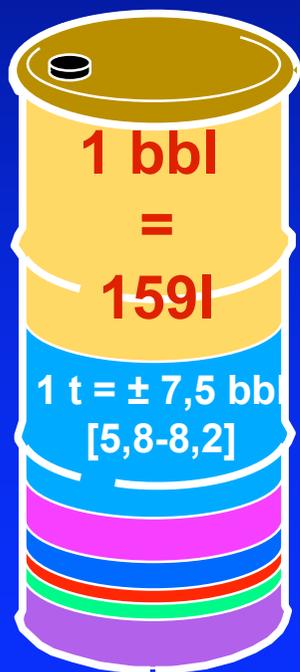
# Les trois grandes familles d'hydrocarbures

*En simplifiant ...*

- les HC saturés ou alcanes ou paraffinés  
*ils représentent généralement des fragments cassés de plus grands HC*
- les HC non saturés aromatiques  
*à partir de précurseurs, ils forment des molécules très stables*



# les différents constituants d'un brut pétrolier



Type de produit	Nbre at. C	T° ébullition (°C)
Gaz pétrole liquéfié GPL	1 à 5	-100 à +20
Supercarburant et essence	4 à 13	0 à 230
Naphtas	5 à 10	50 à 180
Lampants	11 à 16	180 à 310
Fuel-oil et gazole	12 à 23	200 à 380
Paraffines	22 à 33	370 à 470
Huiles de base	24 à 55	390 à 600
Fuels lourds	24 à >70	390 à >700
Cires	38 à 55	490 à 650
Bitumes	48 à >70	560 à >700

Un brut doit toujours être raffiné, distillé ==> 46% essence, 27% huile à chauffage, 10% carburant pour avion, 5% de coke, 4% de gaz liquéfiés, 3% pour pétrochimie, 3% d'asphalte .... (reste 2% divers)

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



*Les Etats producteurs exportateurs ne raffinent que très peu*

1. USA 20,1% mondial soit  $\pm 850$  millions de tonnes (2004)
2. Chine 6,9%, 3 Russie 6,4%, ... 9. Arabie Saoudite 2,4%

*Les capacités de raffinage sont utilisées auj (2007) à leur maximum [92%] et ne suivent donc pas le rythme de la progression pétrolière 2003-2004: 0,8% >< 4,4%*

*====> ouragan Katrina ...*

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

# La composition du brut conditionne

- sa production
- son transport
- son stockage
- son raffinage

7200 tankers en 2000 ==> 550 000t MAX [le + gd: 450m L x 70 m l]  
 (80% maritime + 600.000 à ?1million de km d'oléoducs)  
 80 à 100 bars de pression, diamètre canalisation >1m

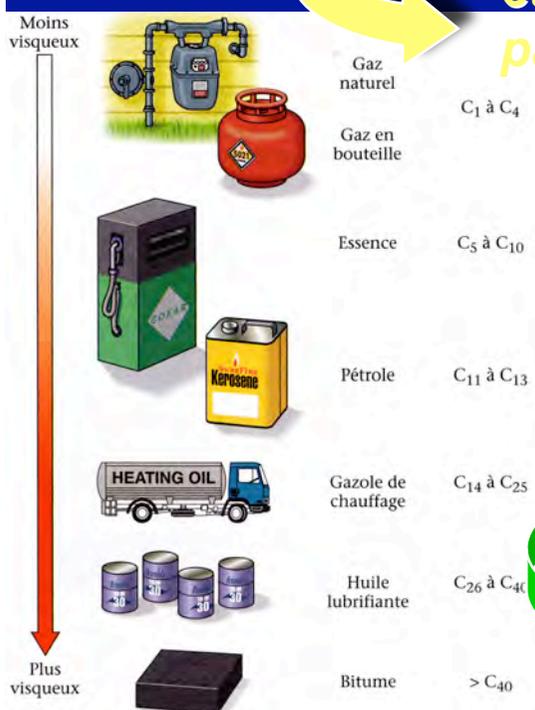
= distillation fractionnée càd augmentation progressive de la T° et récupération des produits sous forme de vapeur lorsqu'ils passent à leur point d'ébullition...

pour y arriver: 4 procédés majeurs

1. distillation à  $p_{atm}$  ou sous vide
2. craquage thermique (ou catalytique)
3. hydrogénation
4. reformage

Pétrochimie: exemple des plastiques

Le poids de plastique dans une automobile est passé de 3% à 14% en 20 ans et 100kg de plastiques ont remplacé 350kg de métal, soit une économie de carburant estimée à 4 millions de tonnes/an à l'échelle européenne [années 80'-90']



# Les trois grandes familles d'hydrocarbures

1. les HC saturés ou alcanes ou paraffines
2. les HC non saturés (alcènes, naphténo-aromatiques et arom.)
3. les résines et asphaltènes

....

**Les HC sont donc principalement issu de la matière organique, donc des organismes, donc de la Vie !**



**comment le sait-on????**

**... de nombreuses façons: C impairs, isotopes C, H, O, N... etc etc**

## Mais d'où VIENT LE PETROLE?



### MATIERE ORGANIQUE

Protéines

Carbo-hydrates

**Lipides**

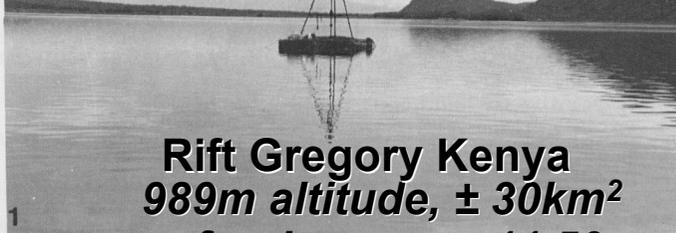
....



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

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

# Le demi-graben de Baringo-Bogoria



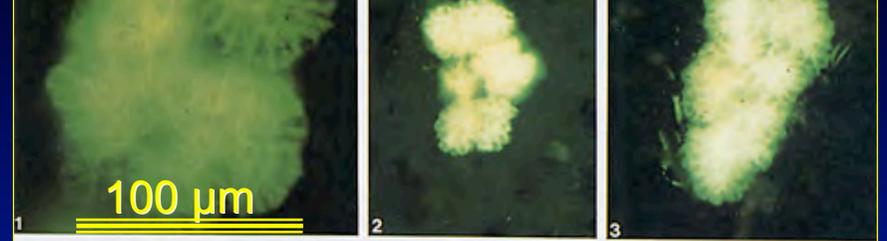
Rift Gregory Kenya  
989m altitude,  $\pm 30\text{km}^2$   
profondeur max: 11,50m



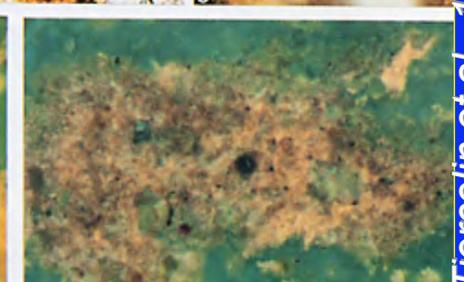
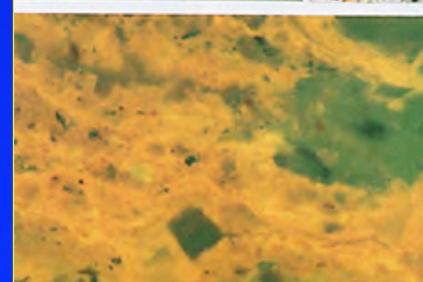
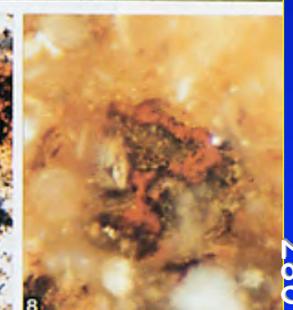
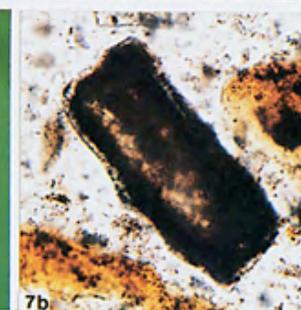
430 000 d'histoire sédimentaire  
Carottages de 0 à 16 m  
[entamés en 1977...]



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



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



Tiercelin et al., 1987

+ Diatomées

# CAROTTAGE

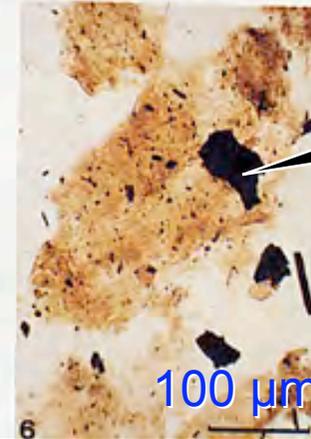
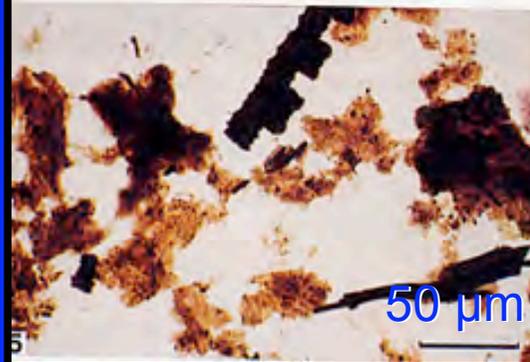
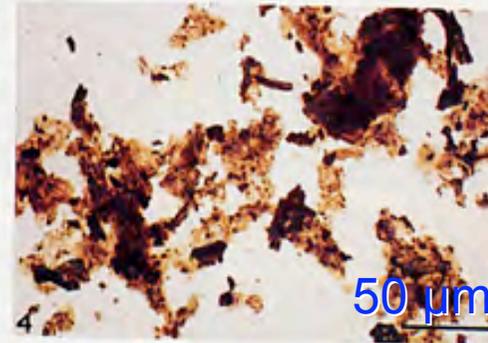
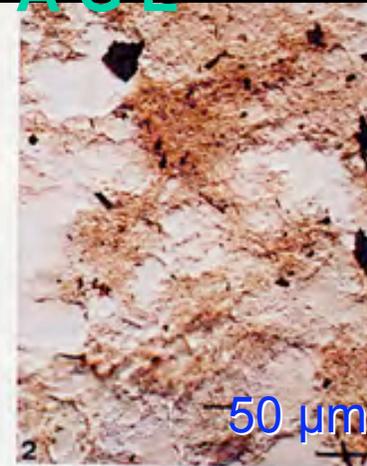
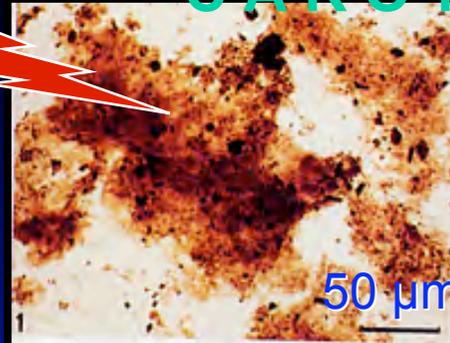
0m

**Palynofaciès amorphes  
et palynofaciès mixtes**  
[palyno = 'pollens']

**matière organique amorphe**

**débris ligneux, carbonisés  
charbon...**

**LAC DE  
BOGORIA  
RIFT GREGORY  
KENYA**



Tiercelin et al., 1987

4,55m

# Cyanobactéries et Chlorophycées

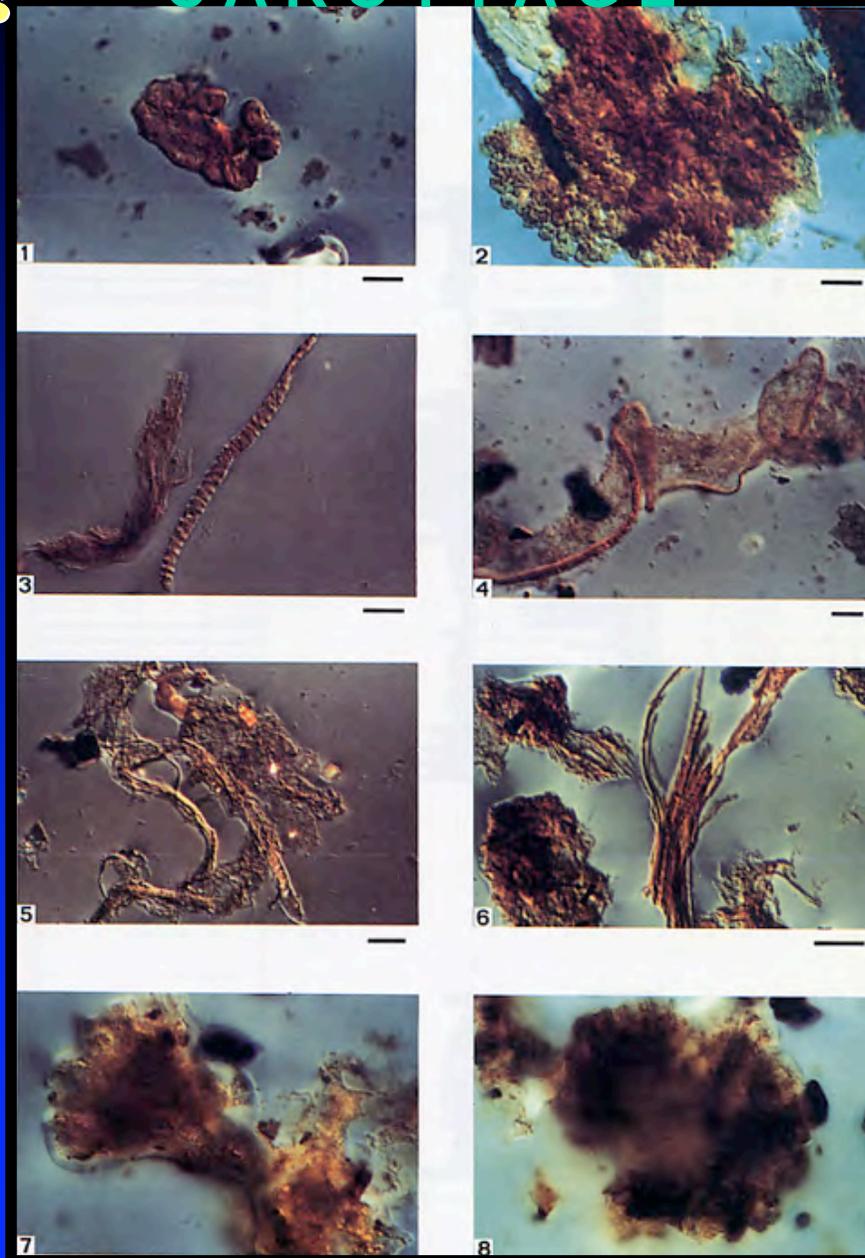
## CAROTTAGE

[échelle: barre = 10  $\mu\text{m}$ ]

- 1-2 Chroococcacées ...
- 3-4, 6 Oscillatoriacées ...
- 5 Rivulariacées
- 7-8 colonie de *Botryococcus braunii*

## LAC DE BOGORIA RIFT GREGORY KENYA

de 0 à 6 m  
de profondeur



Tiercelin et al., 1987

Octobre 1978

## LAC DE BOGORIA

'Bloom'

*Oscillatoria platensis*  
**cyanobactéries**  
(phytoplankton)

SURFACE du LAC



Tiercelin et al., 1987

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

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

[les Diatomées sont beaucoup plus riches en lipides]

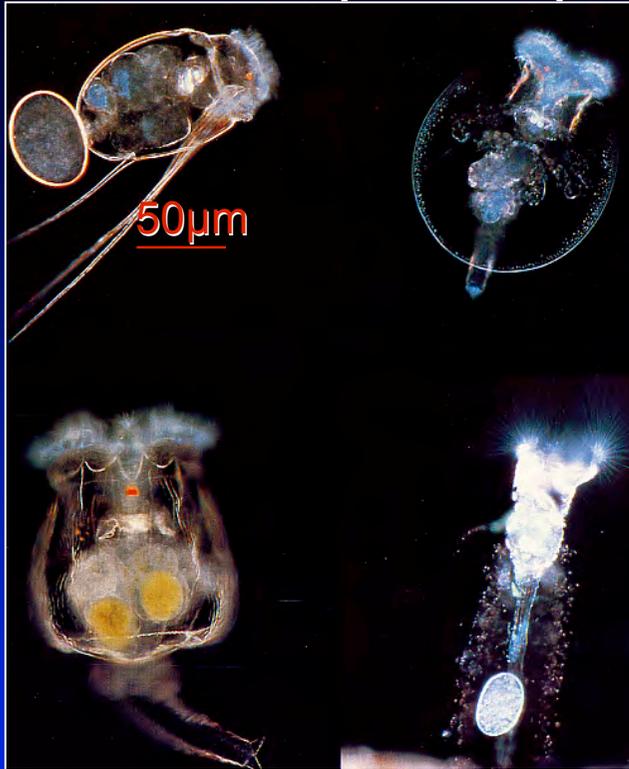
**Les bactéries** = surtout 'eau' + protéines, et jusqu'à 10% de lipides formant les HC C<sub>10</sub> à C<sub>30</sub>

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

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

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

## Ex: Rotifères planctoniques



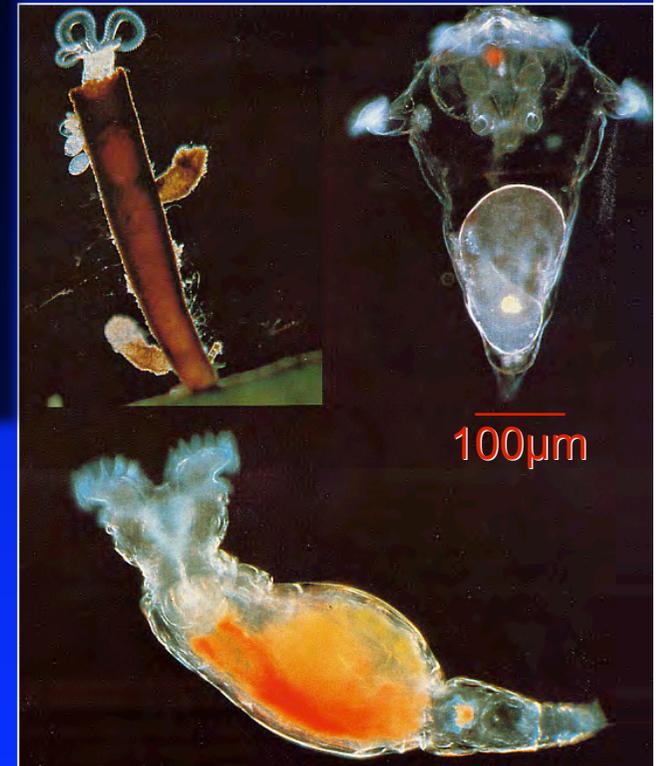
cosmopolites, 1800 sp,  
40 µm à 300 µm  
[surtout 100-500 µm]  
surtout eau douce...

# Le plancton est fort varié...

## Globigérine [400 µm]



*Clionea* mollusque  
3cm



**Ex de ZOOPLANCTON**  
protistes, cnidaires, cténares, polychètes,  
mollusques, crustacés, cténognathes,  
échinodermes, tuniciers, poissons...

**D  
E  
V  
E  
N  
I  
R**

C-H-O-N

**de la MO?**

C

100%

<  
0,1%

# MATIERE ORGANIQUE

préservation = milieux de dépôt

## KEROGENE

*macromolécules carbonées résultant de la transformation MO par microbes anaérobies*

transformation = 'cuisson'

'O/W'

## HYDROCARBURES

enfouissement excessif = 'carbonisation'

## ...METAMORPHISME

# MATIERE ORGANIQUE: quantité et rendement transformation

La 'Vie' utilise le carbone...  
Réserves en carbone = 20 millions de milliards de tonnes!

99,75% sont stockés dans les carbonates des sédiments

la Vie ne dispose donc, pour son usage immédiat que de 0,25%,  
soit quand même 50.000 milliards de tonnes

34.500 sont bloqués sous forme de CO<sub>2</sub> dans  
des mers très profondes (malgré un très lent  
renouvellement avec la surface...)  
10.000 sont bloqués sous forme de C fossile

= 'HC'...

Charbon-Pétrole-Gaz  
3000 à 5000 GtC exploitables  
Climatologues: pas dépasser 1000 à 2000  
CO2: 280-380[2007]-1200 à 4000 [en 3000]

# MATIERE ORGANIQUE: quantité et rendement transformation

$$[50.000 - 34.500 - 10.000 = 5.500]$$

 il reste donc 5.500 milliards de tonnes de carbone

dont 1150 sur terre

dont 3000 en mer

dont 1350 dans l'atmosphère

immédiatement disponible  
pour la synthèse chlorophyllienne  
et par le bicarbonate de Ca des  
eaux superficielles des océans

ET LE PETROLE  
dans tout cela ?  
= 'HC'...

## MATIERE ORGANIQUE: quantité et rendement transformation

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

**= 10.000 milliards de tonnes de carbone fossile**

accumulée en  $\pm 500$  Ma, soit 20.000 t/an

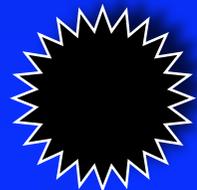
qui échapperaient aux cycles de la Vie

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



### **POURQUOI SI PEU?**

*car l'oxygène est presque partout et les micro-organismes aérobies biodégradent la matière organique morte [si pas d'O<sub>2</sub> libre, les bactéries 'anaérobies' vont le chercher dans les SO<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>....]*



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

## MATIERE ORGANIQUE: quantité et rendement transformation

**OU CELA A-T'IL LIEU?**

**= dans des milieux très confinés**

où l'oxygène de l'air n'a pas accès...



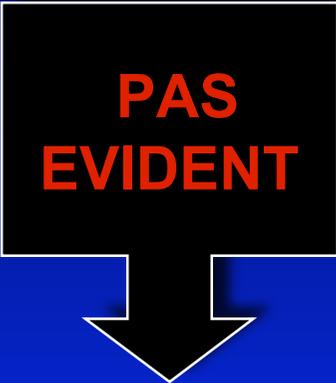
**sédiments fins et compacts des fonds de mer ou de lacs [sapropèles]**

**= ROCHES-MERES ou ROCHES SOURCES**

# ROCHES-MERES ou ROCHES SOURCES

pour former une roche mère il faut conserver la matière organique

**PAS  
EVIDENT**



la plus grande partie de la M.O. d'origine planctonique est détruite au cours de sa chute à travers la tranche d'eau dont la vitesse est de l'ordre de 100 m par semaine

- ★ 2% seulement atteignent les fonds peu profonds
- ★ 0,02% les grands fonds océaniques

les quantités sédimentées sont finalement fonction de la biomasse produite c'ad de la productivité organique du milieu et des conditions physico-chimiques du milieu de dépôt  
*cfr géologie... et 'proxy' de paléo-biproductivité*



## MATIERE ORGANIQUE: rendement de l'opération

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



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



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



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

# 1. Embouchure fleuve tropical, delta....

charriage d'une masse phénoménale de débris végétaux mélangés à des sables et à des argiles. Suite à l'oxygène océanique omni-présent, les micro-organismes, les faunes benthiques consomment tout et rejettent 0,1% de déchets organiques qui vont s'accumuler petit à petit...

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



## 2. Zones d'upwelling

zones privilégiées où l'eau froide des fonds océaniques (des mers polaires) remonte aux abords d'un continent. Cette eau dense et enrichie en oxygène, 'racle' les fonds et récupère les sels minéraux produits par la décomposition des organismes marins. Elle remonte ensuite enrichie en nutriments ( $\text{SO}_4$ ,  $\text{PO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ , Ca, K, Na.....) et tout le phytoplancton (algues unicellulaires, diatomées...) explose de vie à la surface en consommant tout l'oxygène. Finalement il y a **ANOXIE** juste en-dessous... et la matière organique (liée à cette explosion de Vie) est préservée des dégradations aérobies: **il se forme un sédiment très riche contenant 4 à 7% de matière organique.**

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

### 3. Anaérobioses

= la 'mise en conserve' du sédiment au fond des mers fermées, ou semi-fermées, des lacs, des lagunes et autres mares saumâtres. En surface l'eau est oxygénée et la matière organique s'accumule au fond sans dégradation excepté par les bactéries sulfato-réductrices qui rejette de l' $H_2S$  (toxique) à partir des acides aminés et des sucres.

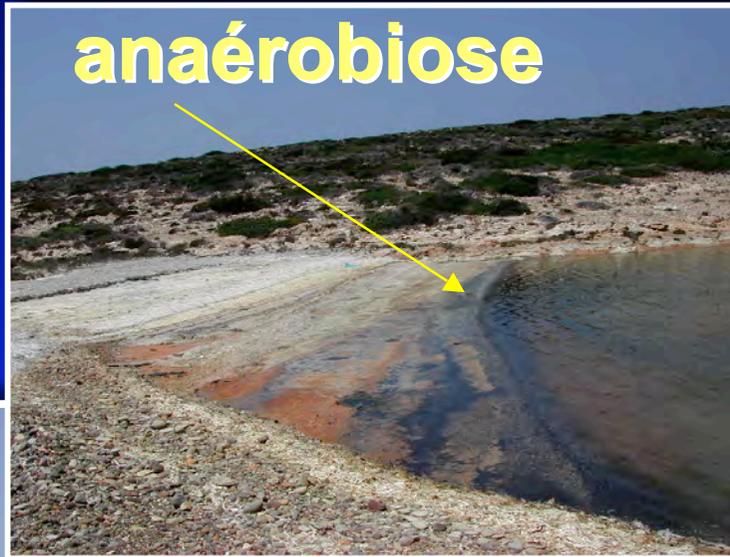
Le sédiment devient réducteur et riche en MO (plusieurs %) peu dégradée.

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

*Ex: Mer Noire >3% MO et >0,2g C/m<sup>2</sup>/j*

# HERBIERS à POSIDONIES

Cyclades, Grèce, 2003

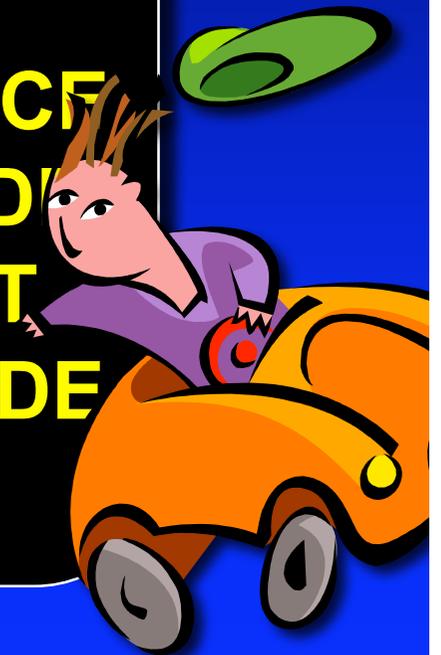


sédiment réduit

# RENDEMENT

un chiffre méconnu ...

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



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

# CONCLUSION

le **kérogène** est le **précurseur** des HC, il provient de  
**DEGRADATION-POLYCONDENSATION-INSOLUBILISATION**  
de la MO attaquée par les micro-organismes [bactéries et fungi]  
dès les premiers cm d'enfouissement

**ensuite...**

**DEGRADATION THERMIQUE du KEROGENE**

ROCHE MERE = CONDITION NECESSAIRE...

M  
Z  
M  
Q  
O  
R  
M  
K

PÉTROLE



Restlé, 1986

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



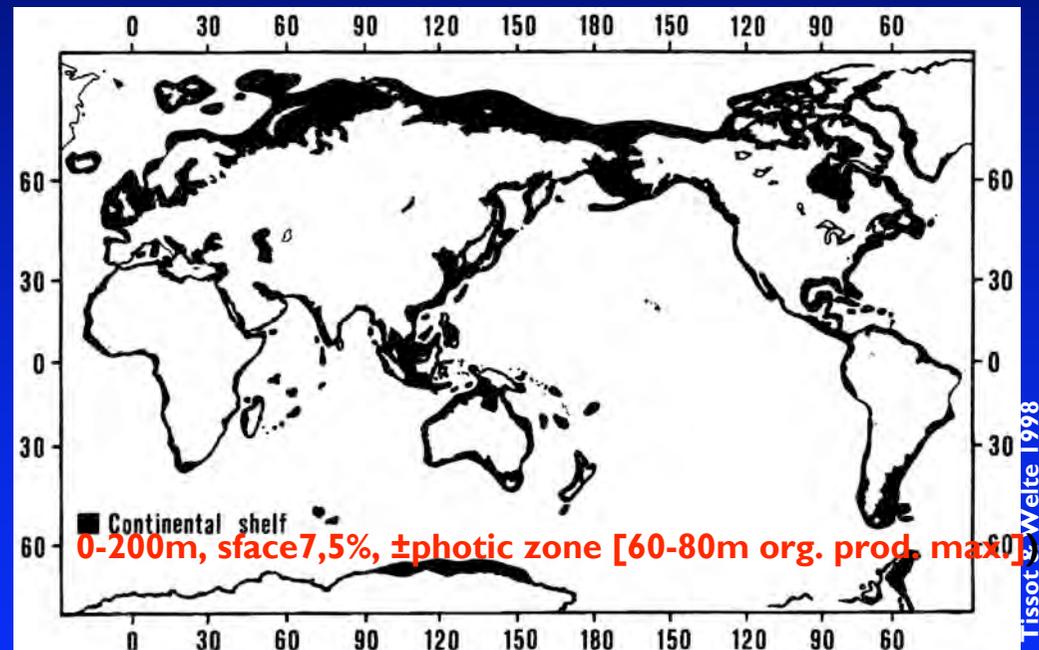
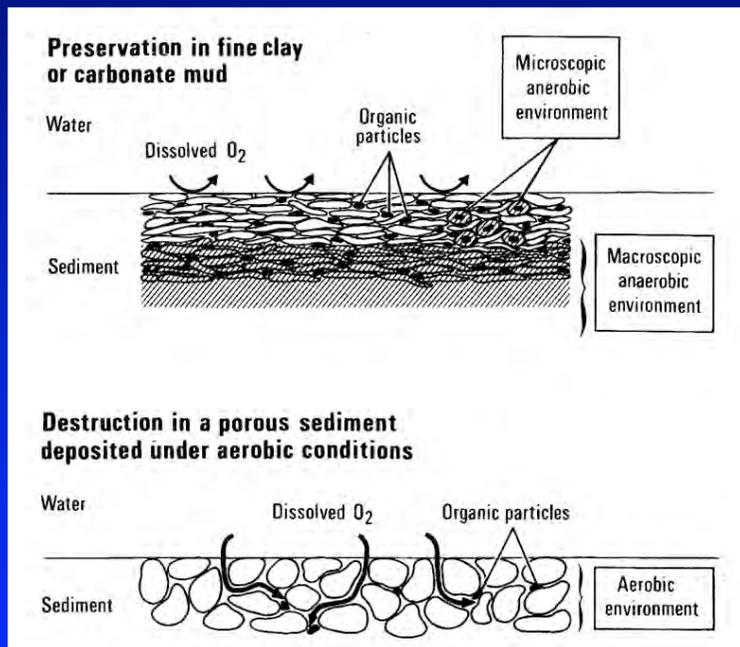
la matière organique des roches mères est donc **d'origine continentale** (végétaux sup, et algues -lacs) et **d'origine marine** (végétaux marins, algues etc.) et/ou mixte

en moyenne  
sédiments  $\ll 0.5\%$  M.O.

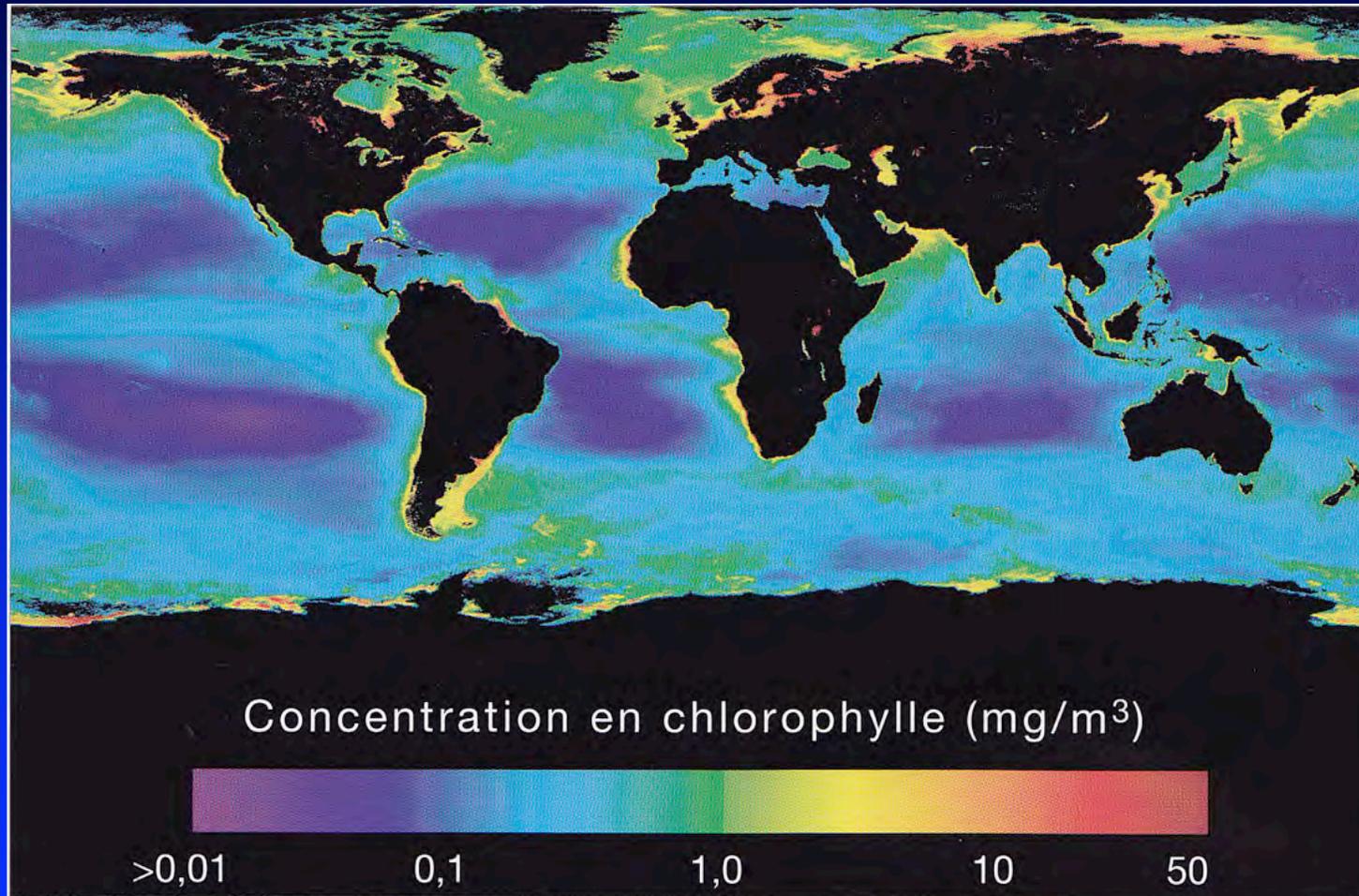


roches-mères  
2-10%  
(parfois plus)

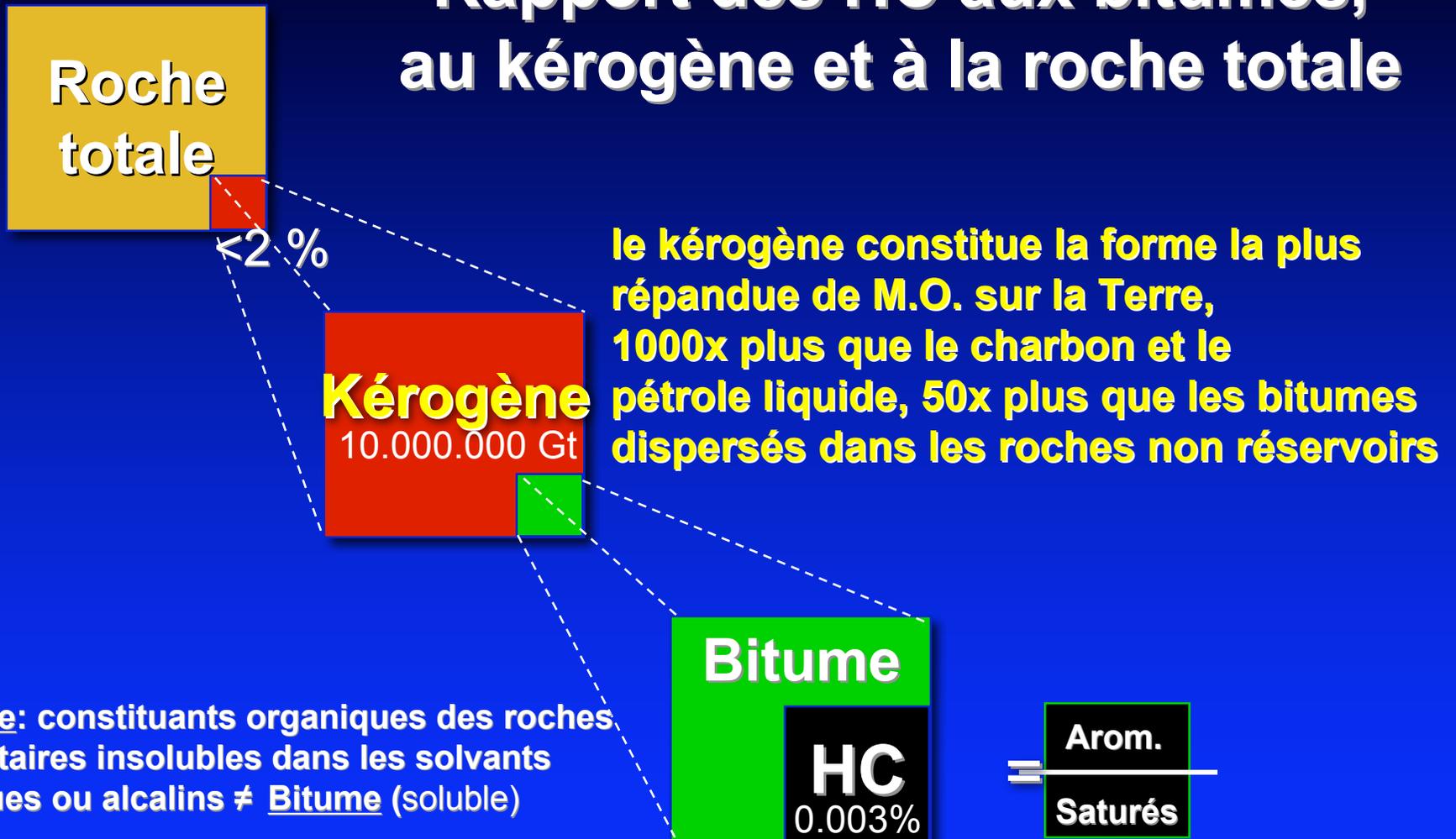
# ORIGINE DE LA MATIERE ORGANIQUE ET DU KEROGENE



**Carte satellitaire (données NASA) de la concentration moyenne annuelle en chlorophylle (exprimée en  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) des eaux de surface de l'océan global**



# Rapport des HC aux bitumes, au kérogène et à la roche totale



Kérogène: constituants organiques des roches sédimentaires insolubles dans les solvants organiques ou alcalins  $\neq$  Bitume (soluble)

**Le kérogène se trouve à l'état très dispersé dans les roches anciennes càd  $\ll 2\%$ . Certains schistes bitumineux en contiennent jusqu'à 40%...**

# **Kérogène: c'est la M.O. à l'origine du pétrole. Il est amorphe, insoluble à 95% et lié à la roche**

Il est déjà le résultat de l'action de bactéries anaérobies sur de la M.O. emprisonnée à l'abri de l'air, dans des sédiments fins. Il s'agit donc de la forme fossilisée de la M.O. dans les roches anciennes, suite à l'augmentation de température (enfouissement).



## **Plus en détail:**

- (1) Matériel cellulaire dégradé (cuticules, feuilles, pollens, spores, algues...)**
- (2) Complexe soluble dans l'eau contenant acides aminés et carbo-hydrates**
- (3) Acides fulviques**
- (4) Acides humiques**
- (5) KEROGENE = GEOPOLYMERE INSOLUBLE ou MACROMOLECULE**  
*[surtout formé par les LIPIDES qui sont les plus résistants à la biodégradation]*

**Le kérogène se trouve à l'état très dispersé dans les roches anciennes càd <<2%. Certains schistes bitumineux en contiennent jusqu'à 40%...**

# GENESE DU PETROLE = DIAGENESE + CATAGENESE

**D**  
**I**  
**A**  
**G**  
**E**  
**N**  
**E**  
**S**  
**E**

le kérogène n'est pas le pétrole

**POUR CELA IL FAUT**

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

ensuite seulement

-si tout va bien-

un piège

cela fonctionne grâce à la  
subsidence

(pression+gradient géothermique)



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

Roche Source  
riche en Matière Organique



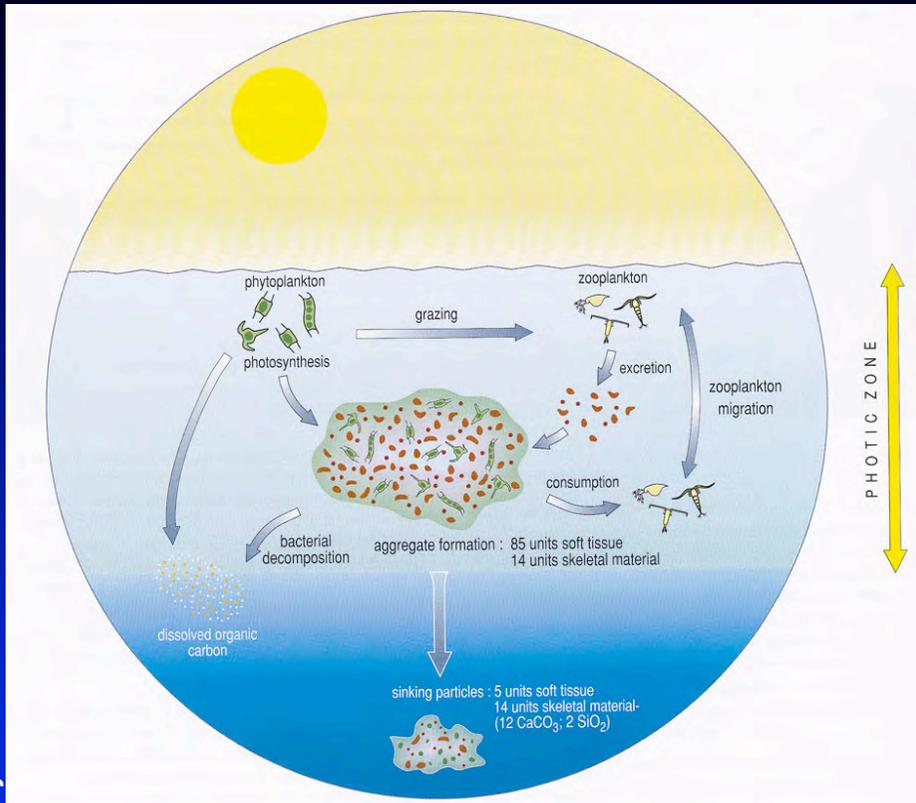
Maturation Thermique  
de la Matière Organique



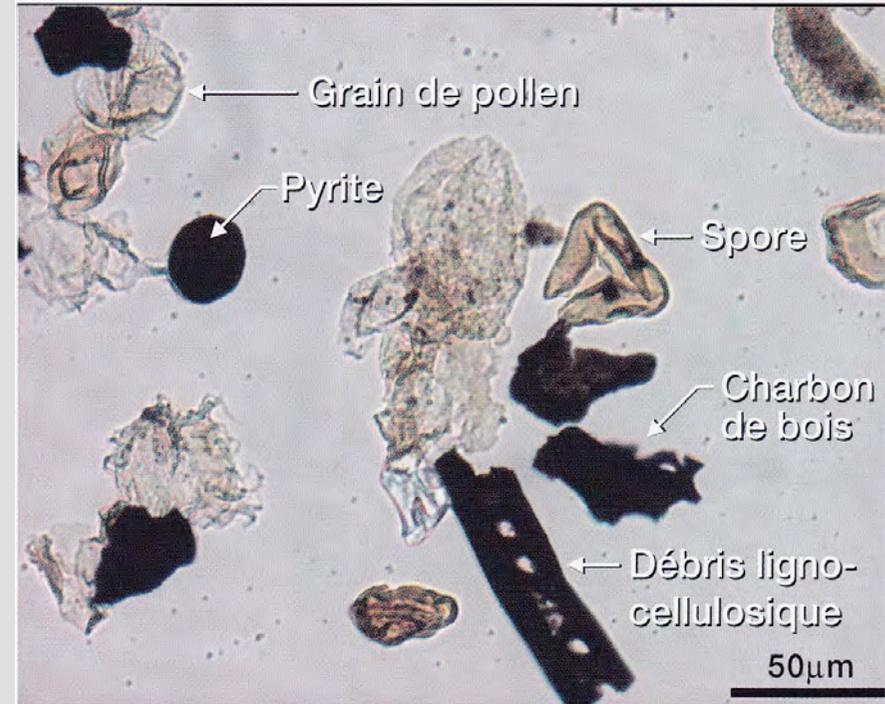
**HUILE**

**GENESE DU PETROLE**  
**=**  
**DIAGENESE + CATAGENESE**

**POUR INFO ...**



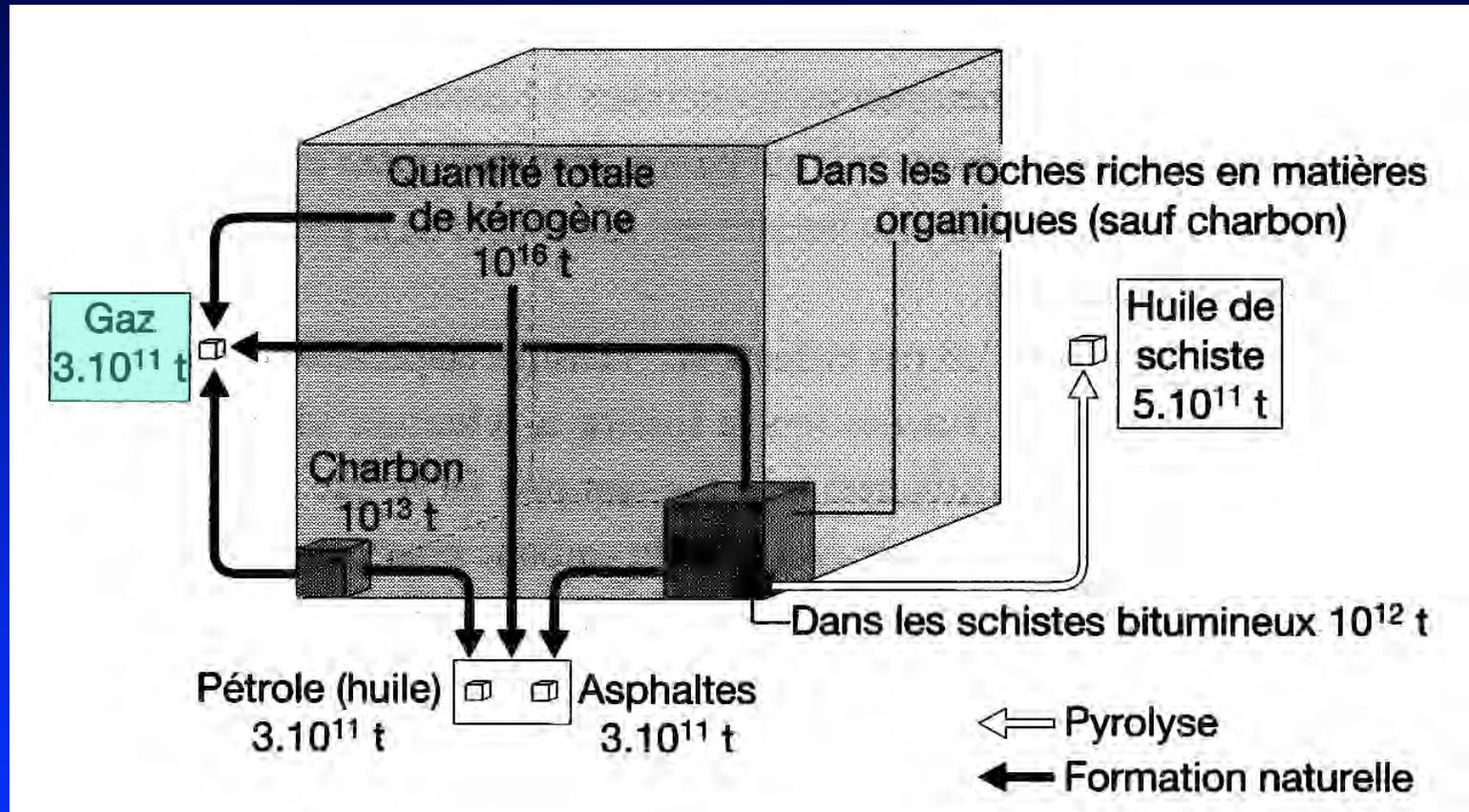
**Matière organique particulaire.**  
 Suite au recyclage permanent dans la zone photique, seul  $\pm 6\%$  de la matière organique atteint les bassins profonds... ensuite préservation?



**Palynofaciès des calcaires du Jurassique supérieur de l'île d'Oléron montrant différents types de particules organiques et des grains de pyrite**



Le kérogène est 10 000 [ $10^{16}t$ ] plus abondant que la MO vivante [ $10^{12}t$ ]  
 malgré que 0,01-1% de la production primaire soit fossilisée  
 => importance des 'temps' géologiques pour les accumulations...



Durand 1987

Aujourd'hui (2010's): extraction de  $6.10^9 t/an$  de carbone

HALOCINESE  
EVAPORITES

Dissoutes

et

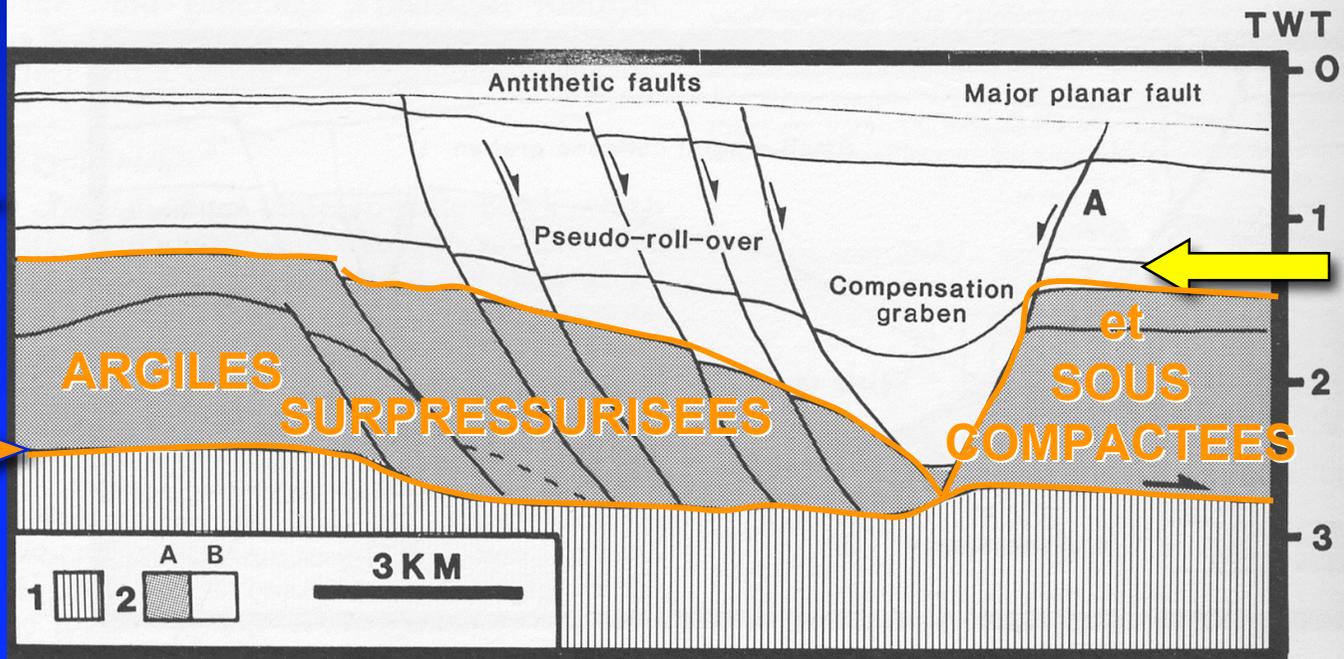
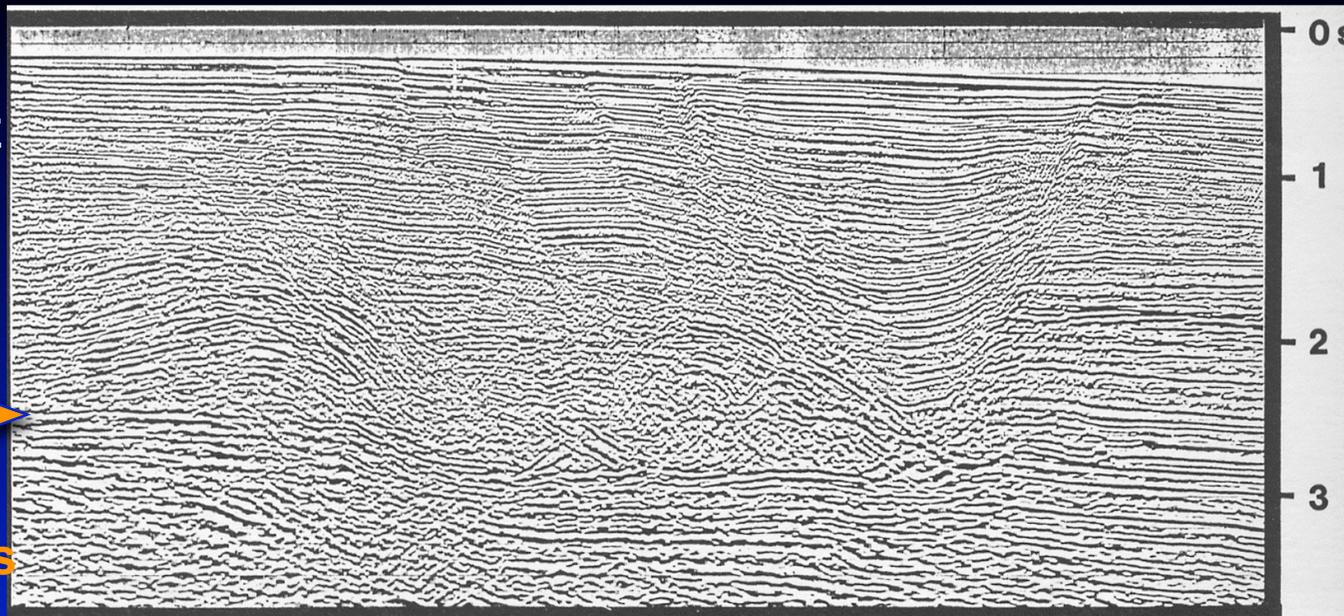
ARGILES

surpressurisées

ARGILO-  
CINESE

dysharmonie  
de  
'plissement'

Faure & Gnermette 1989



Failles  
Planes  
et  
GRABEN  
et  
Compensation  
+  
ROLL-OVER  
ou anticlinal  
de compensation