

Les ressources carbonées fossiles: obscurs objets du désir

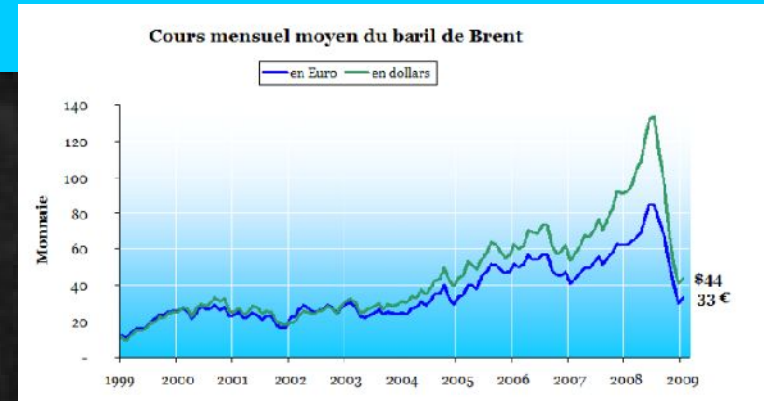
Gilles Dromart

Laboratoire de Sciences de la Terre

UCBL, ENS Lyon

Bibiheyb, Azerbaïdjan, puits en éruption, 1898

Techniquement exploitable
Economiquement rentable
Ecologiquement convenable



Les ressources carbonées fossiles: obscurs objets du désir

Gilles Dromart

Laboratoire de Sciences de la Terre
UCBL, ENS Lyon

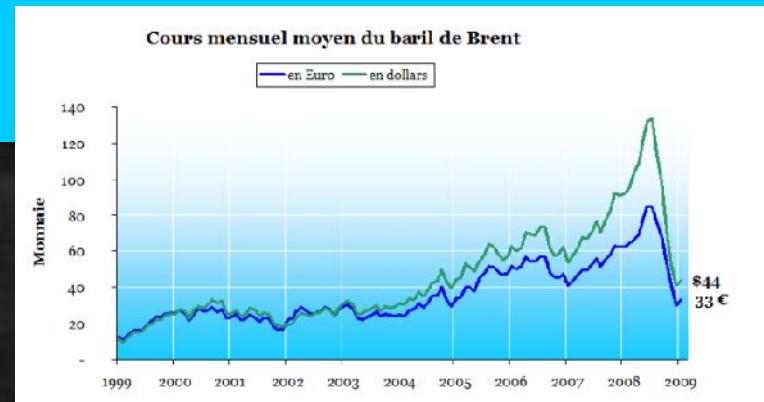
Bibiheyb, Azerbaïdjan, puits en éruption, 1898

Diversité des ressources

Pas tous égaux devant ces ressources

L'activité E-P domestique est assez discrète

La région a quelques atouts cachés





Le gaz...

Le gaz naturel (méthane / C1) (ou « gaz de ville »)

Les « liquides de gaz naturel » (éthane, propane, butane / C2 à C4) restent des gaz à température ambiante, mais sont liquéfiés dans les usines qui traitent le gaz, par cryogénie. Butane et propane sont souvent appelés Gaz de Pétrole Liquéfié (GPL).

Les « condensats », ce nom désigne la fraction légère allant du pentane (C5H12) jusqu'à l'octane (C8H18). À la différence du (pétrole) brut, les condensats ne sont pas liquides dans les gisements, mais gazeux (du fait de la température), et se *condensent* lorsqu'ils sont refroidis par la détente à la sortie du puits.

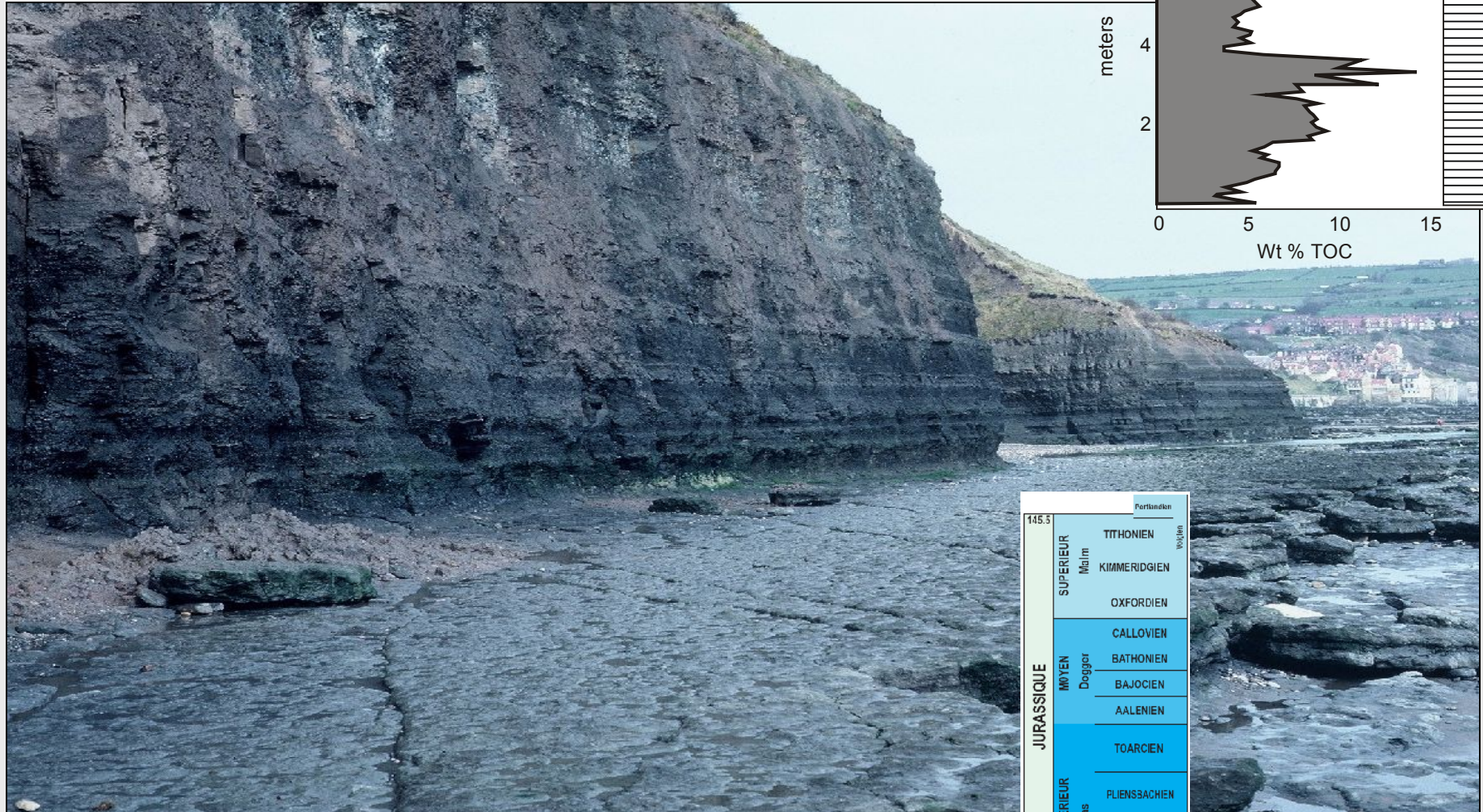
Le pétrole...



Le « pétrole brut » (ou *crude*) désigne le pétrole qui se trouve à l'état liquide dans le gisement et coule librement, sous pression au début de l'exploitation d'un puits et par pompage.

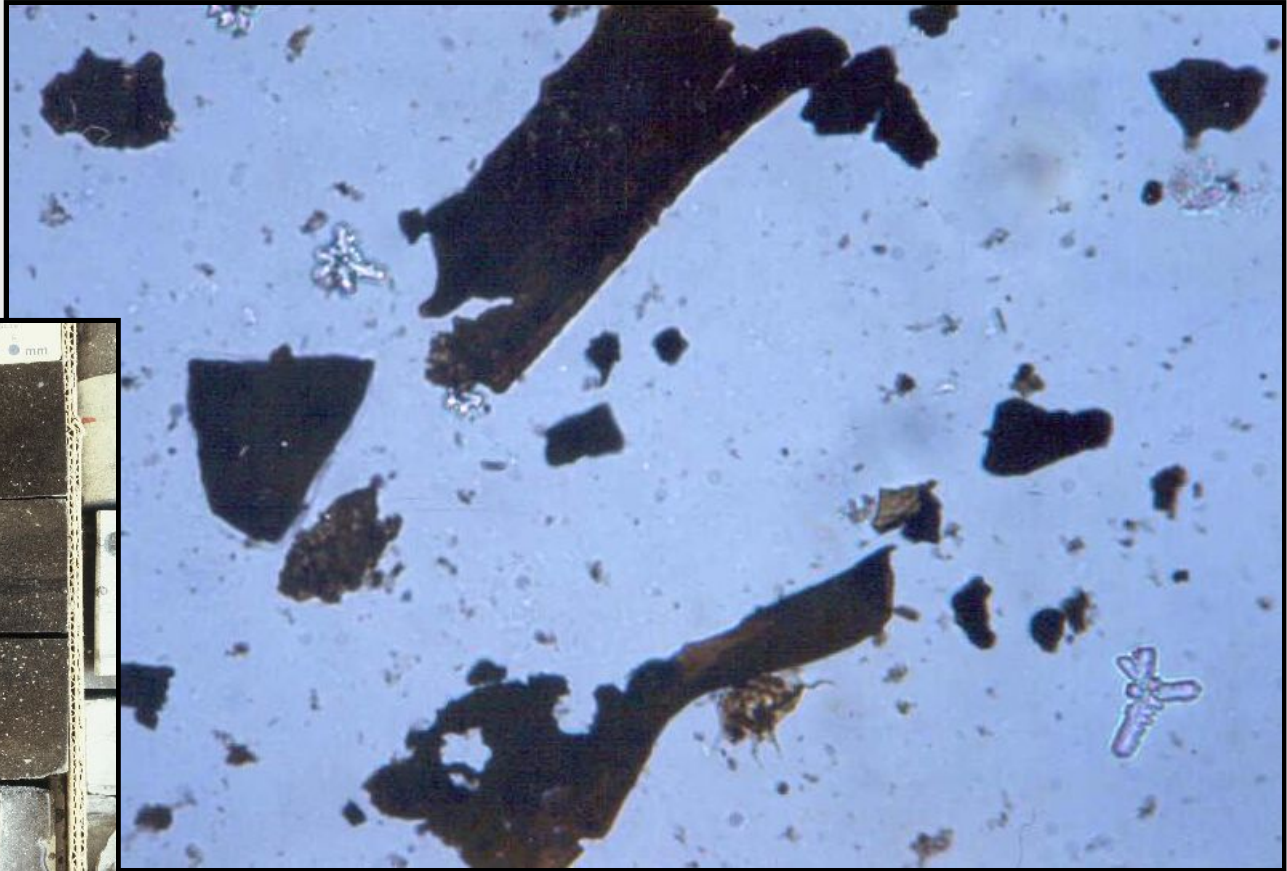
Les pétroles extra-lourds, très visqueux. Il est produit via des opérations d'ajout d'hydrogène et d'injection de vapeur et/ou de solvants.

Schistes noirs et bitumineux



Toarcian Jet Rock, Yorkshire, UK

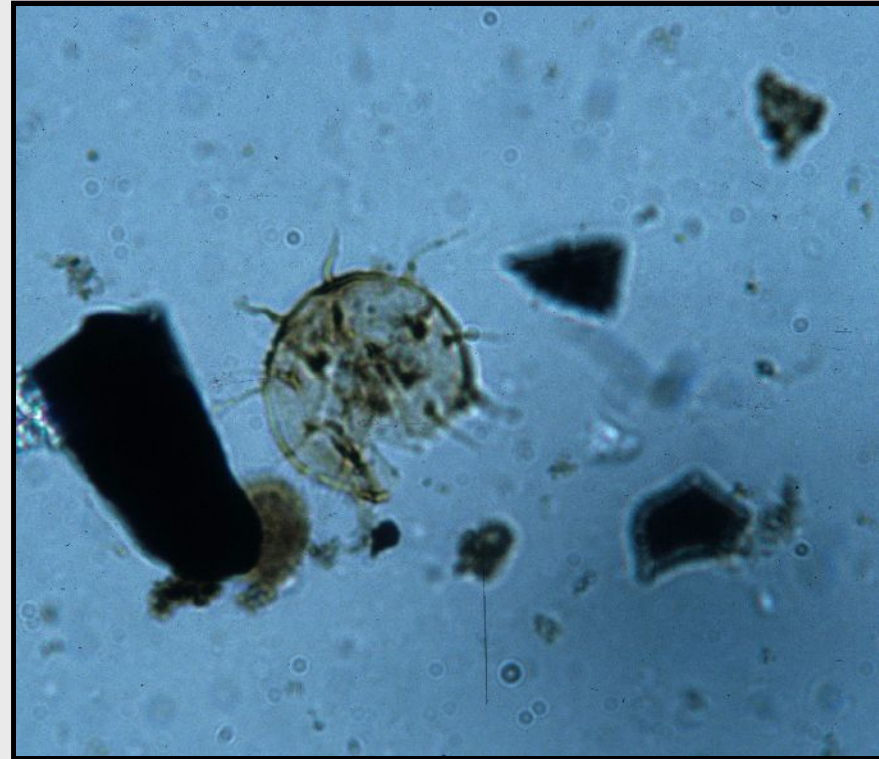
Débris de végétaux supérieurs, Lias



Microfossiles organiques

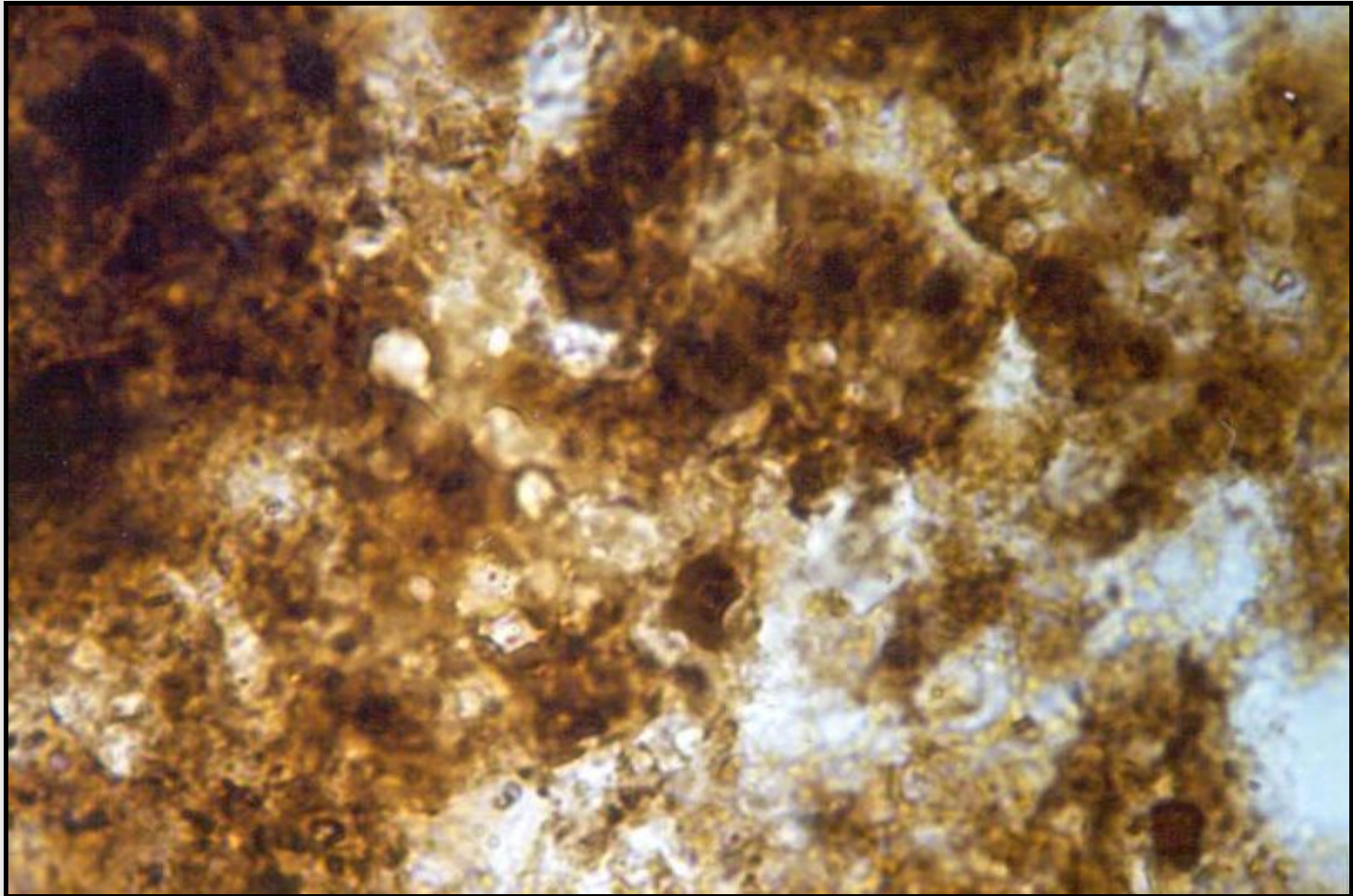


Grain de pollen, Lias



Dinoflagellé, Lias

Matière organique amorphe, Lias



Les charbons

Charbon sapropélique lacustre
(spores, algues)
Série carbonifère des Cévennes
(site fossile de Champclauson)



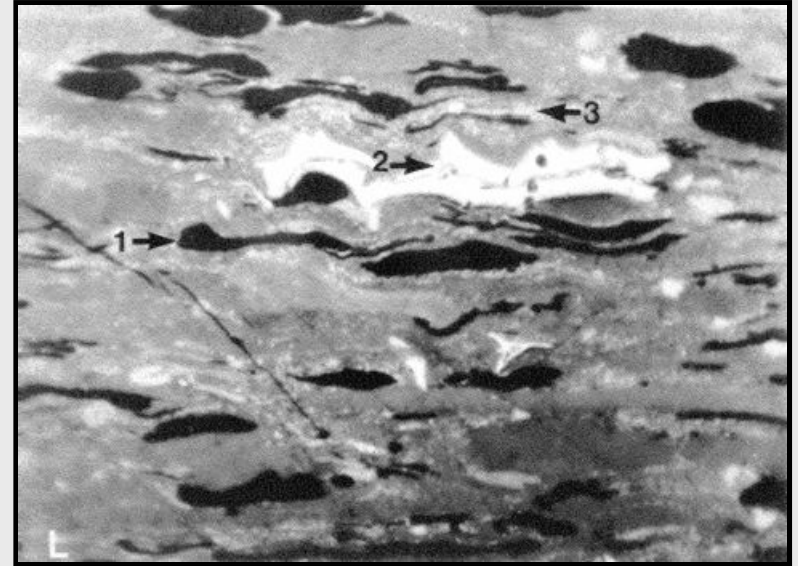
Roches-mères de plaine d'inondation
(charbon humique, série carbonifère des Cévennes)



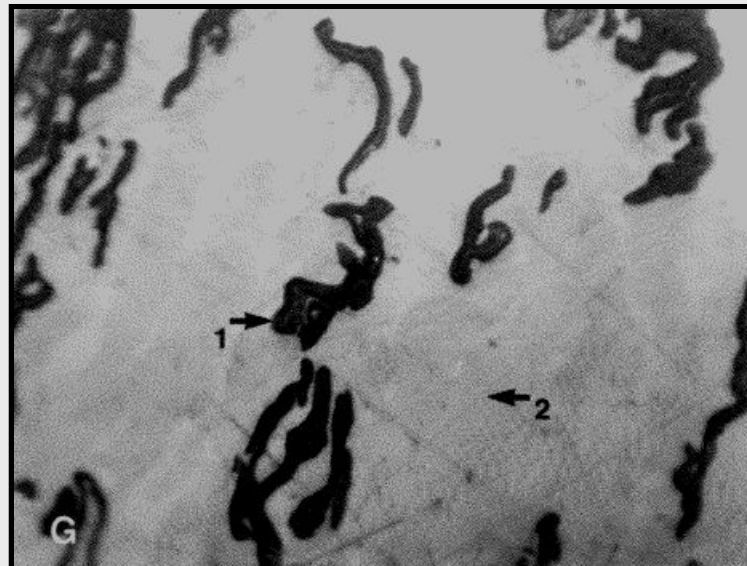
Macéraux du charbon



Fusinite(1) (charbon de bois)



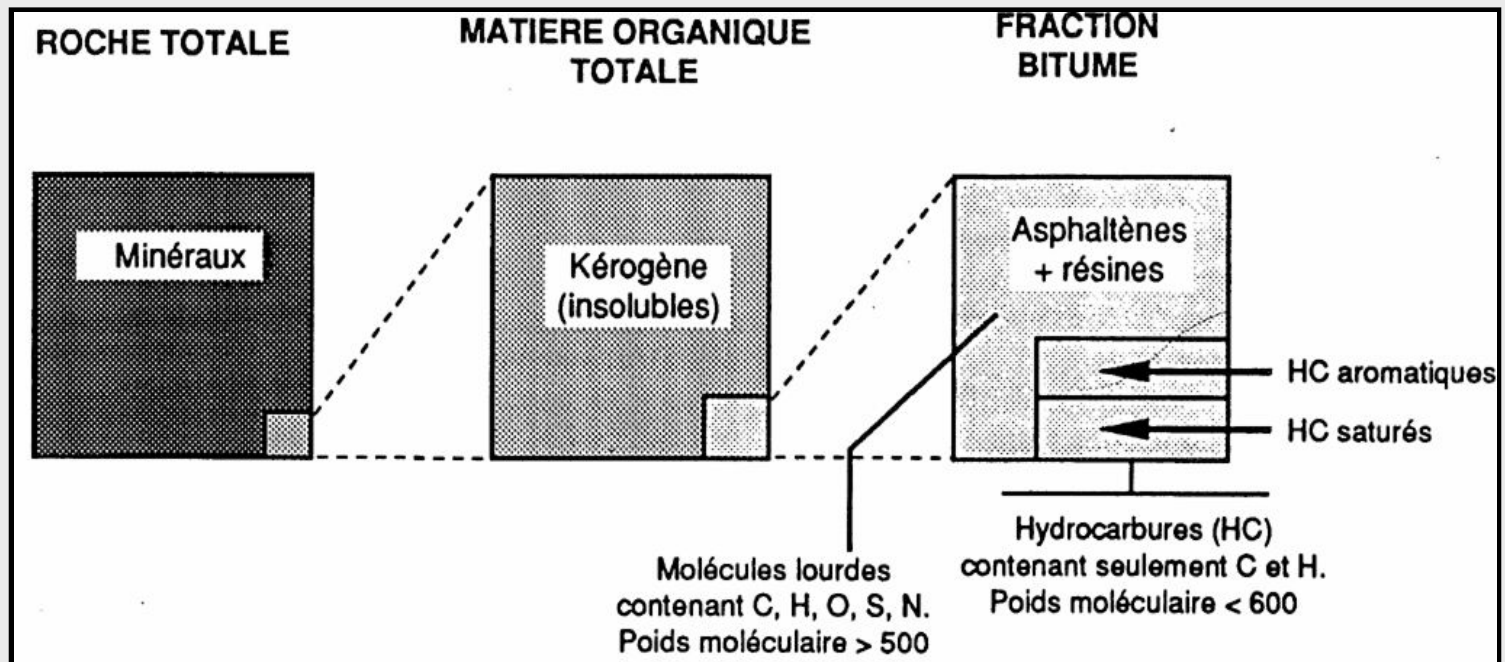
Exinite(1) (liptinite: feuilles, spores, pollens)



Vitrinite(2) (tiges)

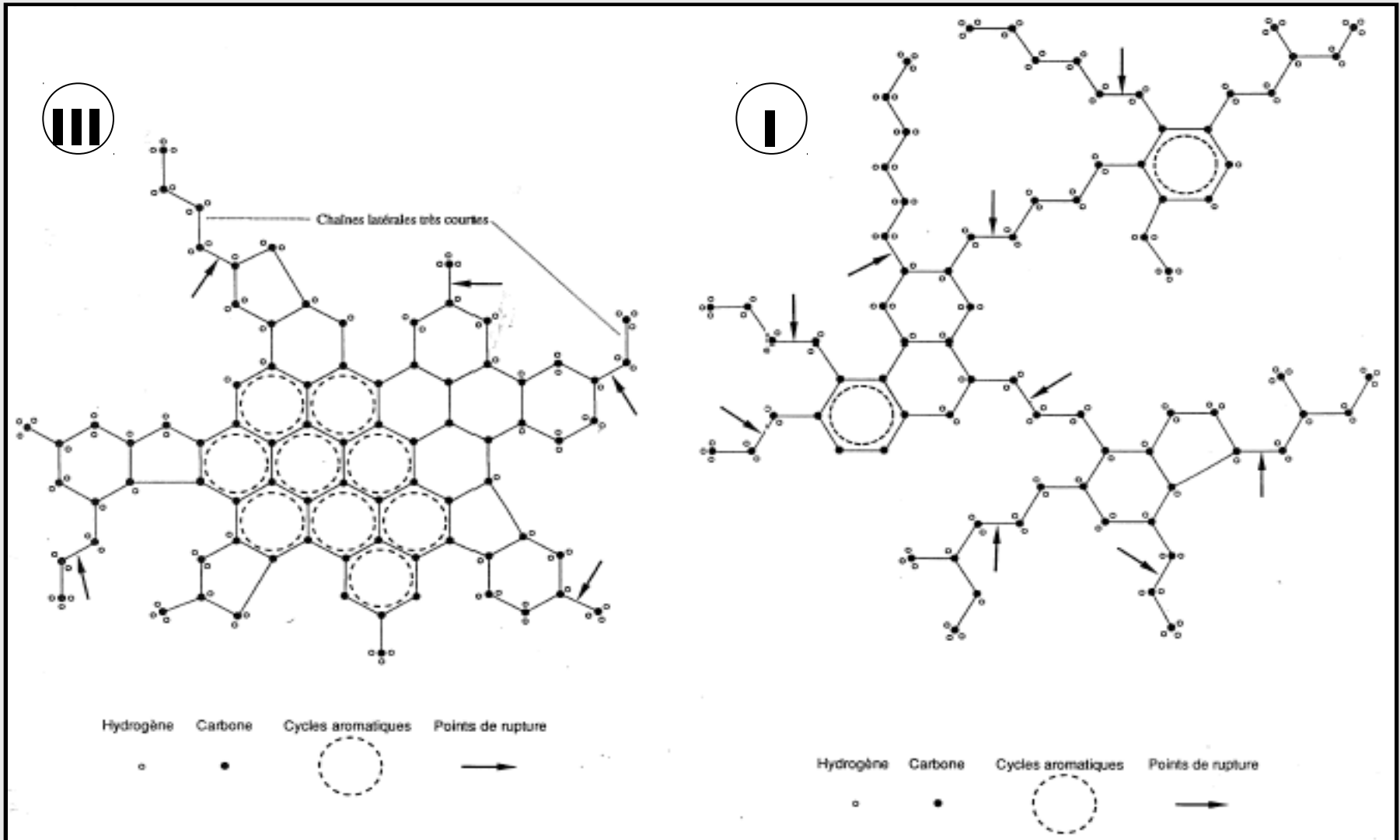
La notion de kérogène

- Fraction organique insoluble dans les solvants organiques comprenant des éléments figurés (débris de végétaux supérieurs, microfossiles) et des matières amorphes (sans structure optiquement apparente)

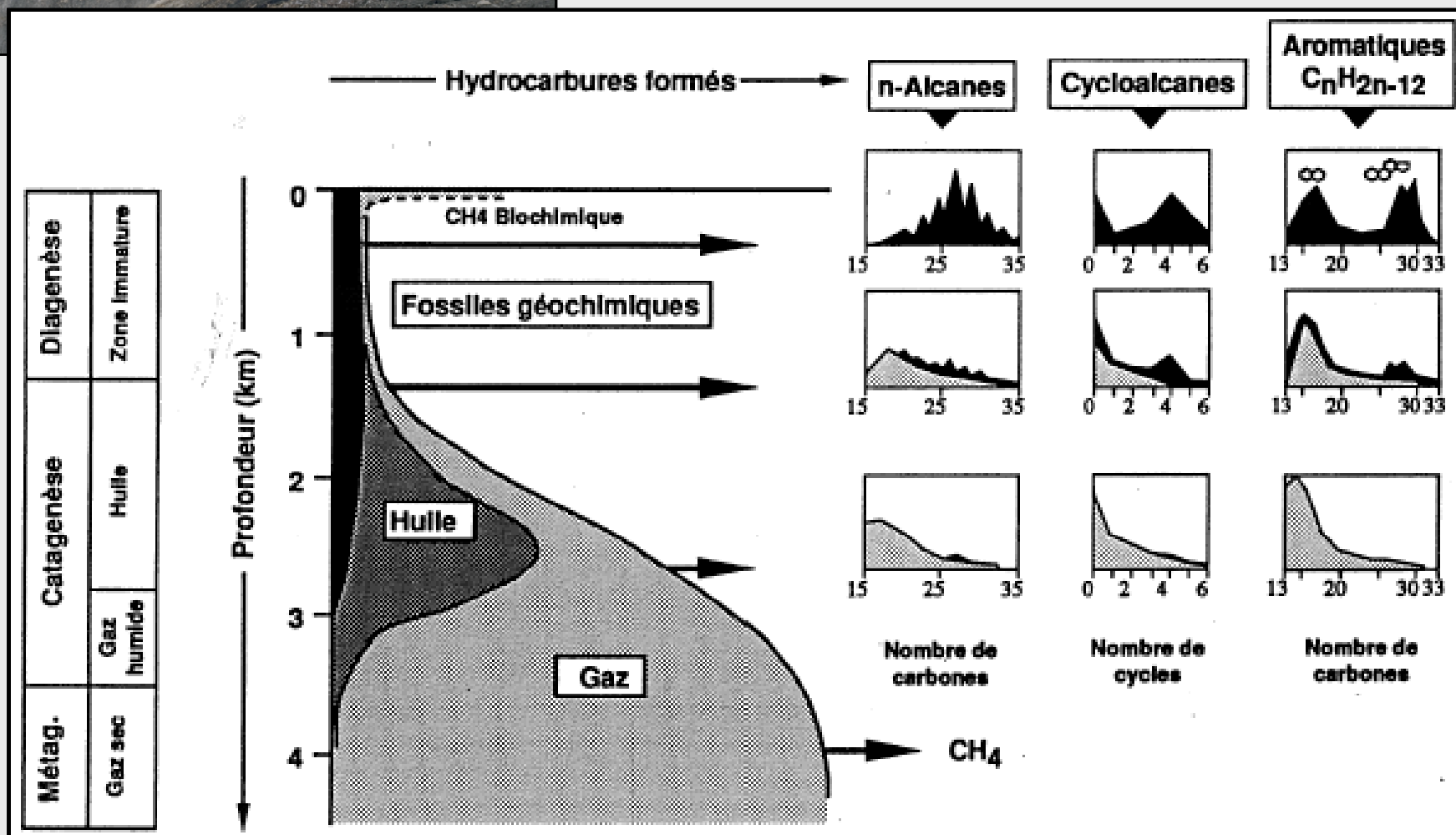


Le kérogène moléculaire

Type I (riche en hydrogène et chaînes linéaires ; schistes noirs et charbons sapropéliques ; générateur d'huile) jusqu'à type III (riche en carbone et chaînes cycliques ; charbons humiques ; générateurs de gaz)



Des kérogènes aux hydrocarbures: Formation et migration des hydrocarbures



4 produits combustibles

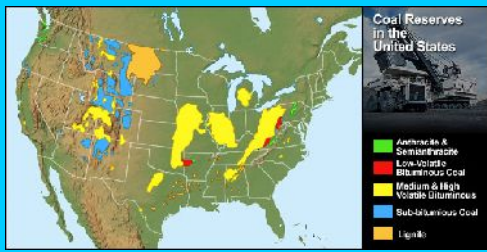
Gaz → Pétrole → Schistes → Charbons

→ Rendement énergétique diminue !











→ La quantité de GES augmente !

Quid de la quantité et de la
répartition des réserves dans
le monde ?

Pas égaux, loin s'en faut !



Les réserves globales de charbons (2007 - millions tonnes)

		Réserves totales (Mt)	Subbitu& Lignite	Anthrac. & Bitumin.	Export	Product ion	P/R (%)	R/P années
	Etats-Unis	242 721	130 460	112 261	25.8	977	0.9	115
	Russie Féd.	157 010	107 922	49 088	97.5	233	0.5	210
	Chine	114 500	52 300	62 200	63.7	2 383	3.8	26
	Inde	92 445	2 360	90 085				
	Australie	76 600	39 500	37 100	232.1	309	0.8	120
	Afrique du Sud	48 000		48 000	67.7	244	0.5	196
	Ukraine	34 153	17 819	16 274				
	Kazakhstan	31 279	3 128	28 151				
	Pologne	7 502	1 490	6 012	16.2	94	1.6	64
	Brésil	10 103	10 103					
		478 711						230

Le charbon en France

- 58,9 millions en 1958 : année record de production charbonnière française.
- Le 21 décembre 1990, le dernier puits en activité dans le Nord, arrête sa production. Après 270 années d'exploitation et 2,4 milliards de tonnes extraites.
- Avril 2004 : fermeture de la dernière mine de charbon en France à La Houve en Lorraine

Les réserves globales de pétrole (2006 – milliards barils)
(1 baril ~ 160 l) - production globale d'environ 86,5

Millions b.j⁻¹

	Réserves totale (Gb)	Export	Production	P/R (%)	R/P années
Arabie Séoudite	267	2.9	3.8	1.4	70
Canada (sables bitumineux)	179		1.2	1.5	149
Iran	132	0.99	1.5	1.1	88
Iraq	115		0.73	0.6	157
Koweït	104	0.8	0.91	0.87	114
Emirats A.U.	98	0.96	1	0.1	97
Venezuela	79	0.84	1	0.13	79
Russie (Fed)	60	2.5	3.4	0.56	18
Nigéria	36	0.85	0.91	2.52	40
Etats Unis Am	21		3.18	15.1	7

Le prolifique Moyen-Orient:
pétrole et gaz à tous les étages



Le *Top 12* des plus grands champs de pétrole dans le monde

Champs	(Réserves récup)
Ghawar, Saudi Arabia	75-83 billion barrels
Burgan, Kuwait	66-72 billion barrels
Cantarell, Mexico • (often listed as a large complex of multiple smaller fields)	35 billion barrels OOIP 18 billion recoverable
Bolivar Coastal, Venezuela	30-32 billion barrels
Safaniya-Khafji, Saudi Arabia/Neutral Zone	30 billion barrels
Rumailia, Iraq	20 billion barrels
Tengiz, Kazakhstan	15-26 billion barrels
Ahwaz, Iran	17 billion barrels
Kirkuk, Iraq	16 billion barrels
Marun, Iran	16 billion barrels
Daqing, China	16 billion barrels
Gachsaran, Iran	15 billion barrels

Le *Top 15* des plus grandes réserves de gaz dans le monde (1 Tcf = 10¹² cubic feet = 28 Gm³)

Gas Reserve estimate

Russia	1,680 trillion cubic feet (? 2,300 tcf)
Iran	940 trillion cubic feet
Qatar	910 trillion cubic feet
USA	265 trillion cubic feet
Saudi Arabia	235 trillion cubic feet
United Arab E.	212 trillion cubic feet
Nigeria	176 trillion cubic feet
Algeria	161 trillion cubic feet
Venezuela	151 trillion cubic feet
Iraq	110 trillion cubic feet
Kazakstan	106 trillion cubic feet
Turkmenistan	102 (? 535) trillion cubic feet
Indonesia	90 trillion cubic feet
Malaysia	87 trillion cubic feet

Le *Top 15* des plus grands champs de gaz dans le monde

North Dome - South Pars, Qatar-Iran	to 1,200 tfc (950 in Qatar)
Urengoy, West Siberia, Russia	>275 trillion cubic feet
Yamburg, West Siberia, Russia	prob. >200 trillion cubic feet
Orenburg, Volga Region, Russia	prob. >200 trillion cubic feet
Shtockmanov, Barents Sea, Russia	prob. >200 trillion cubic feet
Umm Shaif + Abu el-Bukush, Abu Dhabi	175 trillion cubic feet
Zapolyarnoye, West Siberia, Russia	150+ trillion cubic feet
Kharasevey, West Siberia, Russia	150+ trillion cubic feet
Bovanenko, West Siberia, Russia	125 trillion cubic feet
Medvezh'ye, West Siberia, Russia	100+ trillion cubic feet
Hassi R'Mel, Algeria	100 trillion cubic feet
South Pars, Iran	100 trillion cubic feet
Panhandle-Hugoton, USA (TX-OK-KS)	80 trillion cubic feet
Groningen, Netherlands	66 trillion cubic feet
Ghawar Oil Field, Saudi Arabia	60 trillion cubic feet



Les éléphants du moyen-orient !

- Kirkouk (Irak), le plus ancien...
- Ghawar (AS), le géant des géants...
- Le Dôme Nord (Qatar), la « bulle » du Golfe

Les géants : Kirkouk !

(1) Kirkouk



Le champ de Kirkouk, découvert en 1927.

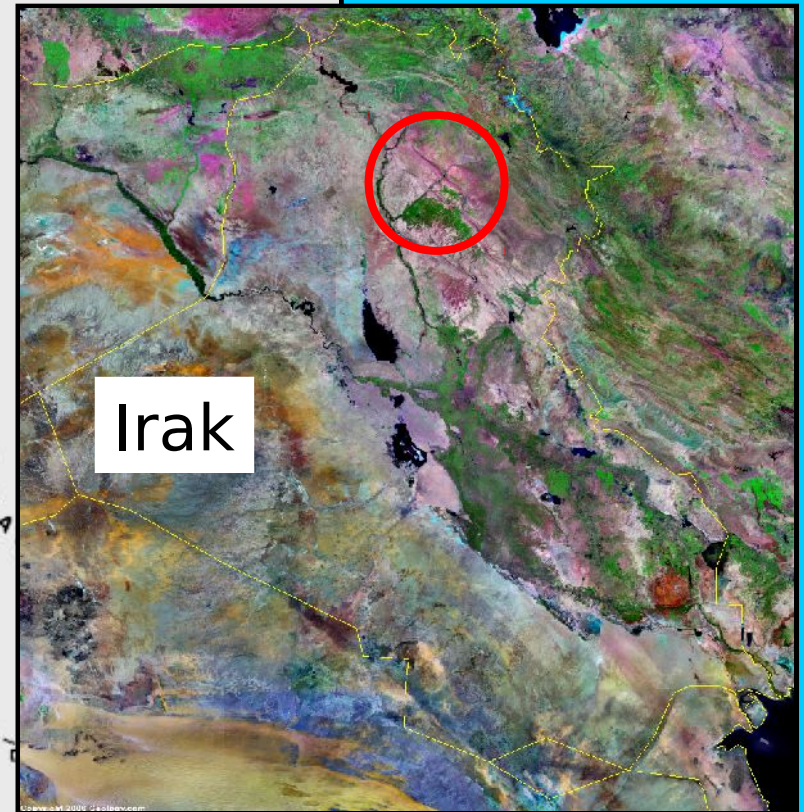
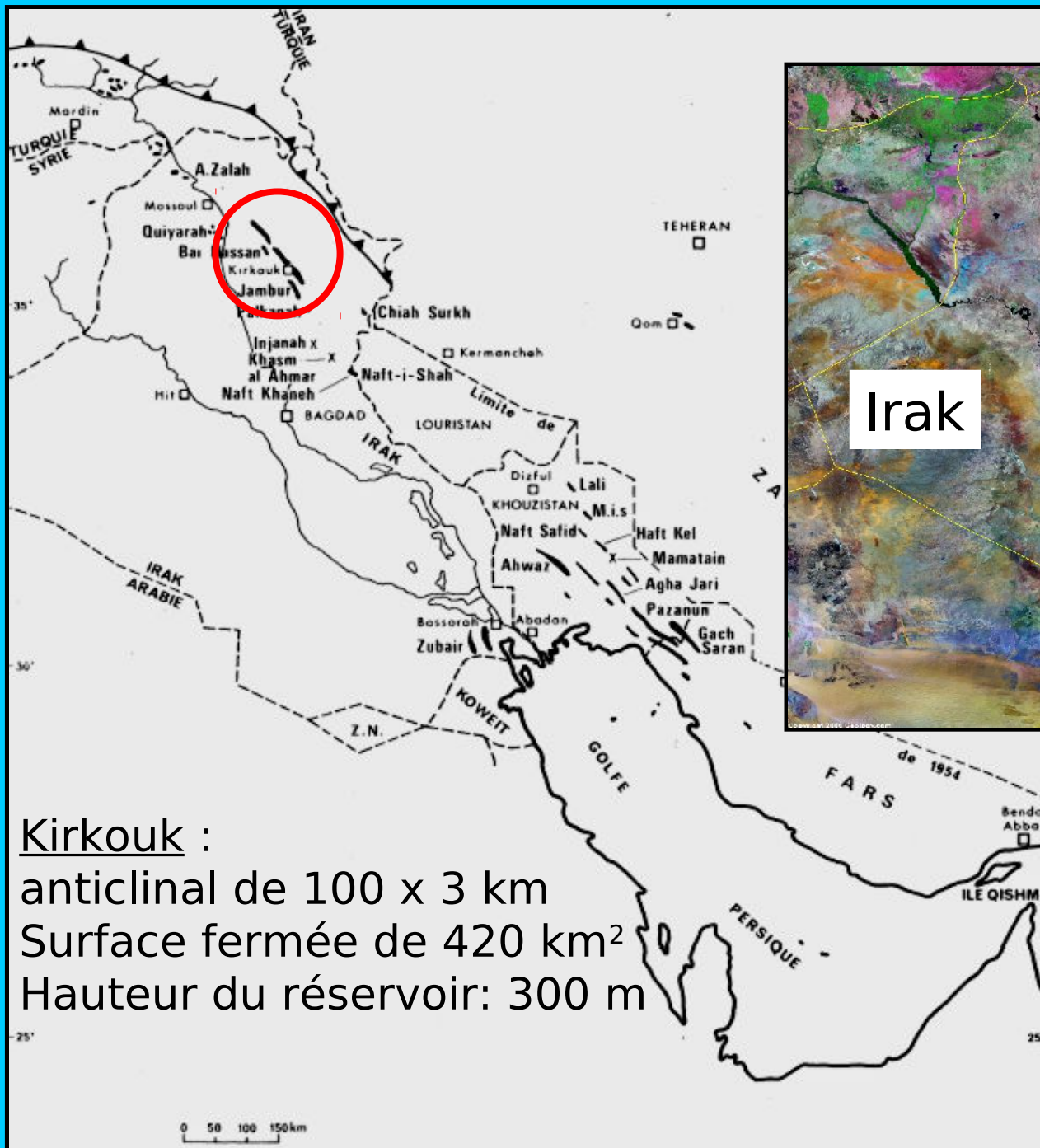
En 1949, avec une production de 80 000 bj^{-1} , il constitue le second plus grand champ producteur du monde.

En 1971, un climax de production de 1 096 000 bj^{-1} (encore second)

Au début des années 2000, il produit encore 900 000 bj^{-1}

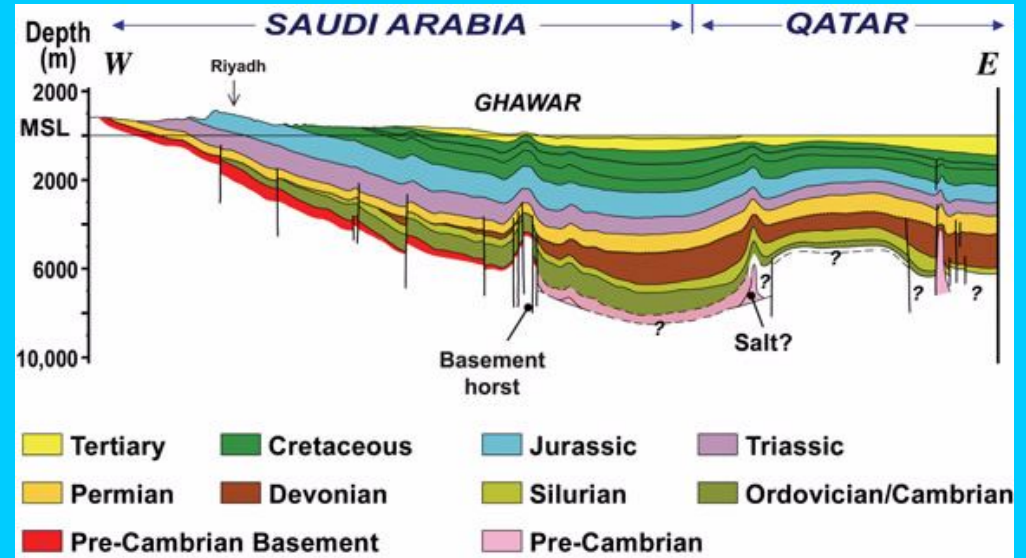
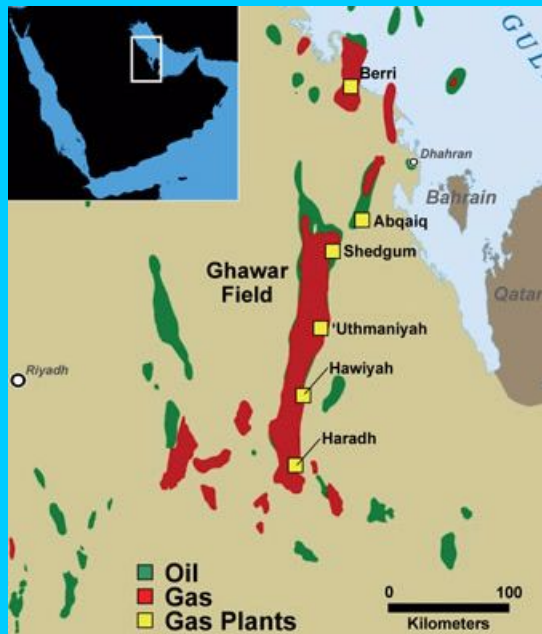
Aujourd'hui, 200 000 barils par jour !
(réserve initiale de 2 Gt d'huile)

The first oil gusher at Baba Gurgur, in Iraq, on 15 October 1927.



Kirkouk :
 anticlinal de 100 x 3 km
 Surface fermée de 420 km²
 Hauteur du réservoir: 300 m

Ghawar



GHAWAR

SAUDI
ARABIA

ARAB D

JURASSIC

HIGH-ENERGY RAMP
SAND

GHAWAR

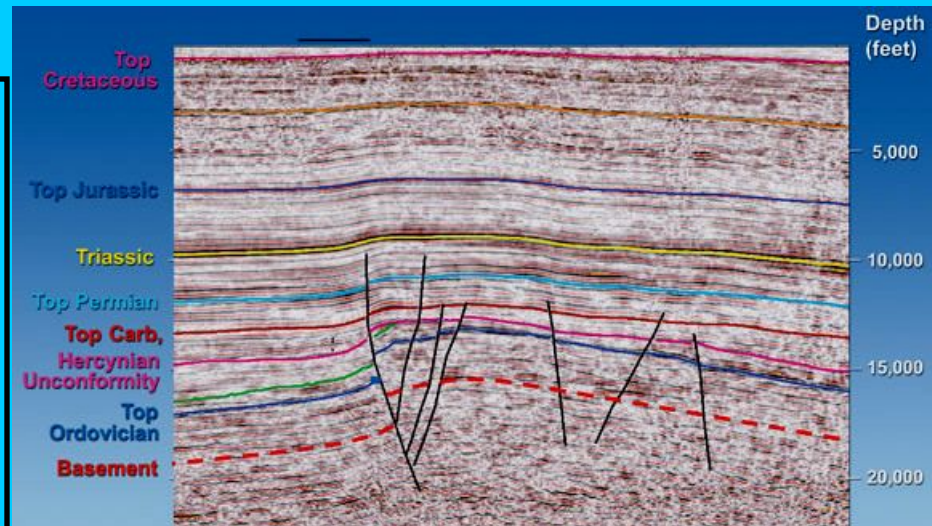
SAUDI
ARABIA

KHUFF-C

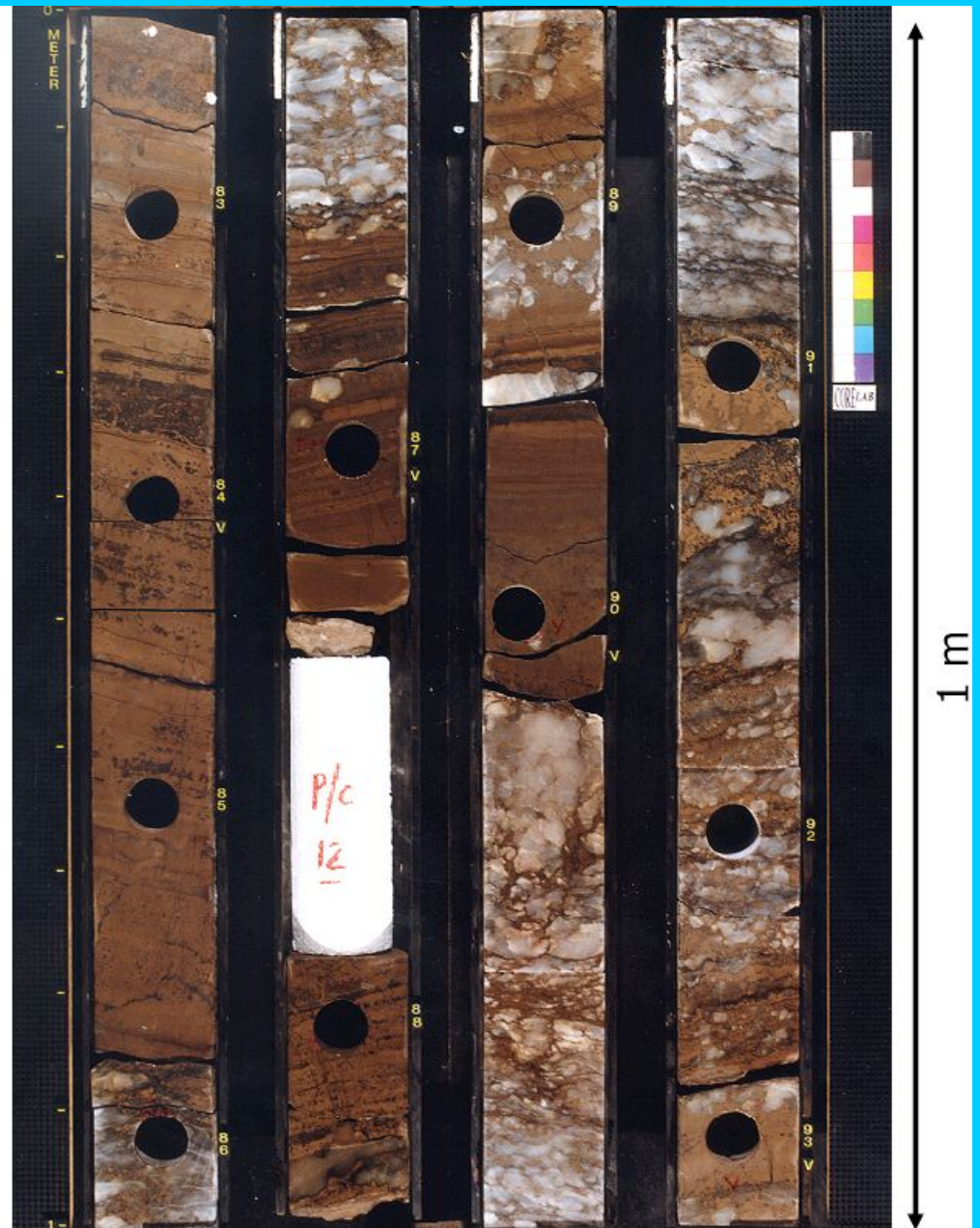
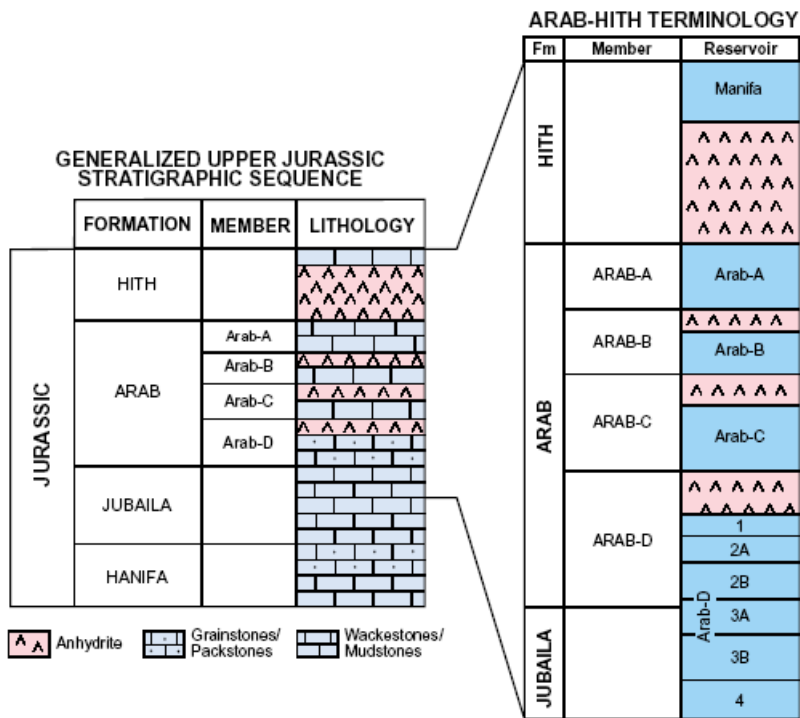
PERMIAN

SABKHA/TIDAL FLAT

Ghawar : 225 x 30 km
Surface fermée de 2 300 km²
Hauteur d'huile de 430 m
Réserves initiales : 11 Gt
500 puits producteurs
Production actuelle : 5 Mb/jour
(6 % production globale)

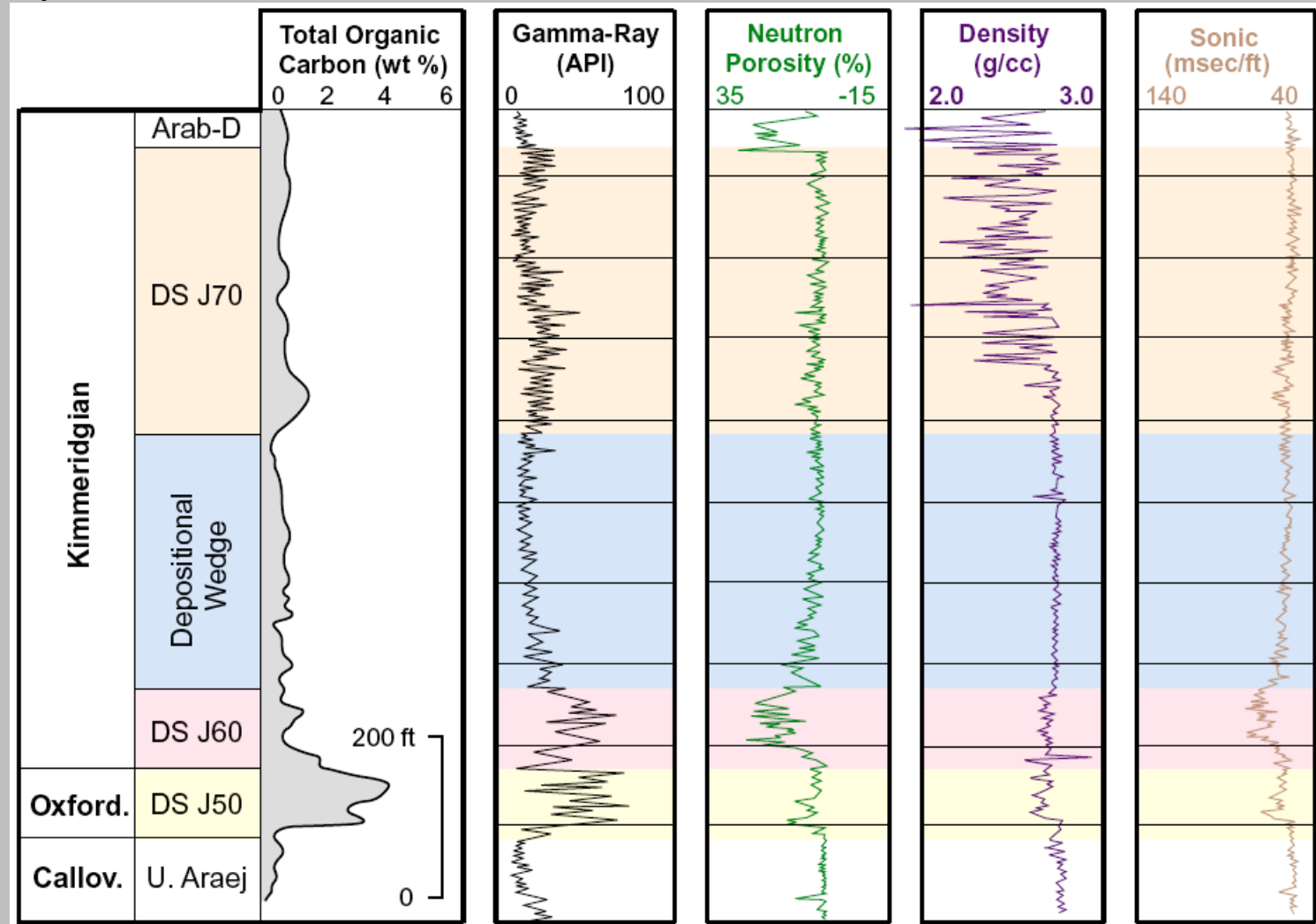


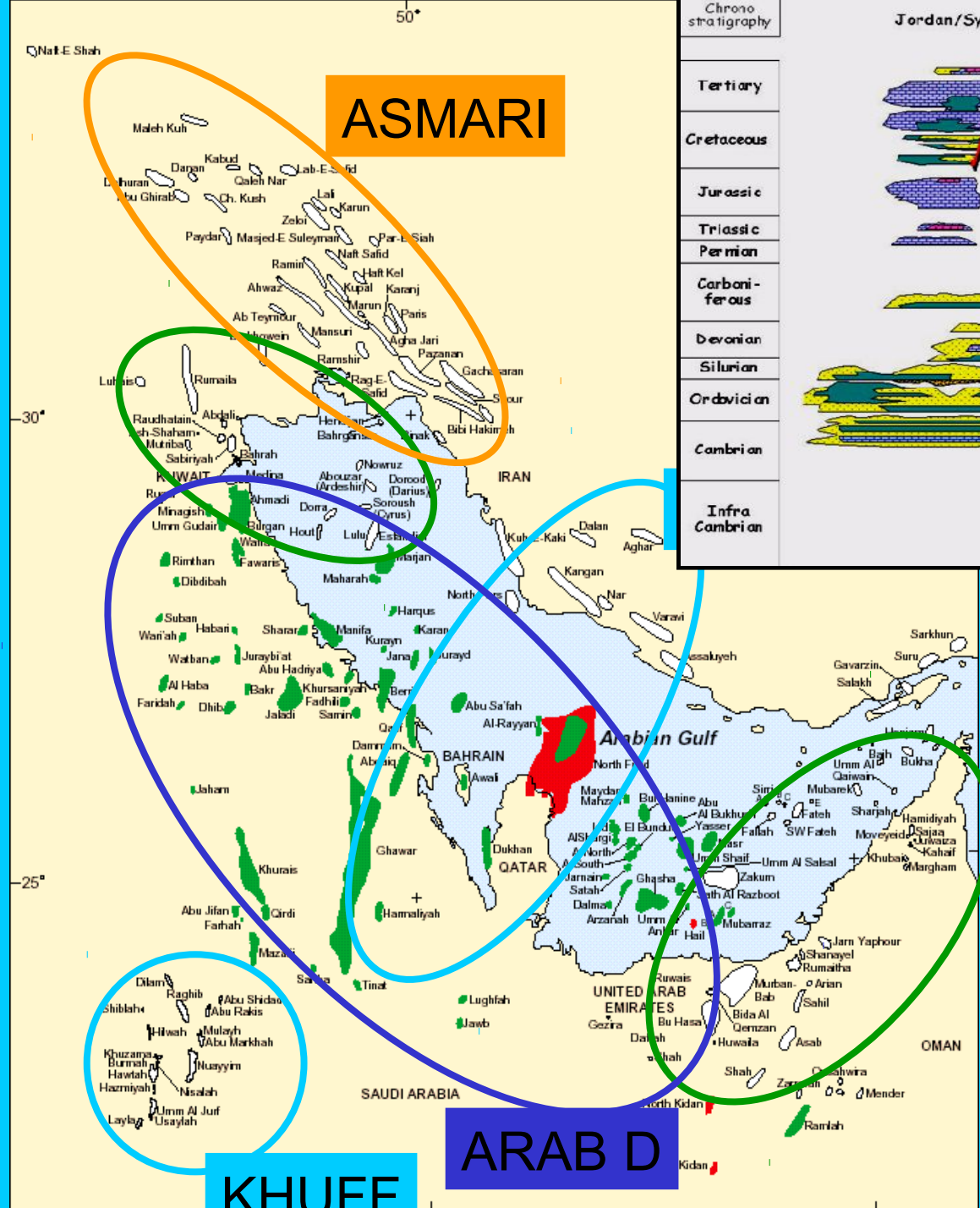
Le réservoir Arab D



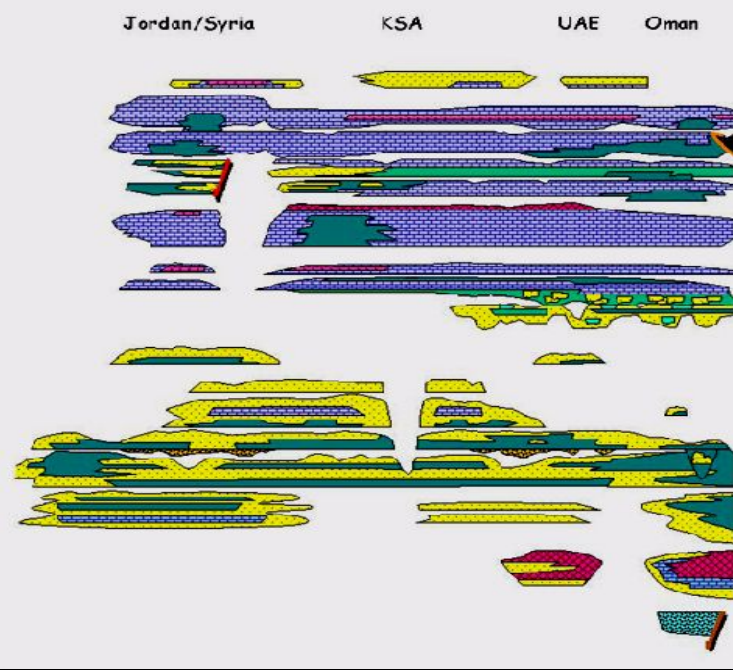
Roche-mère jurassique

Tuwaiq/Hanifa

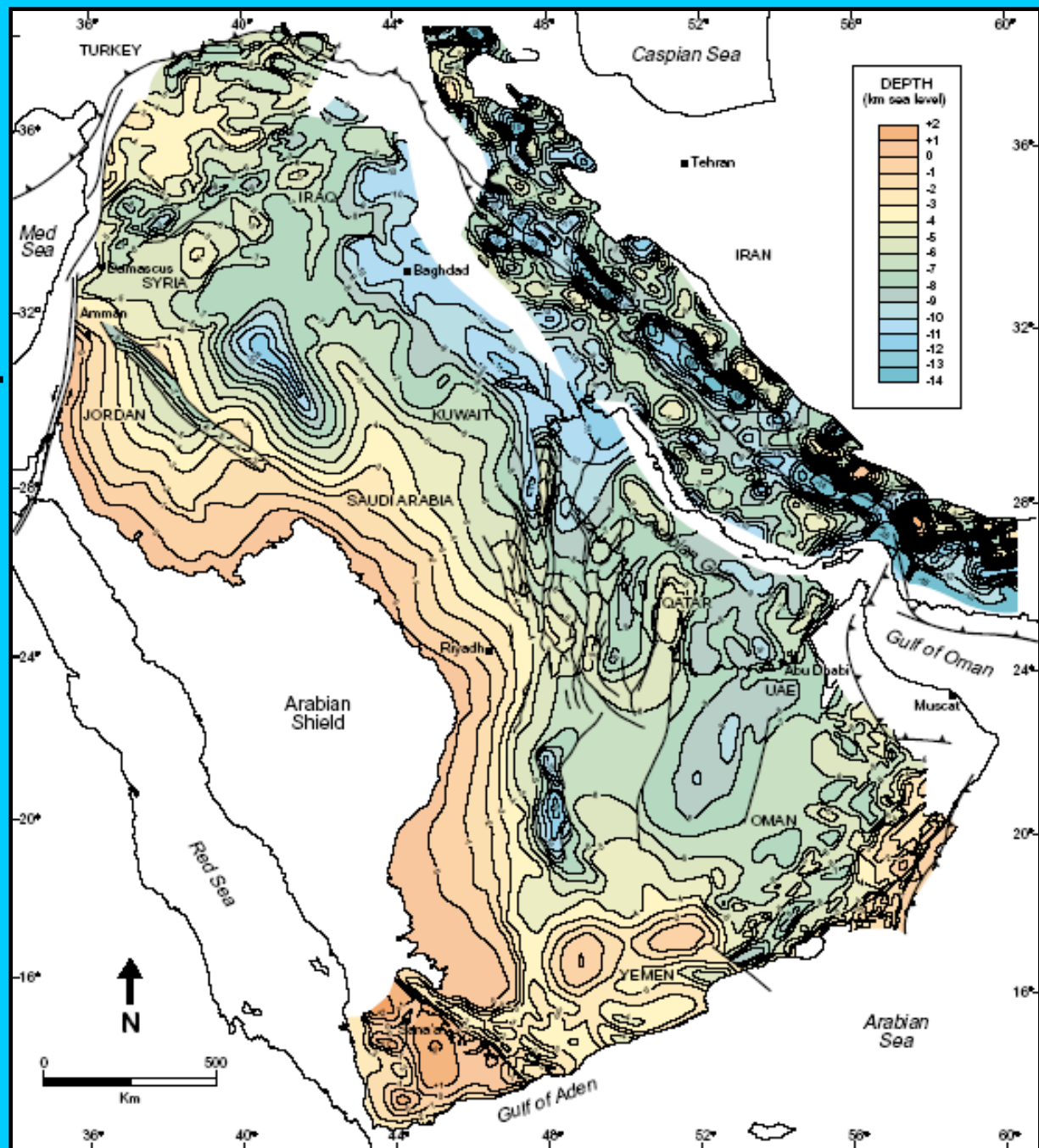




Chrono- stratigraphy
Tertiary
Cretaceous
Jurassic
Triassic
Permian
Carboniferous
Devonian
Silurian
Ordovician
Cambrian
Infra-Cambrian



L'accumulation
de sédiments...



Pourquoi une telle réserve d'huile et de gaz à cet endroit de la planète ?

- grâce à la découverte de gisements énormes et productifs !

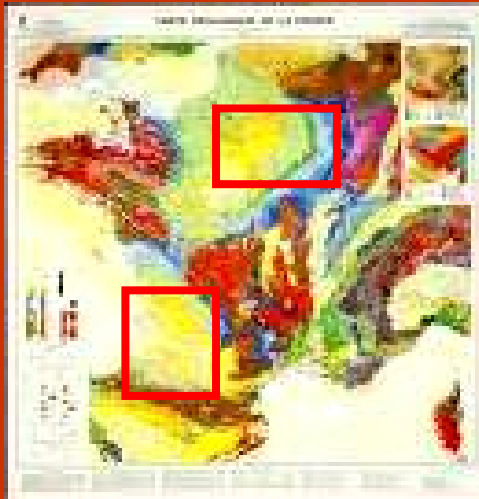
- Les structures (anticlinales) sont simples et de grande taille
- Les systèmes pétroliers sont nombreux et superposés, avec...

- spécifiquement, des couples réservoirs (carbonatés) – couvertures (évaporitiques) très efficaces
- avant-tout, des roches-mères proches des réservoirs, de très grande qualité (potentiel pétrolier élevé, maturité *ad hoc*), et volumineuses

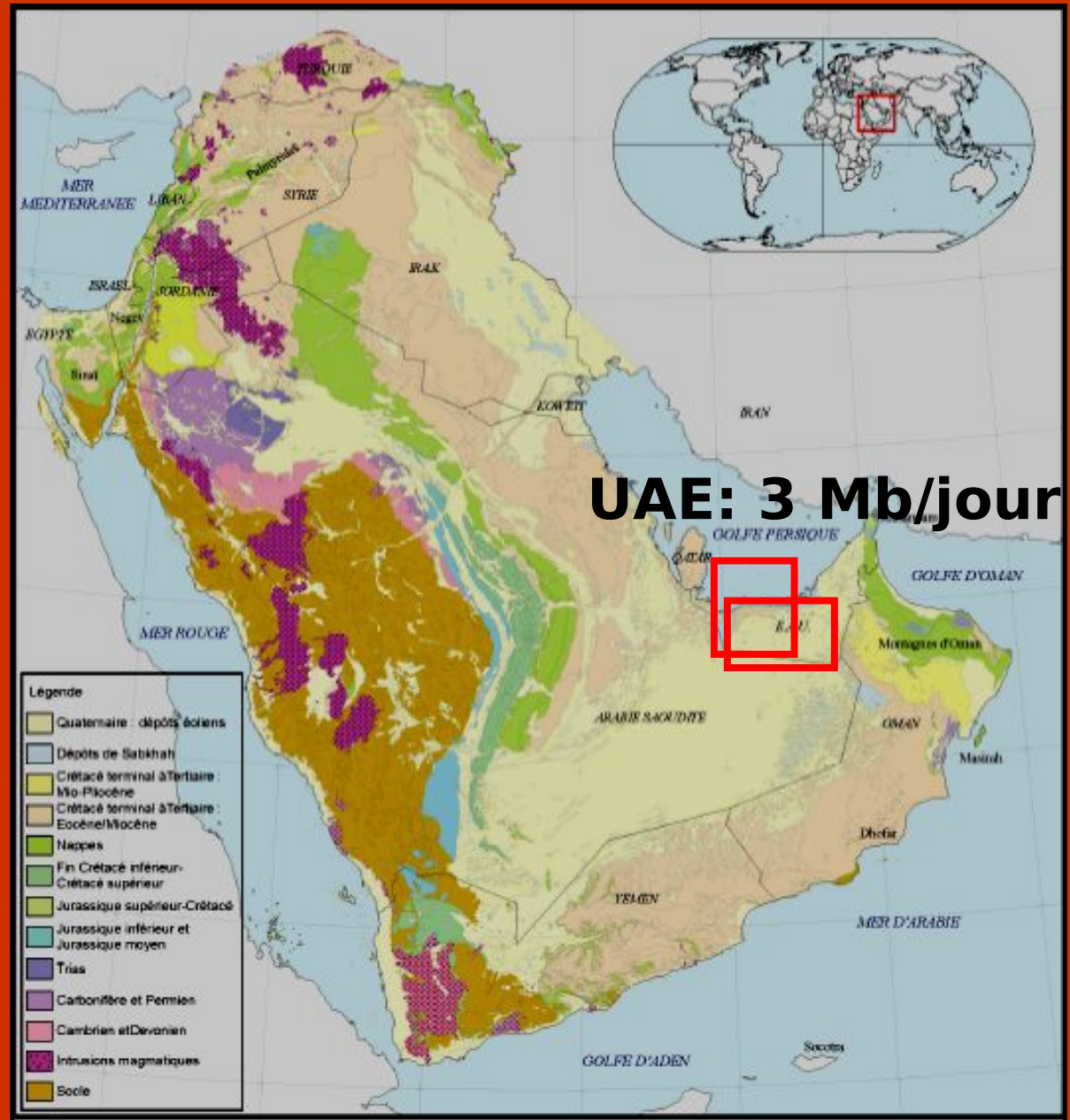
Quid des réserves liquides et gazeuses des bassins français ?

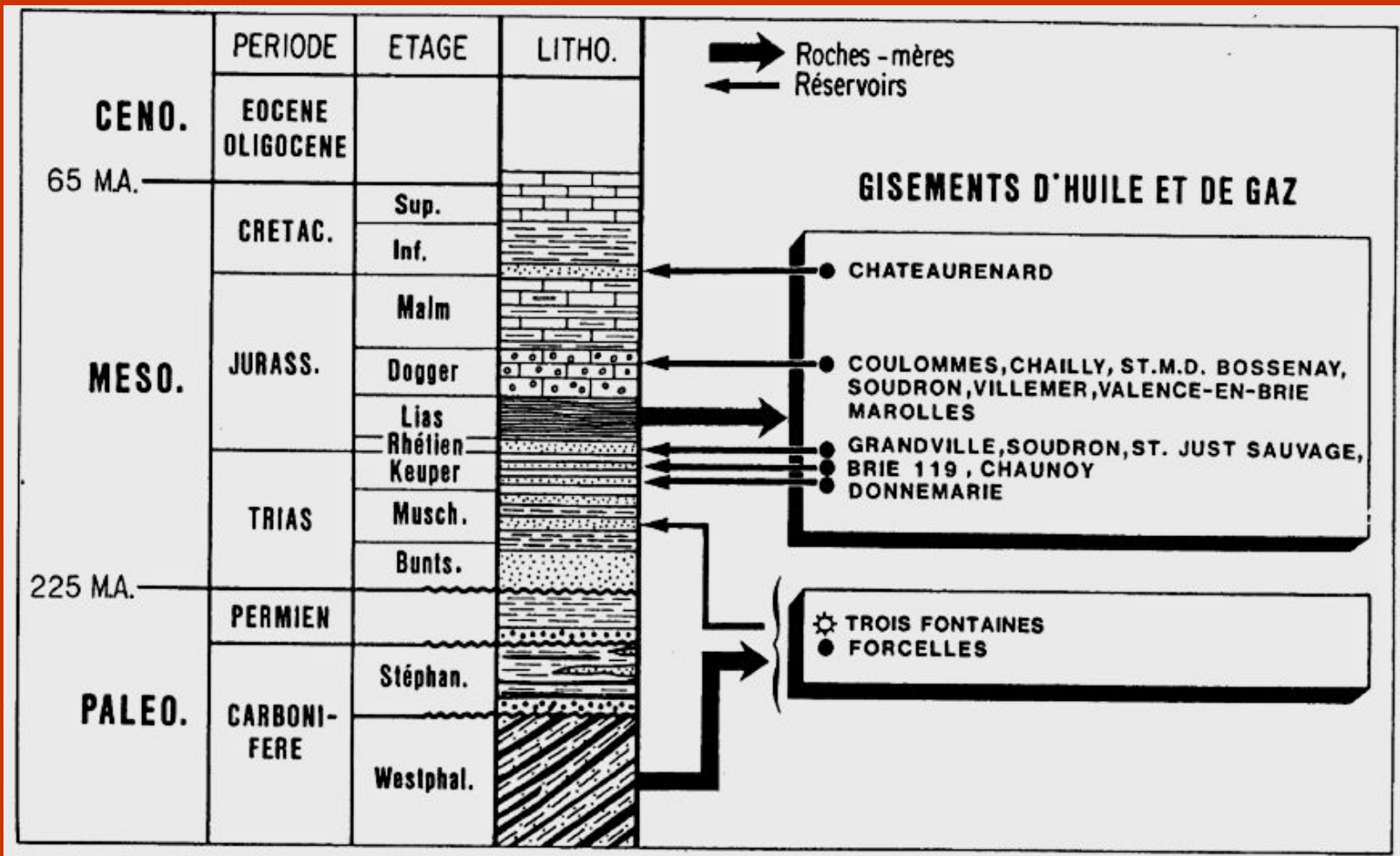


À titre comparatif...

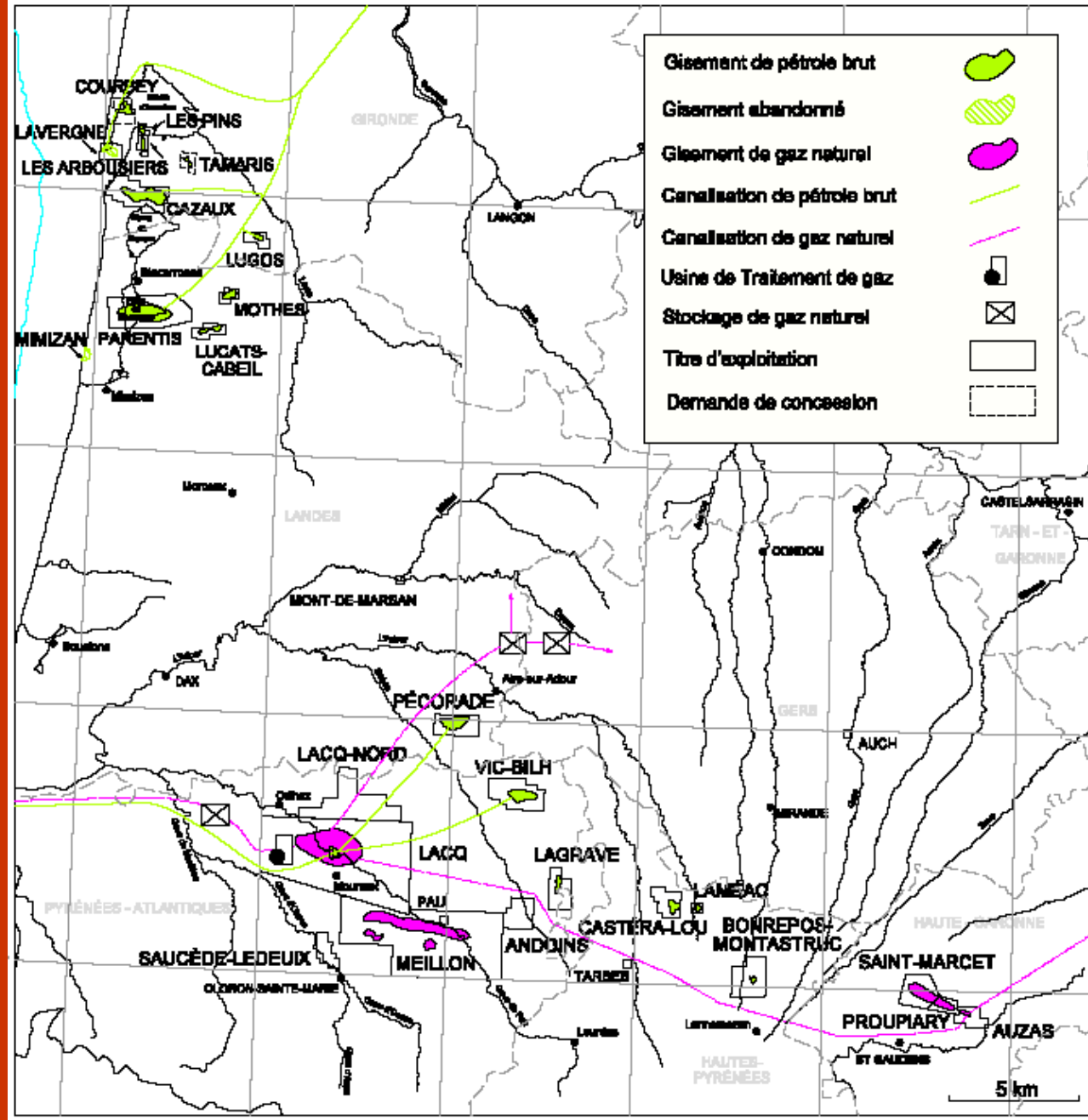


**BP + Aquitaine:
7 Mb/an**

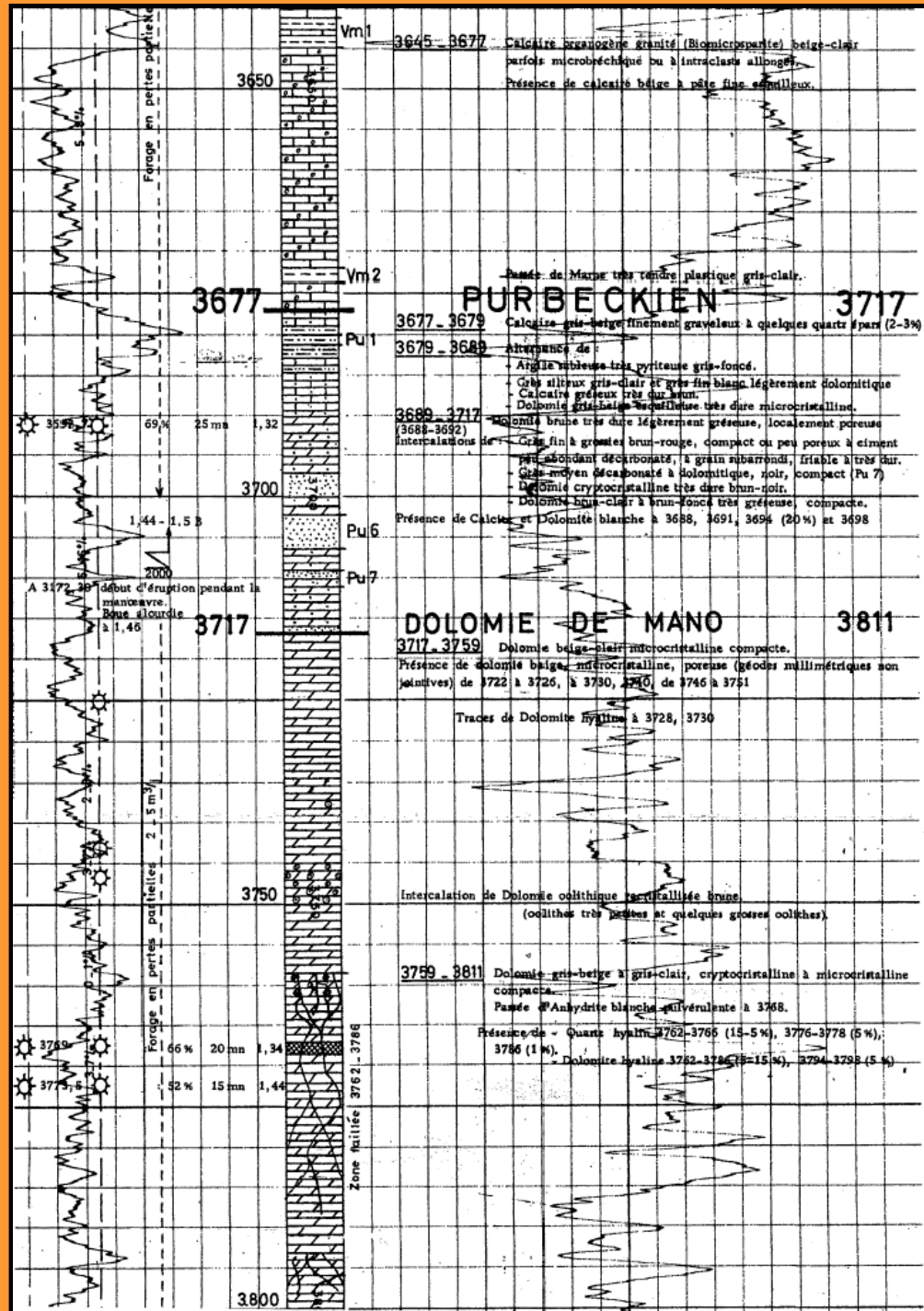




Position stratigraphique des roches-mères et des réservoirs du bassin de Paris



Répartition des gisements du bassin Aquitain



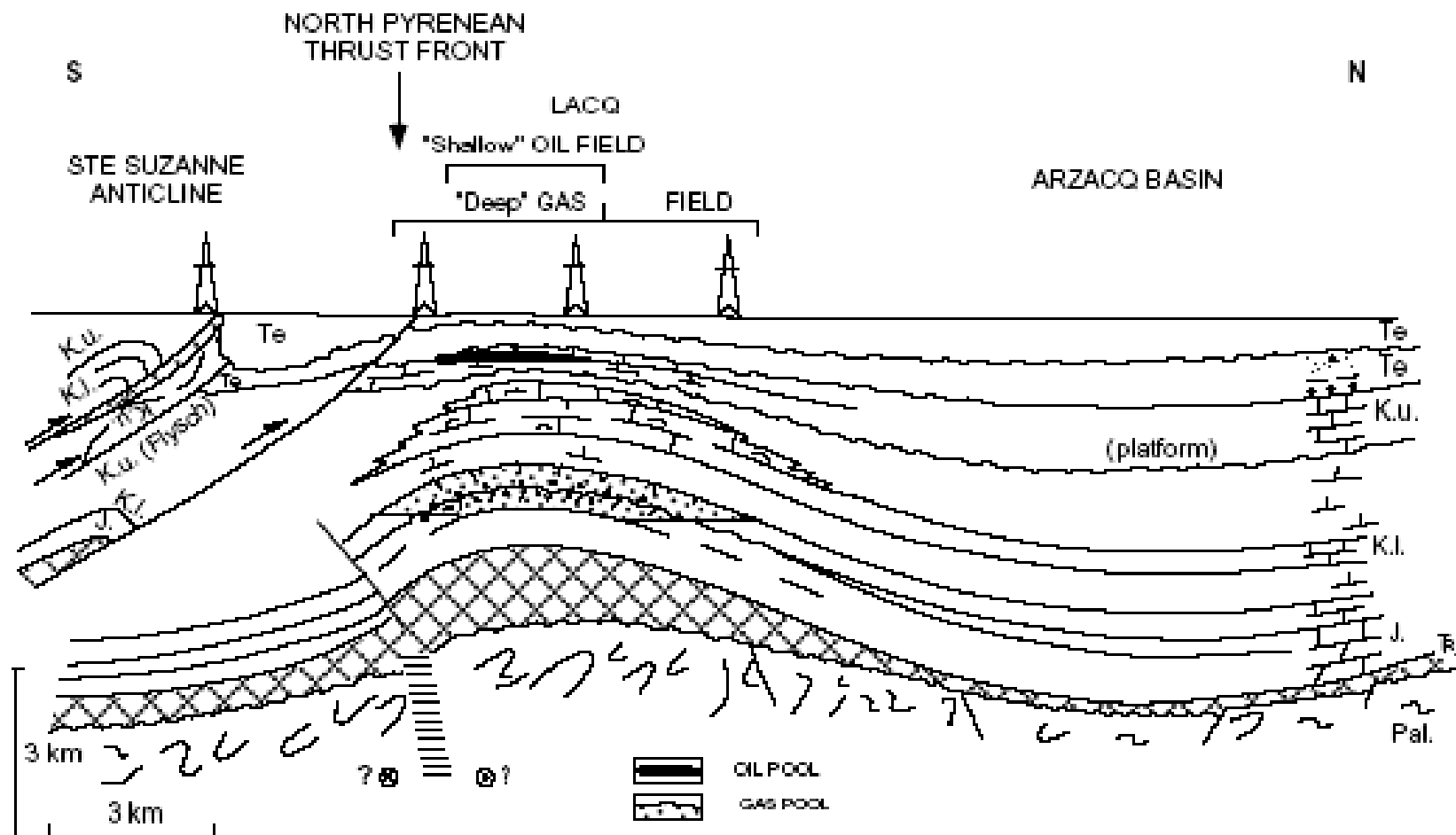
Couverture = Calcaire microsparitique compact imperméable

Lacq 301 - Réservoir « Lacq Profond » = Dolomie de Mano et Purbeckien (niveaux dolomitiques

fracturés = porosité secondaire) ; gaz riche en CO₂ (10%) et H₂S (17%)

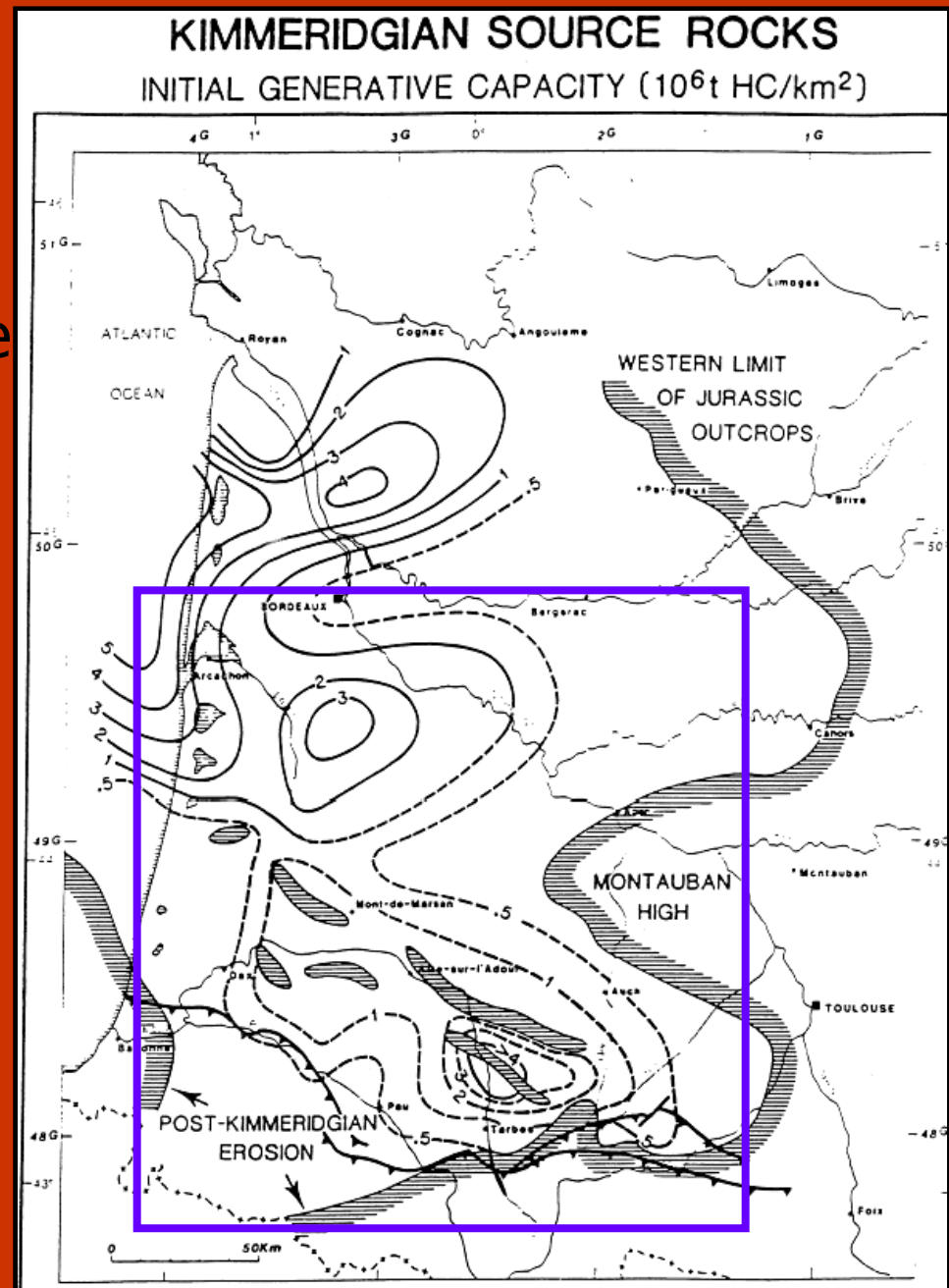
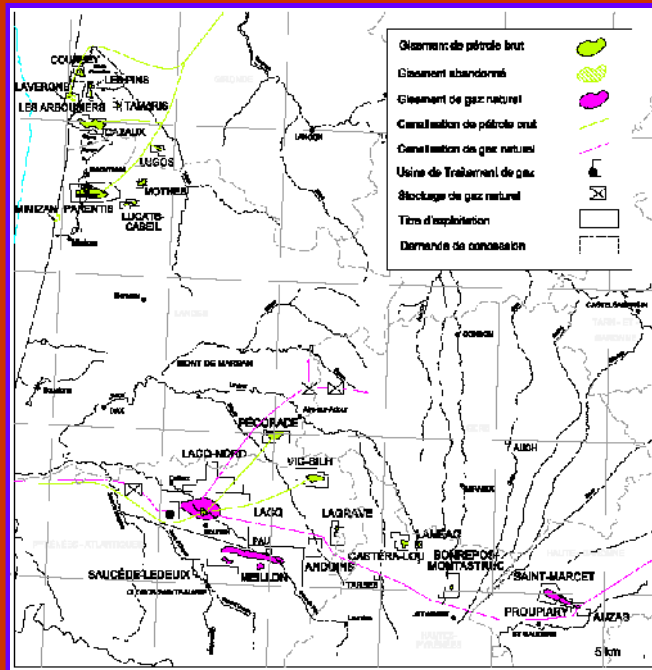
250 Gm³ !

(a)



Bassin d'Aquitaine

Répartition de la roche-mère et des gisements...



Production actuelle France (2008)

- 1 Mt pétrole brut pour 2008 ($7,7 \text{ Mbarils.a}^{-1}$ soit $\sim 20\,000 \text{ barils.j}^{-1}$) (235 ppm ou 20 secondes de production globale journalière !)
- Champs les plus producteurs : Parentis (BA), Itteville & Chaunoy (BP)
- 1% des besoins nationaux
- Gaz produit : $1,6 \text{ Gm}^3.\text{a}^{-1}$; Gaz commercialisé: 1 Gm^3
- 2 % des besoins nationaux
- Champ le plus producteur : Lacq profond
- Gaz de Houille ($20 \text{ Mm}^3.\text{a}^{-1}$)

Les nouveautés de par le monde:

Découvertes & néotechs

Discovery List - Top 10 Discoveries of 2008



#	Region	Country	Basin	Field	HC Type	Prod. Status	Current Operators	Disc
1	Latin America	Brazil	Sao Paulo Plateau Sub-basin (Santos Basin)	Iara	Oil, gas	Appraising	Petroleo Brasileiro SA (Petrobras)	Sept.



Les trois découvertes les plus importantes dans le monde en 2008 (Iara, Jupiter and Guara) sont toutes localisées au large du Brésil dans le bassin de Santos.

Santos abrite le fameux champ de Tupi Field découvert en 2007 par Petrobras (+BG et Portugal Galp Energy). Tupi est estimé abriter 8 milliards de barils récupérables (10 fois moins que Ghawar) et représente la découverte la plus importante depuis les 13 milliards du champ de Kashagan découverts au Kazakhstan en 2000. Kashagan, à son tour, fut la plus grande découverte depuis la baie de Prudhoe en Alaska il y a plus de 30 ans.



Tupi, par exemple, a été foré dans 2 km d'eau, et le champ réside environ à 5 km sous le plancher marin, sous une table de sel massif (un puits coûte environ 250 M\$ à lui seul).

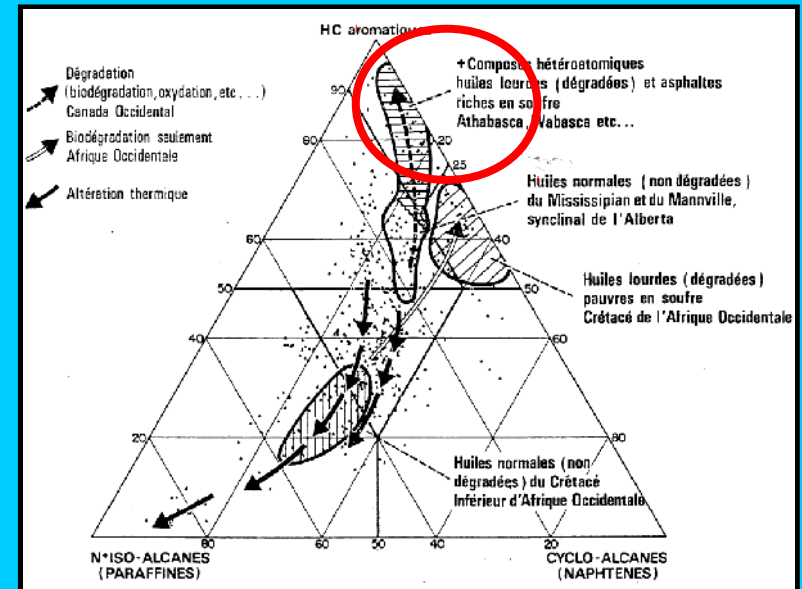
BG a prédit que la production à partir de Tupi, Guara et Iara devrait atteindre 300,000 boe/d d'ici à 2012. Le coût total de développement est estimé à 400 milliards de dollars

Les huiles lourdes (Ouest Canada, Venezuela) : de nouvelles réserves à oublier au plus vite ?

....ne sont pas récupérables à l'état naturel par un simple puits de production mais exigent un chauffage ou une dilution pour s'écouler !



Sables bitumineux de l'Athabasca



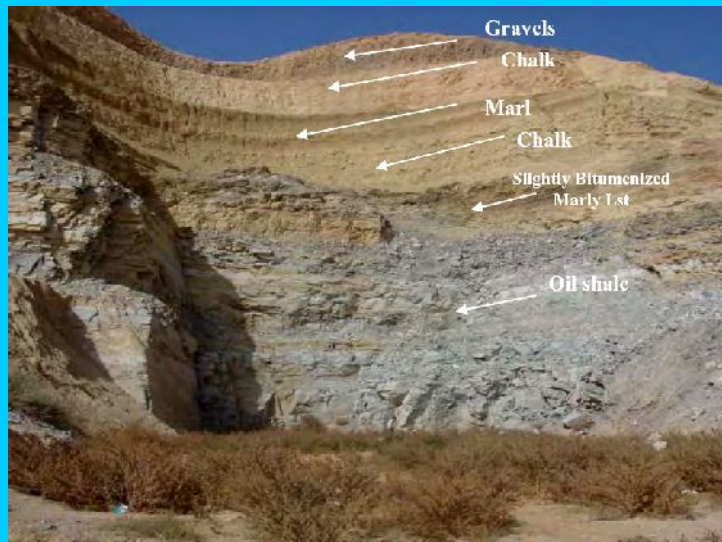
Les huiles lourdes représentent 15 % des réserves de pétrole du monde !

Leur coût de production est très élevé (70-80 \$ le baril)

Leur production engendre d'énormes quantités de GES. Elles sont riches en soufre, métaux lourds qui doivent être éliminés avant leur raffinage

Les schistes bitumineux (oil shales)

Un schistes bitumineux est une roche sédimentaire riche en kérogène qui engendrera des huiles par distillation thermique, portée à une température d'environ 500-600 °C avec un rendement minimum de 5% d'huile.



No	Country	Shale Oil Reserves Million Tons
1	USA	304000
2	Russia	39000
3	Zaire	14310
4	Brazil	12000
5	Morocco	7739
6	Canada	6300
7	Australia	4080
8	Jordan	4000
9	China	2483
10	Estonia	2457
11	Italy	1431
12	France	1000

Les schistes bitumineux représentent une réserve totale
Équivalente à 2.8 trillions barils d'huile
(contre 3 000 milliards de barils d'huile conventionnelle)

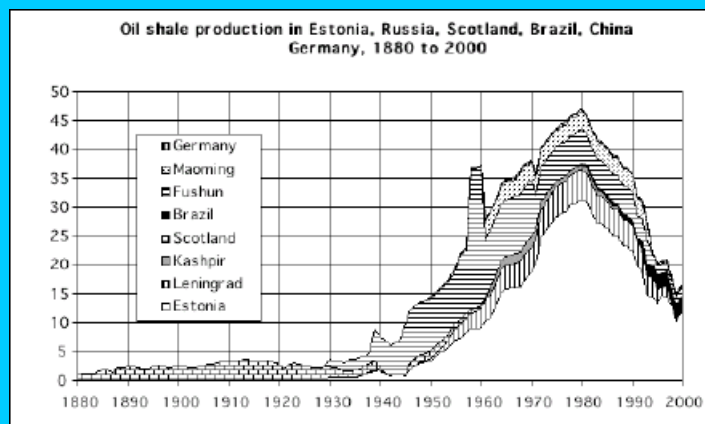
COMMENT ENGENDRER et EXTRAIRE CETTE HUILE ?



Limagne d'Allier, Paléogène
(schistes bitumineux)

Les schistes bitumineux (oil shales)

Un point critique de la viabilité des SB comme source d'énergie réside dans le rapport «Energie récupérée: Energie Investie ». Les données issues des pilotes d'extraction indiquent un rapport entre 3 et 4, ce qui veut dire qu'il faut fournir l'équivalent de 30 litres de pétrole pour en récupérer 100 l. Une autre préoccupation des procédés de distillation des schistes bitumineux concerne les grandes quantités d'eau nécessaires



Déclin de la production d'huile de Schistes (Estonie).



Unité pilote de production d'huile à partir des schistes de la Green River, Colorado, USA

Liquéfaction du charbon:

CTL (Coal To Liquid)

- Pour liquéfier le charbon par exemple, on chauffe à 1000°C et on fait passer de l'eau dessus. On obtient CO+H₂ (procédé naguère utilisé pour la fabrication du gaz dit "de ville"). CO et 2 H₂ se recombinent en CH₃OH méthanol, carburant ayant la moitié du pouvoir calorifique de l'essence
- Le procédé Fischer-Tropsch est une réaction chimique de catalyse du monoxyde de carbone et d'hydrogène en vue de les convertir en hydrocarbure. Les catalyseurs les plus courants sont le fer ou le cobalt. L'intérêt de la conversion étant de produire du carburant liquide synthétique, le Syncrude !

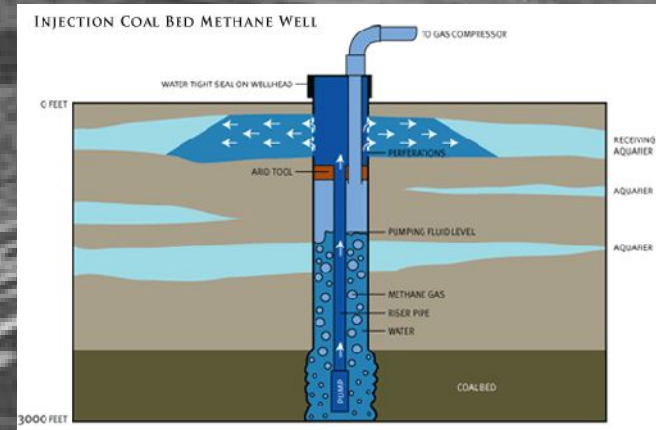
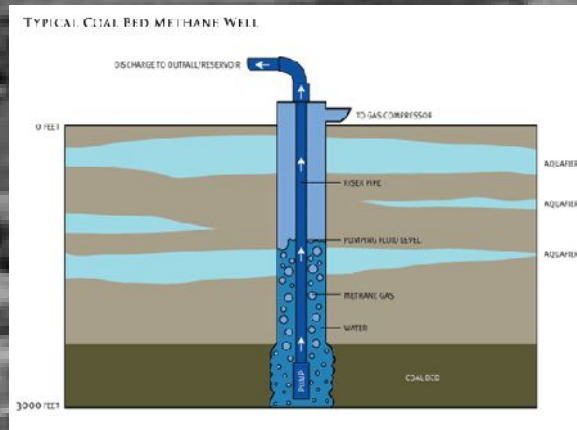


Ce procédé permet la production d'un baril équivalent pétrole aux alentours de 60 € ! et engendre l'émission de GES (chauffe) !

Le gaz de Houille

(*Grisou* ou *Coal Bed Methane*)

Le charbon est la plus abondante ressource énergétique carbonée dans le monde et peut être une source majeure de gaz (méthane) (USA -10%, Ca, Aus)



Le gaz de houille peut être récupéré économiquement mais le traitement des eaux d'extraction est une préoccupation majeure : Dans le Powder River Basin (WY, USA), chacun des 20000 puits en opération produit 24000 m³ d'eau salées et riches en métaux lourds par an

**Une ressource énergétique conséquente et inexploitée
mais une préoccupation environnementale sérieuse**

De la houille, de l'huile et du
gaz sous nos pieds ?

Les ressources des bassins régionaux

Houille du bassin de Saint-Etienne



Le puits **Couriot** à Saint-Etienne édifié à partir de 1912, est le plus grand puits du bassin dans les années trente. Fermeture en 1973.

Le bassin de Saint-Étienne a été historiquement le premier pôle industriel français. Le plus ancien bassin houiller français, longtemps le plus important du Centre et du Midi (22 000 hectares, 50 kilomètres de long, 12 kilomètres de large) aura fourni près d'un demi-milliard de tonnes de charbon.

En 1969, il ne restait que le puits Pigeot à la Ricamarie.

Après l'arrêt définitif de l'exploitation fond en 1983, une dizaine de découvertes a continué à être exploitée de 1970 à 1992, date à laquelle toute activité charbonnière a cessé dans le bassin de la Loire qui est devenu, très tôt, un bassin « pilote » en matière de reconversion du personnel, d'industrialisation et de réhabilitation de sites.

Les ressources des bassins régionaux

Houille du bassin de La Mure



Les Mines de La Mure (Isère)

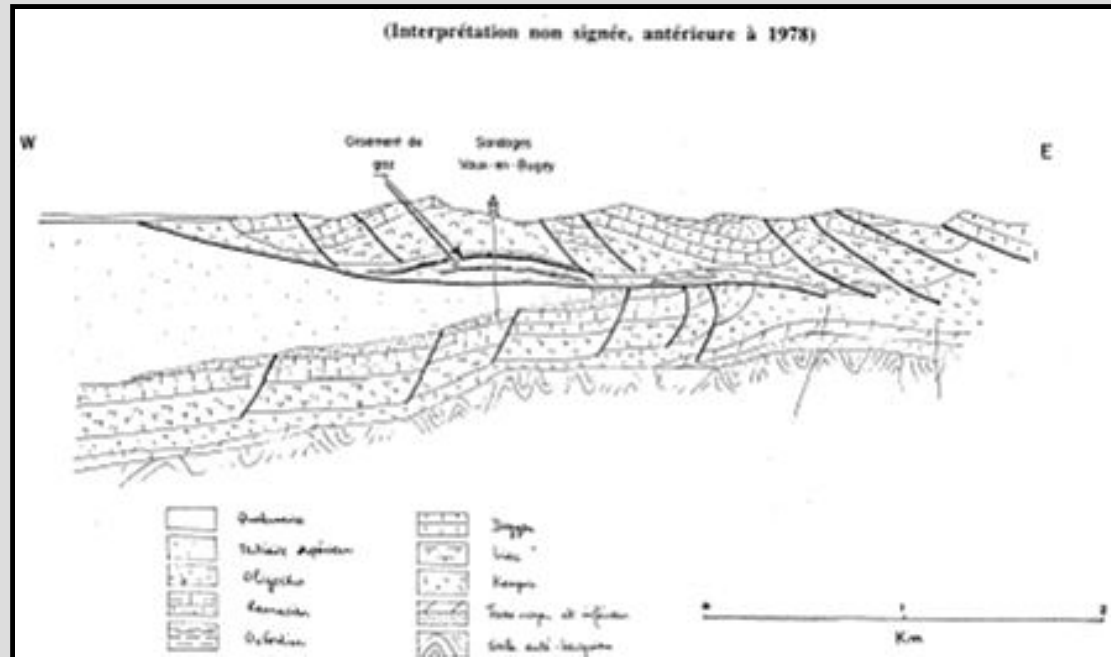
La période de 1830 à 1856 est l'une des plus prospères des Mines de La Mure.

Au moment de la nationalisation de 1946, seules les plus rentables sont regroupées au sein des Houillères de Bassin du Dauphiné. La production progresse alors de 385 000 tonnes en 1948 pour atteindre un record de 791 000 tonnes en 1966.

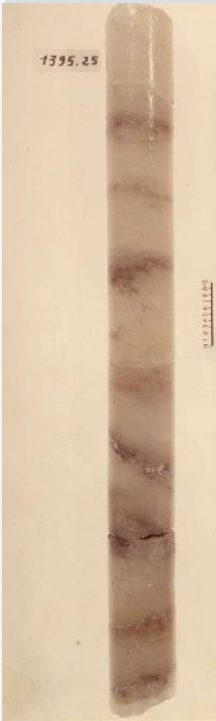
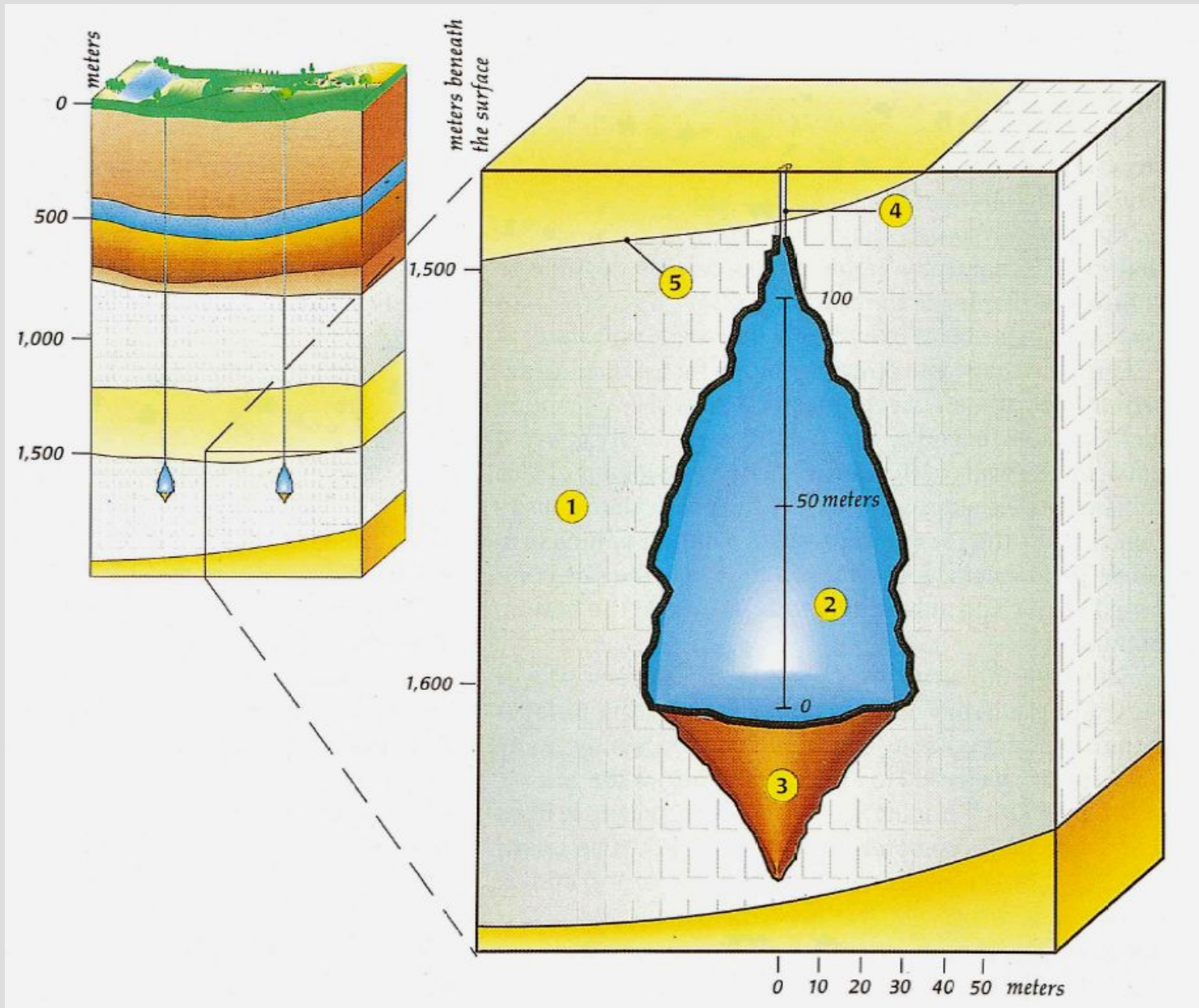
Réputée pour son gisement d'anthracite, les HBCM exploitent « cette mine au cœur des Alpes ». Les puits du Villaret et des Rioux, ne sont utilisés que pour le personnel et l'évacuation des stériles. Un plan incliné, le « Plan Ricard », sert à évacuer le charbon vers un lavoir.

La centrale thermique du Villaret arrêtée en 1981 brûlait une part de la production. L'exploitation charbonnière s'arrête définitivement en 1997.

Les ressources des bassins régionaux Gaz de Vaux-en-Bugey



Stockage de gaz naturel: site d'Etrez (Ain)



Quelques chiffres

- Il faut 10 m³ d'eau douce pour « creuser » 1 m³ de cavité
- À Etrez, le volume de la plus grande cavité est de 312.000 m³
- Cela peut prendre 5 années pour accomplir les 7-8 étapes de dissolution nécessaire à la création d'une cavité de 300.000 m³
- 17 % d'impuretés à Etrez ;
- Pression d'injection: 250 bars ;
- Evacuation de la saumure (Solvay à Tavaux) ; 500 000 t de sel produites par an (soude – carbonate de sodium)
- Le stockage souterrain d'Etrez comportait 18 cavités pour un stock total d'environ 1 milliard de m³ et un stock utile de 650 millions de m³ (soit l'équivalent de la consommation annuelle de toute l'agglomération lyonnaise)
- Autres cavités salines : Tersanne (Drôme ; GdF)