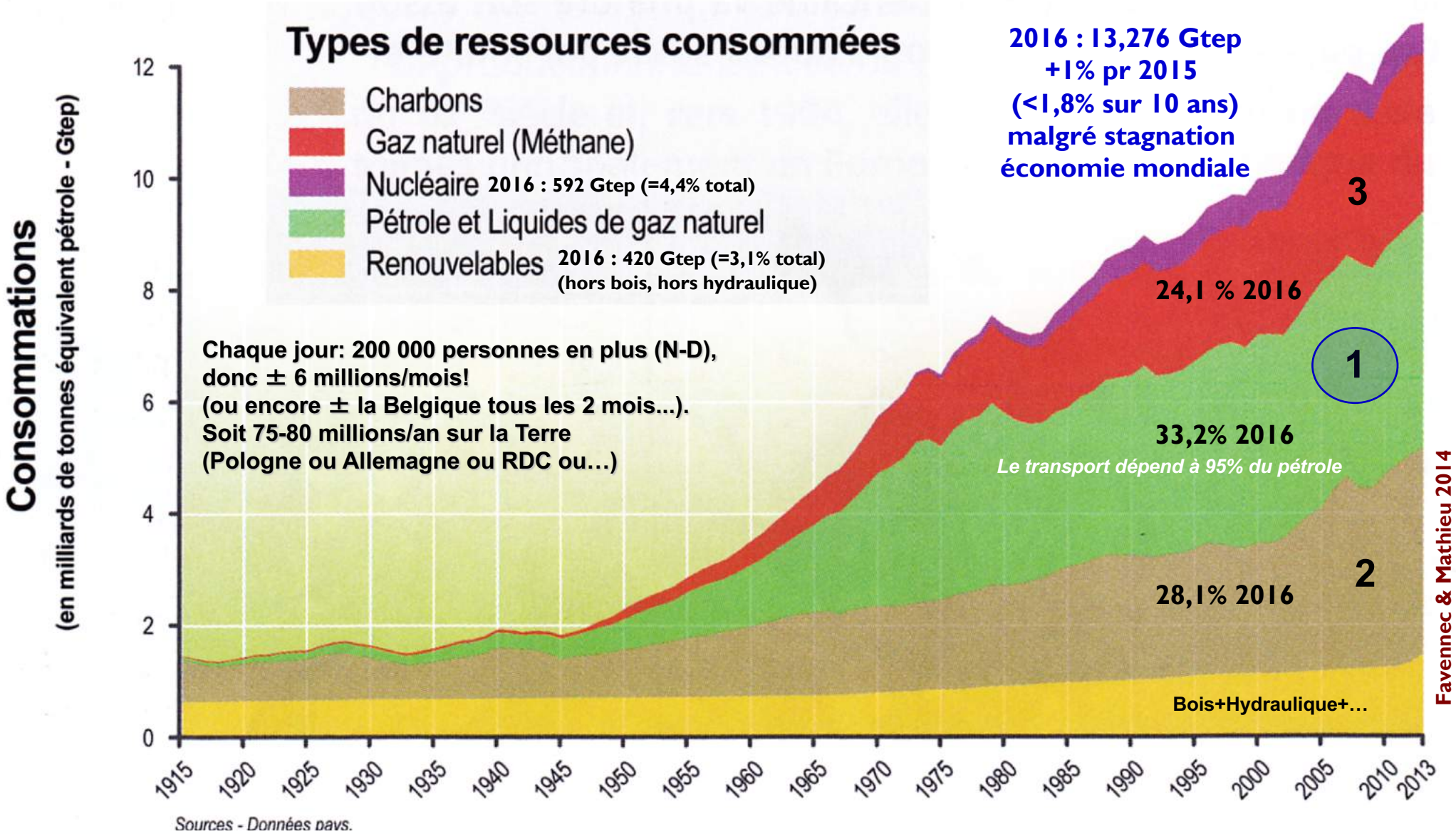
Cepulb- séance du 30 janvier 2018

Les Hydrocarbures : état de la situation
Pic pétrolier, pic gazier, sans cesse reportés

Prof. Dr. Alain Préat
Université Libre de Bruxelles
apreat@ulb.ac.be

2016: 13,276 Gtep, soit ±12000 réacteurs nucléaires (auj ± 450 + ?100)



Evolution des consommations énergétiques mondiales depuis 1915

nb 1tep = 42GJ = 10 Gcal = 11700kWh = 7,33 boe

CASSE-TÊTE

Demande E mondiale en croissance ‘constante’ => 22Gtep? E 2050

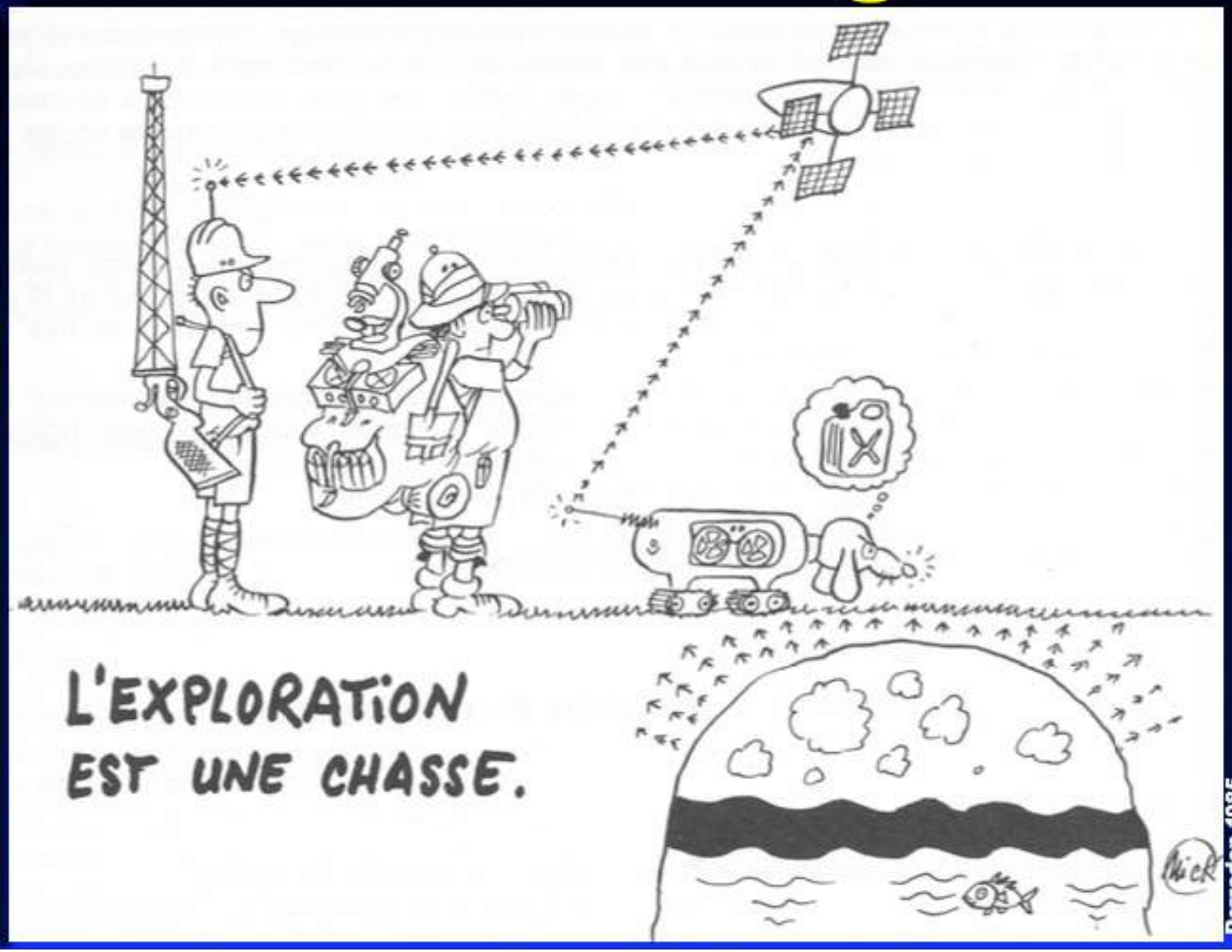
Population 1% - Energie 2% - Electricité 3%

2010: 1,5 G hab n’ont pas accès, en 2030 = 1,3 G hab

règle 1-2-3

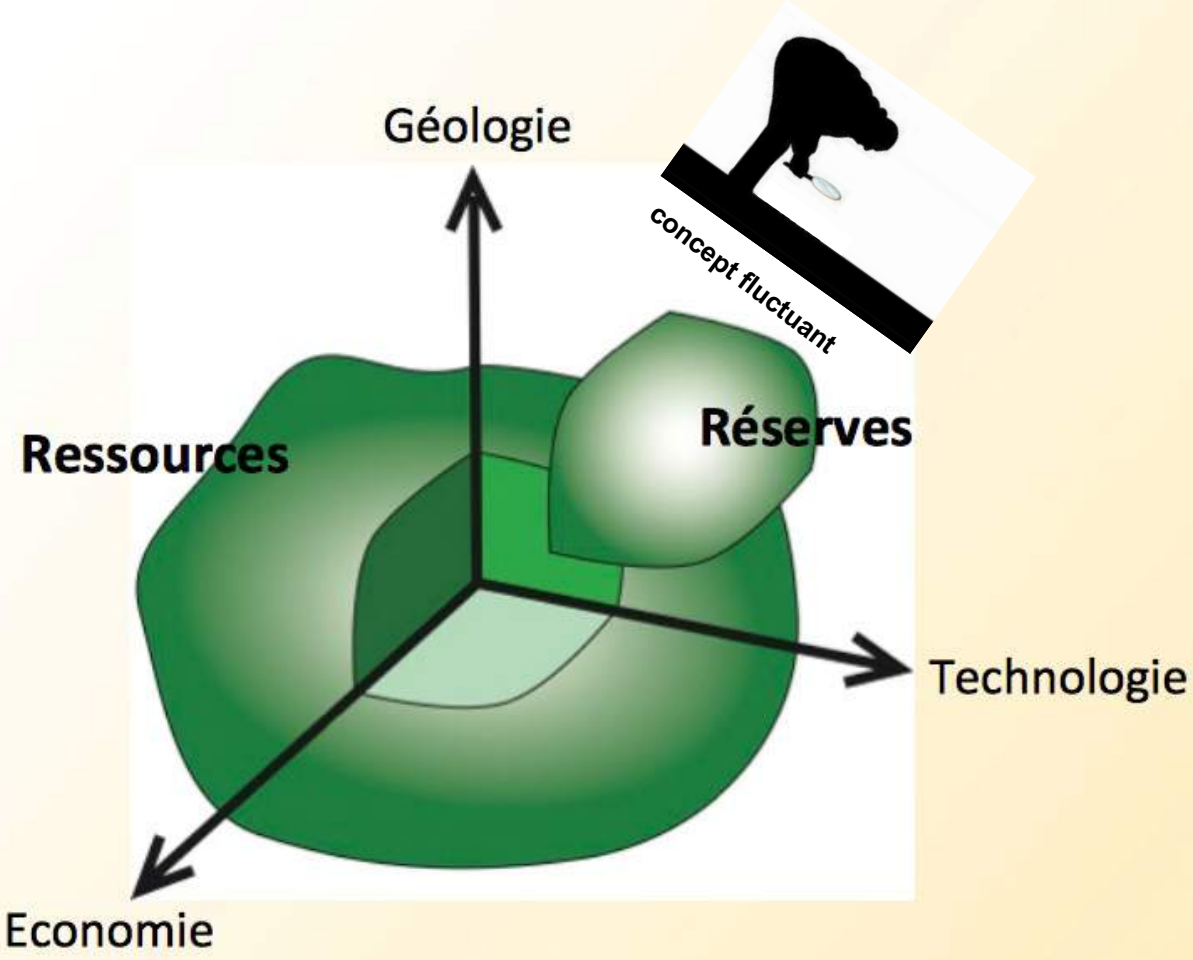
ENERGETIQUE

LA RECHERCHE DE L'ENERGIE



Réserves = Incertitudes Géologiques, Technologiques et Géopolitiques

Ressources ou Réserves ?



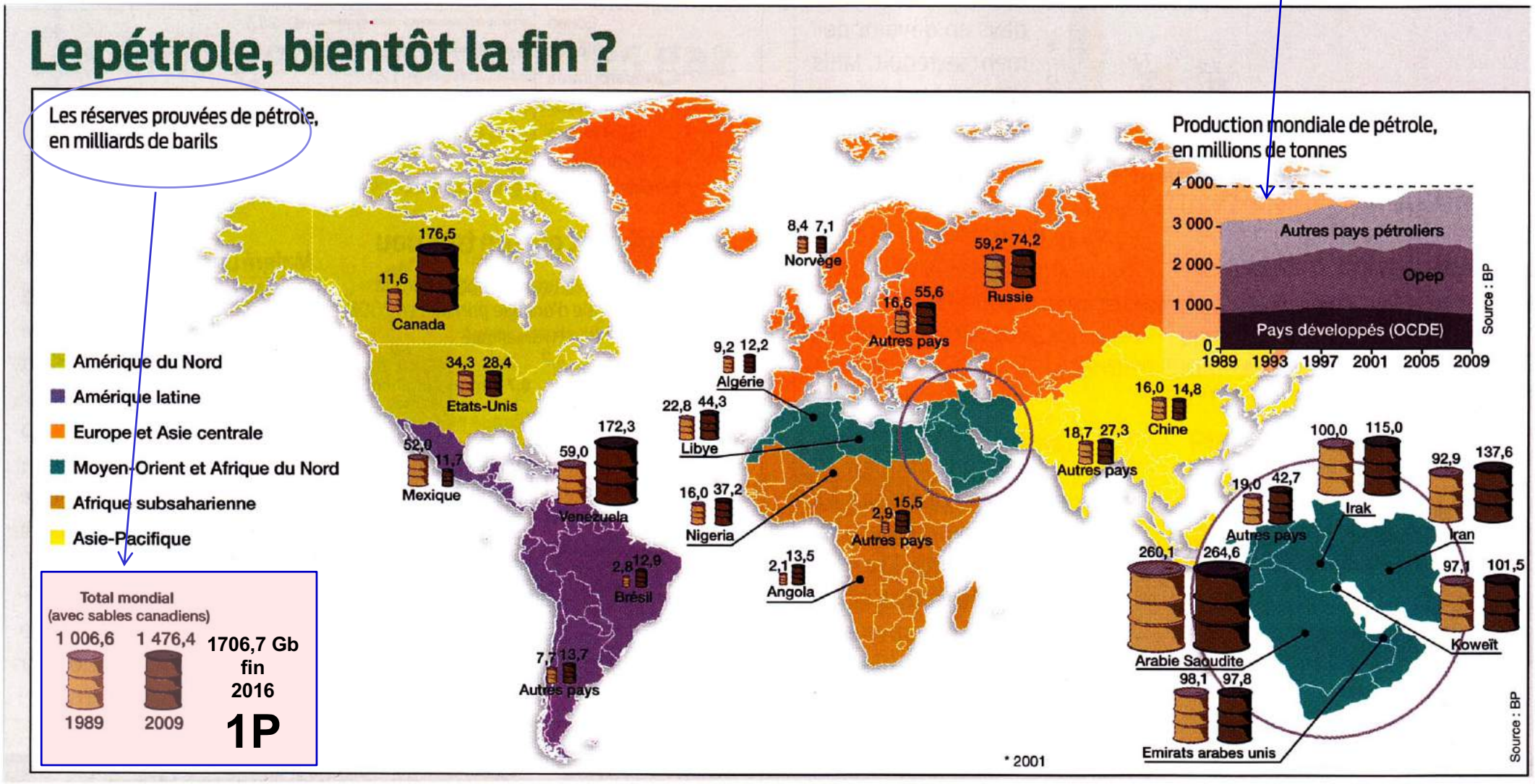
Les **Réserves** correspondent à la part des **Ressources** en place qui peut être exploitée. Cette proportion dépend des connaissances géologiques, des progrès des techniques d'exploitation et du prix de vente de la matière exploitée.

http://www.cnrs.fr/mi/IMG/pdf/shalegas-pariscnrs.pdf

Courantes-conventionnelles-contingentes 1C-2C-3C-à découvrir

1P-2P-3P c-sc-nc

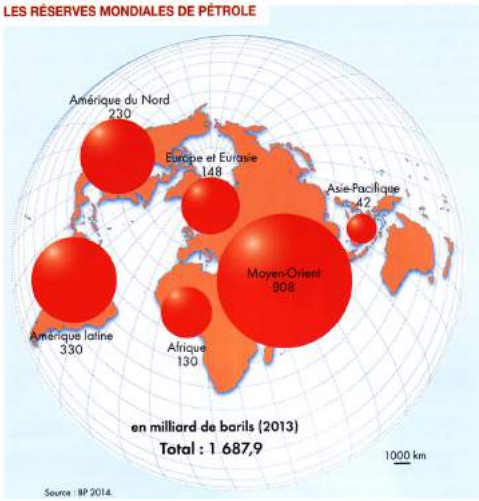
≠ réserves



« On n'a pas quité l'âge de la pierre faute de pierres »

Sheikh Yamani, ancien ministre saoudien du pétrole (co-fondateur OPEP)

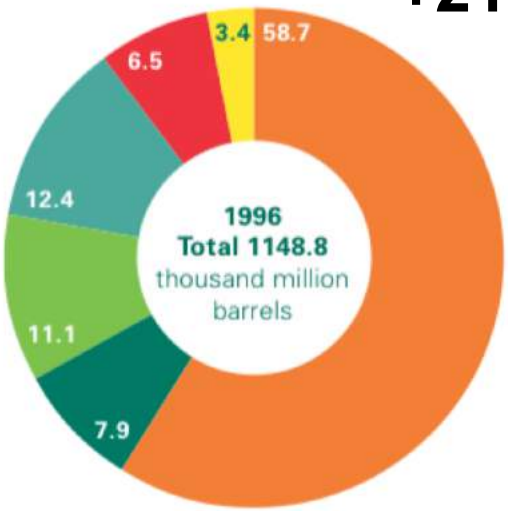
1P OIL (= 51 ans$_{min}$)



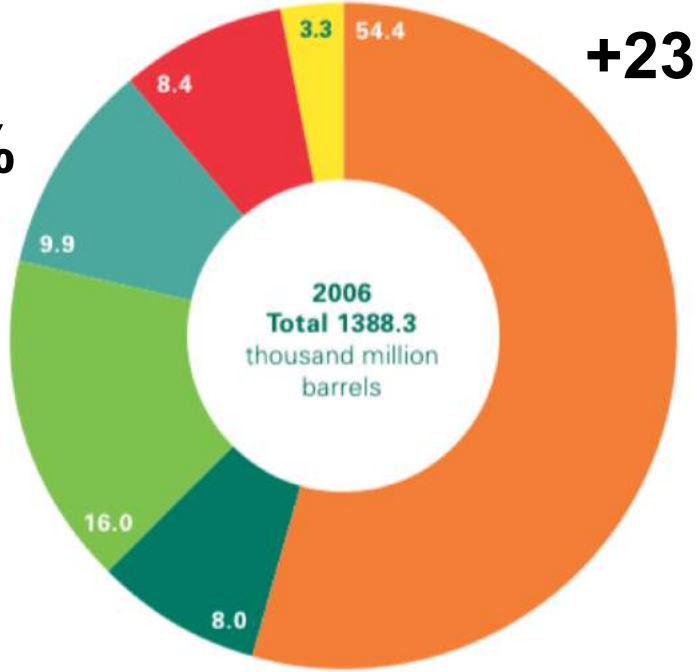
Distribution of proved reserves in 1996, 2006 and 2016

Percentage

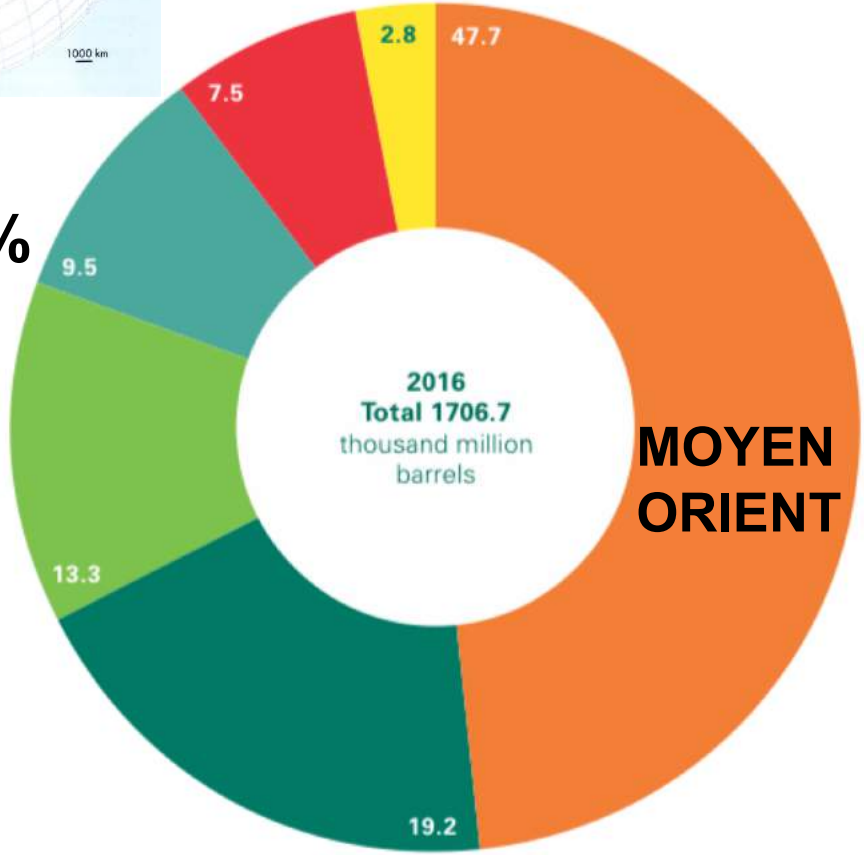
- Middle East
- S. & Cent. America
- North America
- Europe & Eurasia
- Africa
- Asia Pacific



+21%



+23%



MOYEN ORIENT

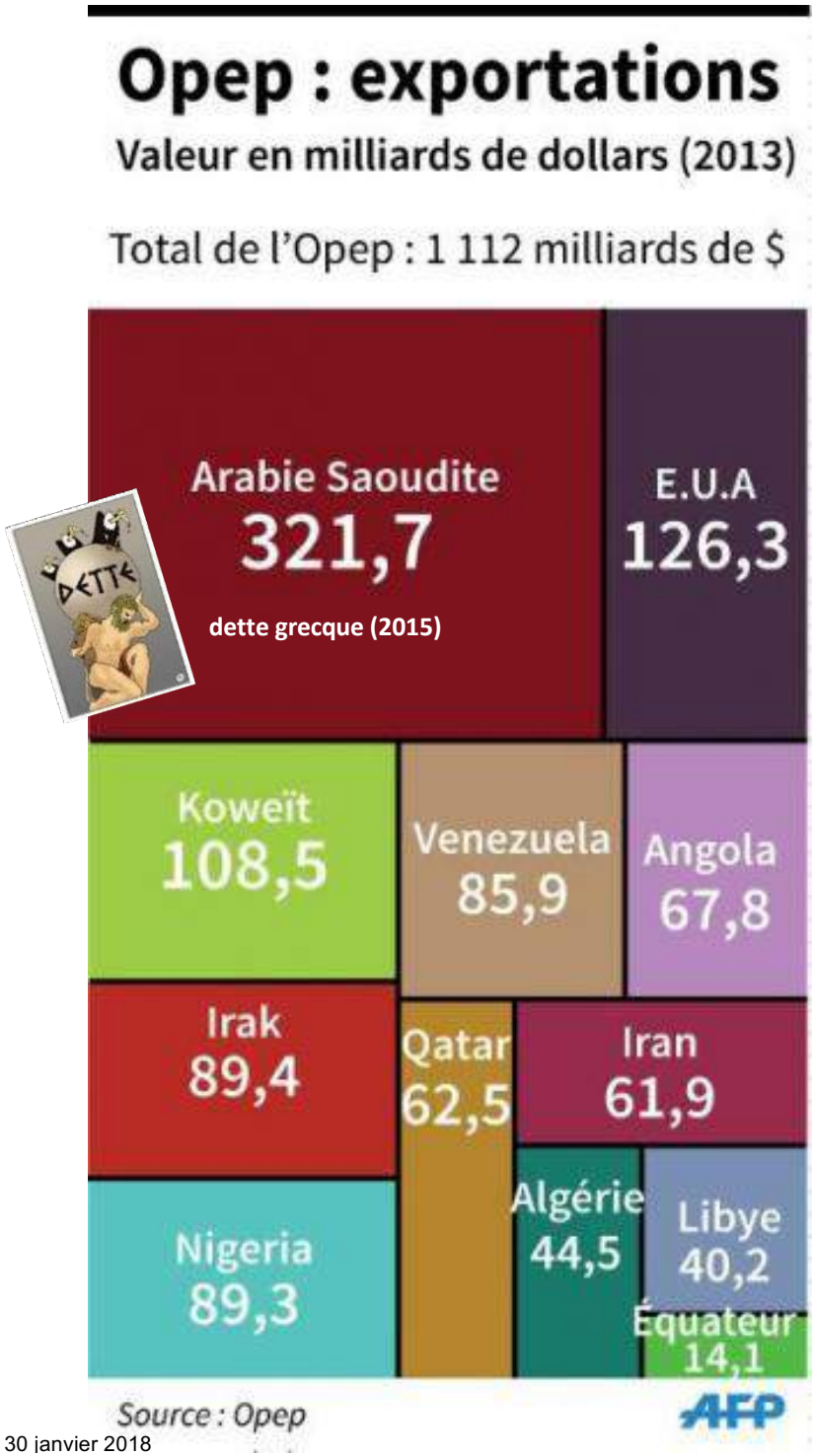
1707 Gb ou 1,7 trillions de barils

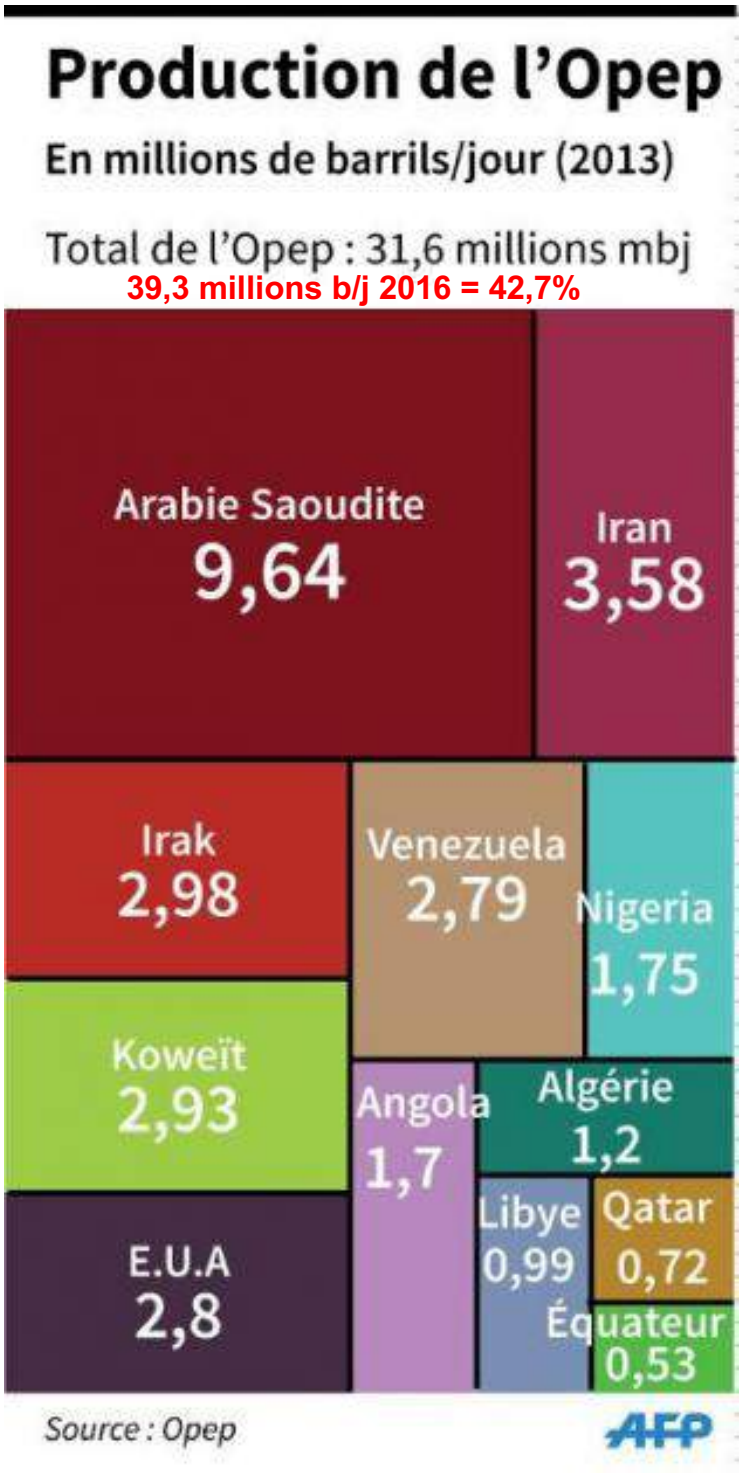
inchangé depuis 4 ans =*nc*

prod. 2016 = 91150.10^{6}b/j (+0,5%pr2015)

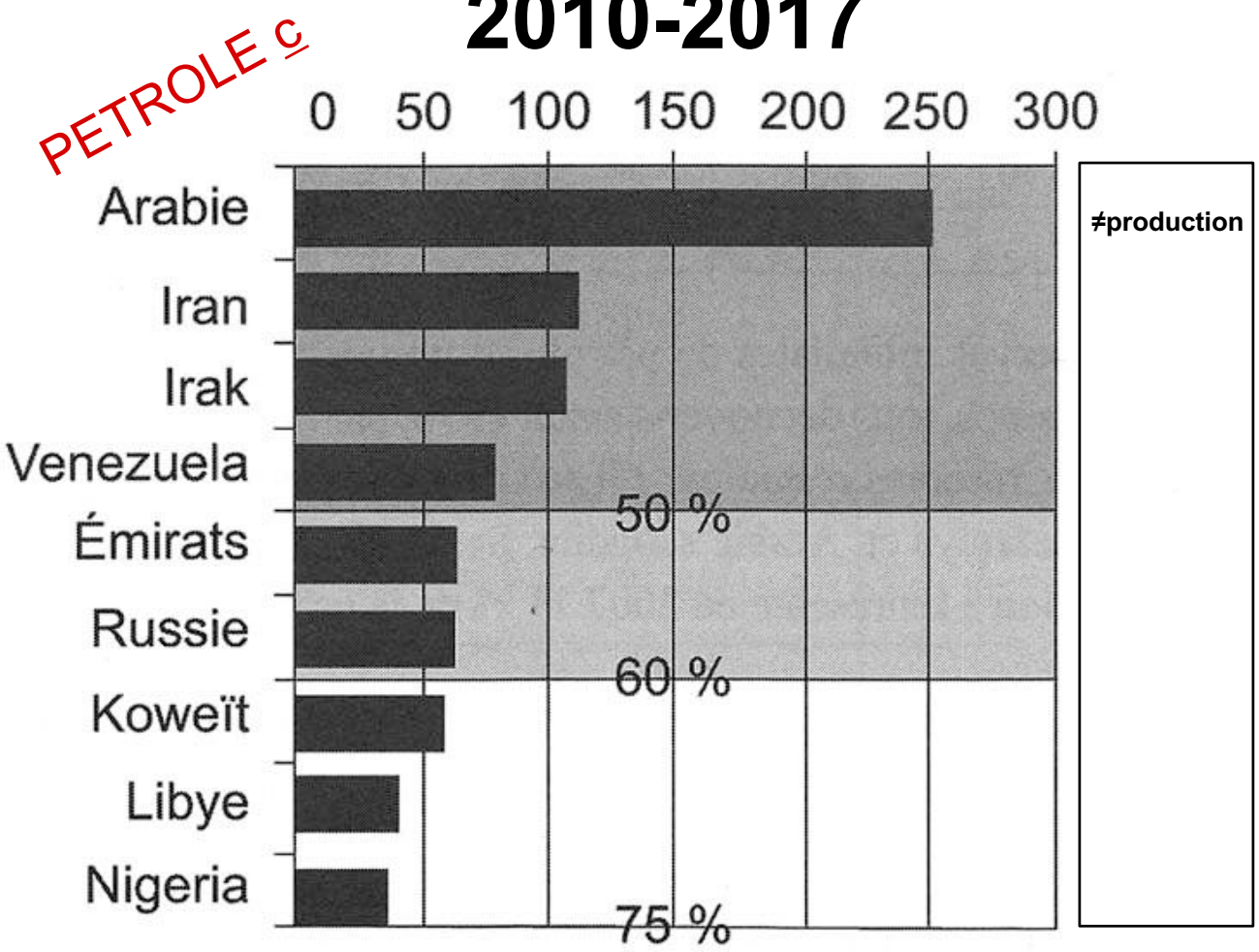
> 1000 b/sec

BP2017


Opep : exportations
Valeur en milliards de dollars (2013)
Total de l'Opep : 1 112 milliards de $
Arabie Saoudite 321,7
dette grecque (2015)
E.U.A 126,3
Koweït 108,5
Venezuela 85,9
Angola 67,8
Irak 89,4
Qatar 62,5
Iran 61,9
Algérie 44,5
Libye 40,2
Nigeria 89,3
Équateur 14,1
Source : Opep
AFP


Production de l'Opep
En millions de barrils/jour (2013)
Total de l'Opep : 31,6 millions mbj
39,3 millions b/j 2016 = 42,7%
Arabie Saoudite 9,64
Iran 3,58
Irak 2,98
Venezuela 2,79
Nigeria 1,75
Koweït 2,93
Angola 1,7
Algérie 1,2
Libye 0,99
Qatar 0,72
E.U.A 2,8
Équateur 0,53
Source : Opep
AFP

RESERVES OIL c 1P 2010-2017



« je les considère comme des pays • • • • • • • • • • • ? »

Spot crude prices

US dollars per barrel	Brent $/bbl†
1981	35.93
1982	32.97
1983	29.55
1984	28.78
1985	27.56
1986	14.43
1987	18.44
1988	14.92
1989	18.23
1990	23.73
1991	20.00
1992	19.32
1993	16.97
1994	15.82
1995	17.02
1996	20.67
1997	19.09
1998	12.72
1999	17.97
2000	28.50
2001	24.44
2002	25.02
2003	28.83
2004	38.27
2005	54.52
2006	65.14
2007	72.39
2008	97.26
2009	61.67
2010	79.50
2011	111.26
2012	111.67
2013	108.66
2014	98.95
2015	52.39
2016	43.73

(nc)

nc

Le Cours du baril de pétrole en dollars: 45.54 $ (-0.03 0.07%)

Le Cours du pétrole Brent en dollars: 46.58 $ (-0.05 0.11%)

Prix du pétrole brut **WTI** | Prix du pétrole **Brent**

45.54 $

17 nov 2016

[43.73/2016]
[52.39/2015]

Mardi 23 janvier 2018 13:16

Le Cours du baril de pétrole en dollars: 63.80 $ (+0.23 0.36%)

Le Cours du pétrole Brent en dollars: 69.30 $ (+0.27 0.39%)

GRAPHIQUE DES PRIX DU BARIL DE PÉTROLE BRUT | WTI | BRENT

63.80 $

23 janv 2018

QUELQUES CONSIDERATIONS A NE JAMAIS PERDRE DE VUE MEME SI …

A l'heure actuelle, aucune organisation indépendante n'a le mandat de contrôler l'exactitude des réserves annoncées par les compagnies pétrolières et les États.

Les hydrocarbures non conventionnels obligent à revoir la notion de réserves.

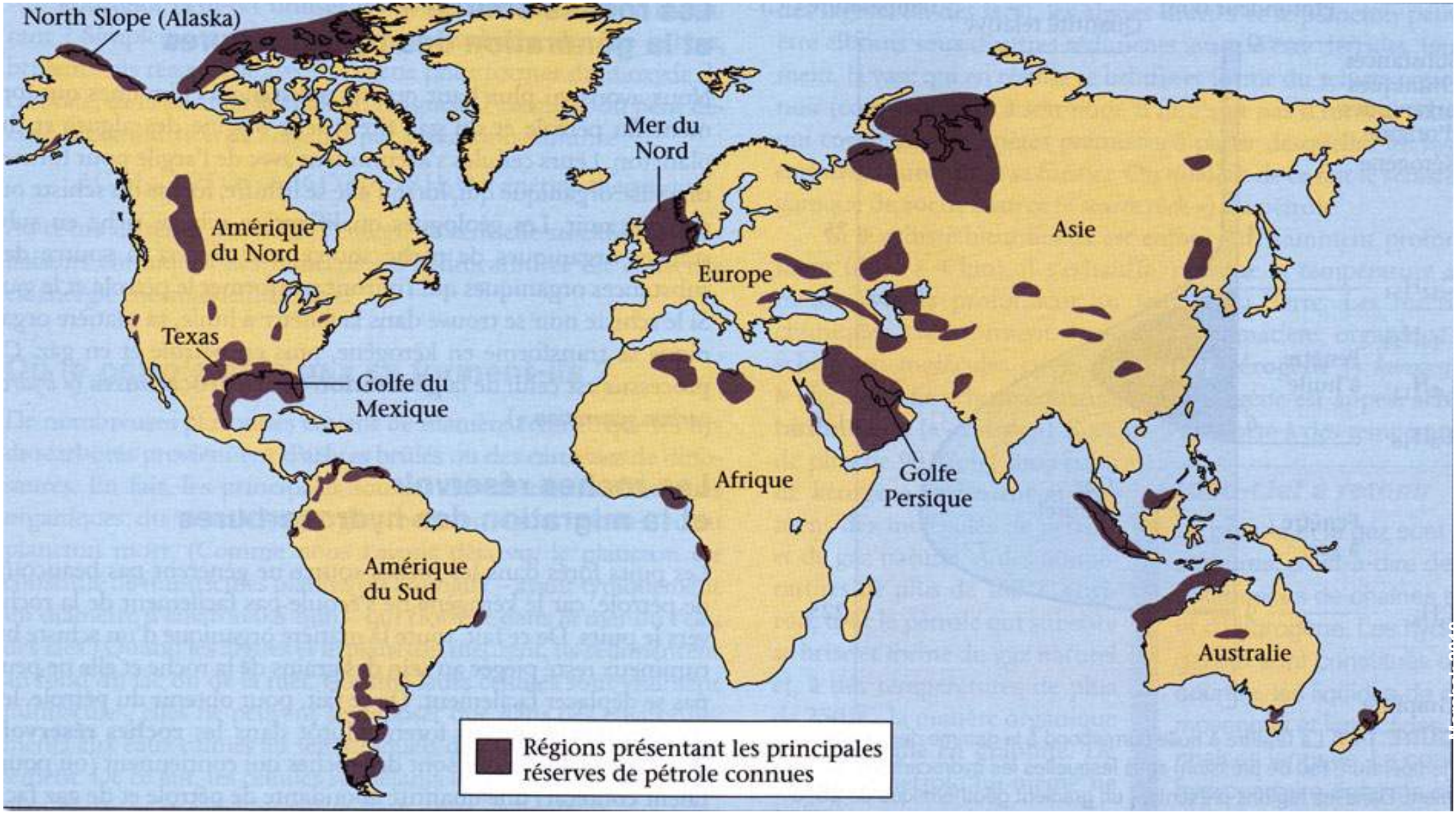
Les réserves prouvées ont un impact sur la vie économique des sociétés pétrolières car elles influent directement sur leur valorisation boursière. Des entreprises de consulting sont payées par les entreprises pétrolières pour « certifier » leurs réserves. Certains analystes dénoncent les conflits d'intérêt potentiels induits par ce système.

La Society of Petroleum Engineers (SPE) a toutefois mis en place des règles communes pour que les sociétés pétrolières calculent leurs réserves en se conformant aux exigences de la SEC (Securities and Exchange Commission). Certaines compagnies pétrolières privées ont surévalué leurs réserves dans le passé afin de valoriser leurs actifs. Entre 1997 et 2002, le groupe Shell a par exemple gonflé ses réserves annoncées de 23% et a été condamné par la SEC à une amende de 120 millions de dollars.

L'annonce de réserves peut ainsi reposer sur des considérations politiques ou stratégiques. Certains analystes soupçonnent par exemple que des pays puissent annoncer leurs réserves « 2P » en les faisant passer pour leurs réserves prouvées (« 1P »). Notons que les réserves de l'Arabie Saoudite ont un niveau constant depuis plus de 20 ans malgré une production proche de 10 millions de barils par jour.

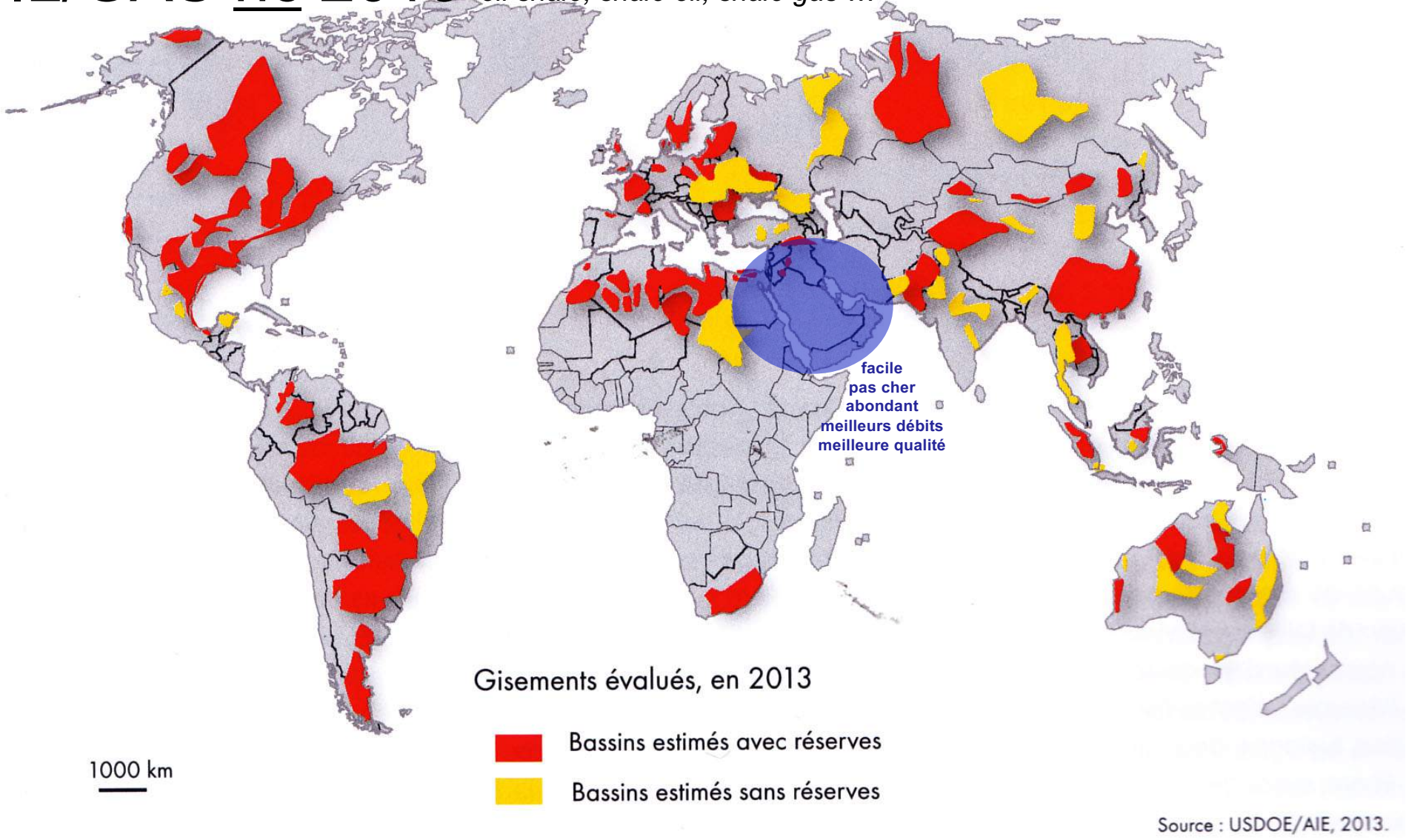
Les États sont les propriétaires des réserves de pétrole présentes sur leur territoire et dans les fonds marins n'excédant pas une distance de 200 miles marins (370,4 km) de leurs côtes, à l'exception des États-Unis où ce sont les propriétaires du sol qui sont propriétaires du sous-sol.

OIL c : connus depuis longtemps *= géologie des bassins sédimentaires*

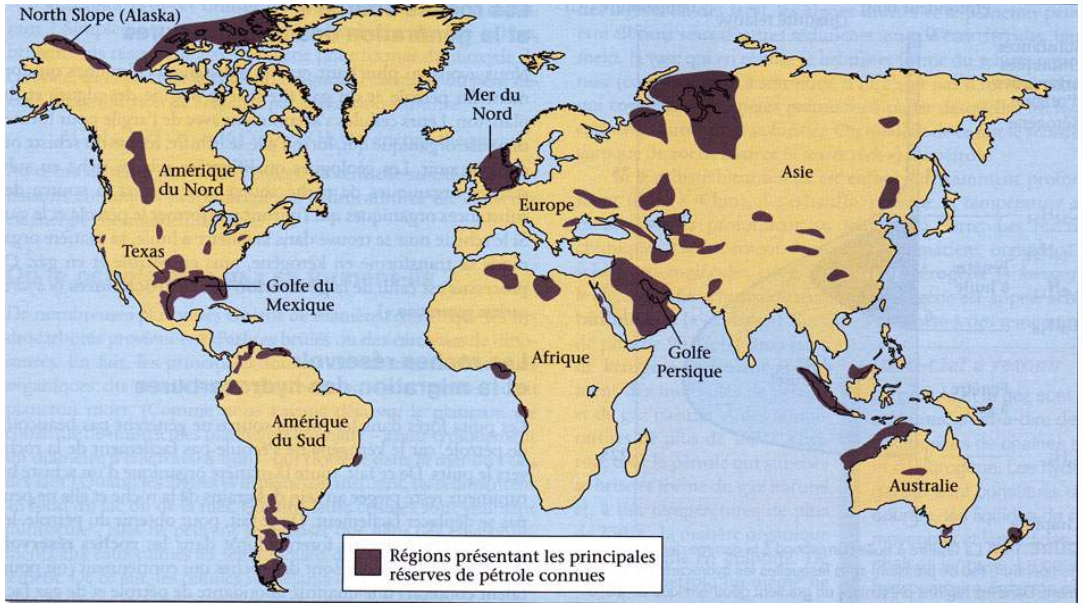


PRINCIPAUX GISEMENTS D'HUILE ET DE GAZ DE SCHISTE *± connus depuis longtemps mais envolée prix du baril en 2003…*

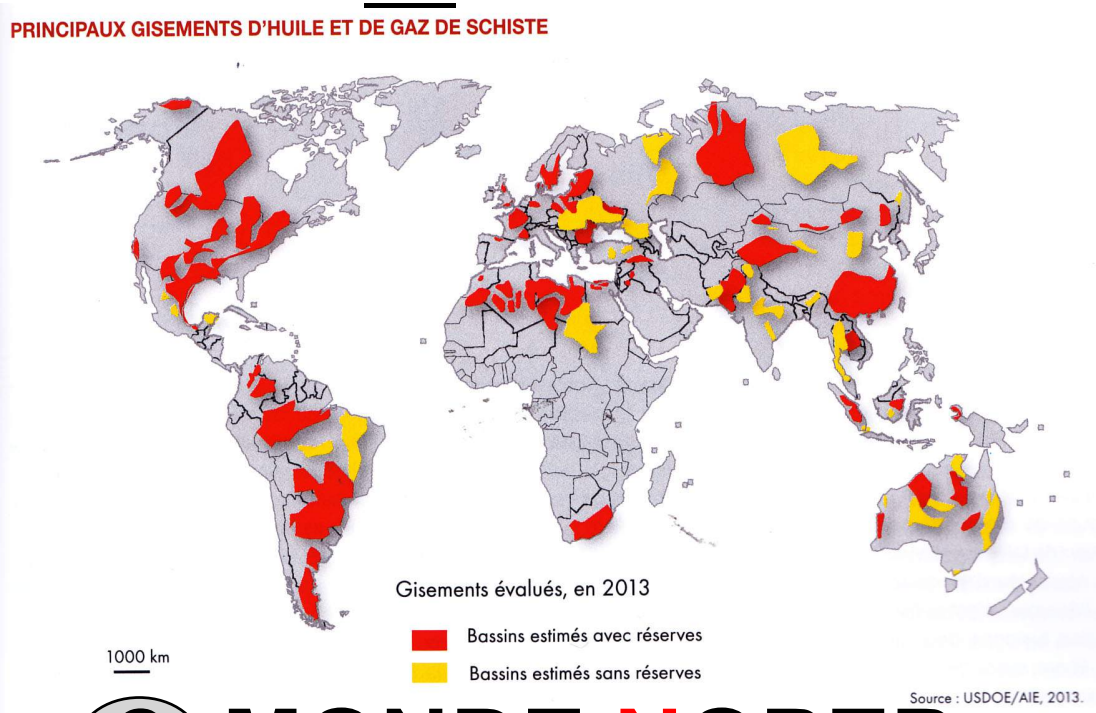
OIL/GAS nc 2013 *oil shale, shale oil, shale gas …*



OIL c



OIL/GAS nc 2013



1 MONDE OPEP (2/3-3/4 des 1P)

6000 Gb, taux de récupération (I,II,III) 30-35% (2016)

2 MONDE NOPEP Am N (Am S) (3/4 de la ressource)

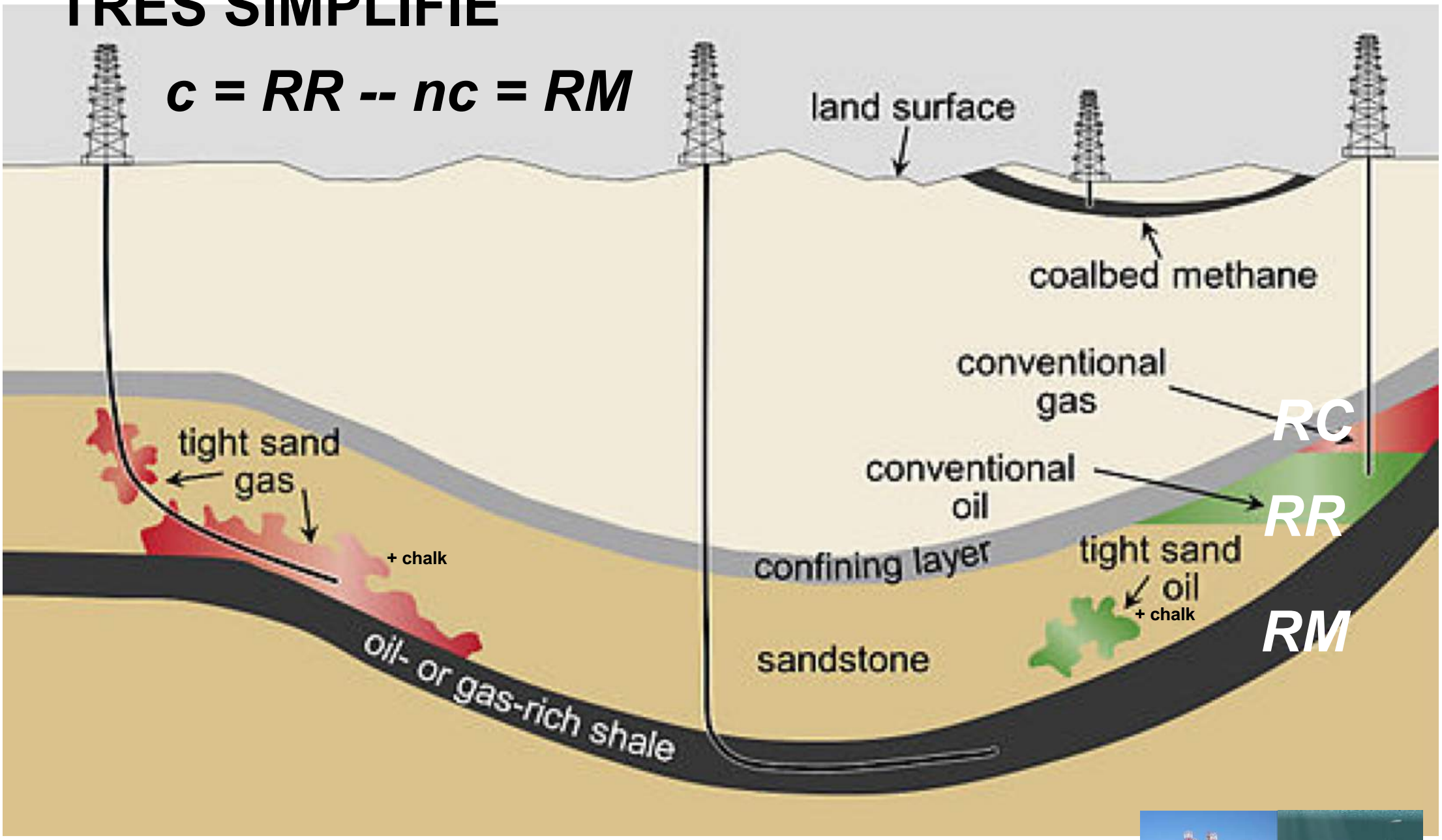
7000 Gb oil nc, taux de récupération 10% (2015)

3 *Moyen Orient + Russie = ±2/3 Gaz c*

4 *Gaz nc : USA, Canada, (Argentine, Chine)*

TRES SIMPLIFIE

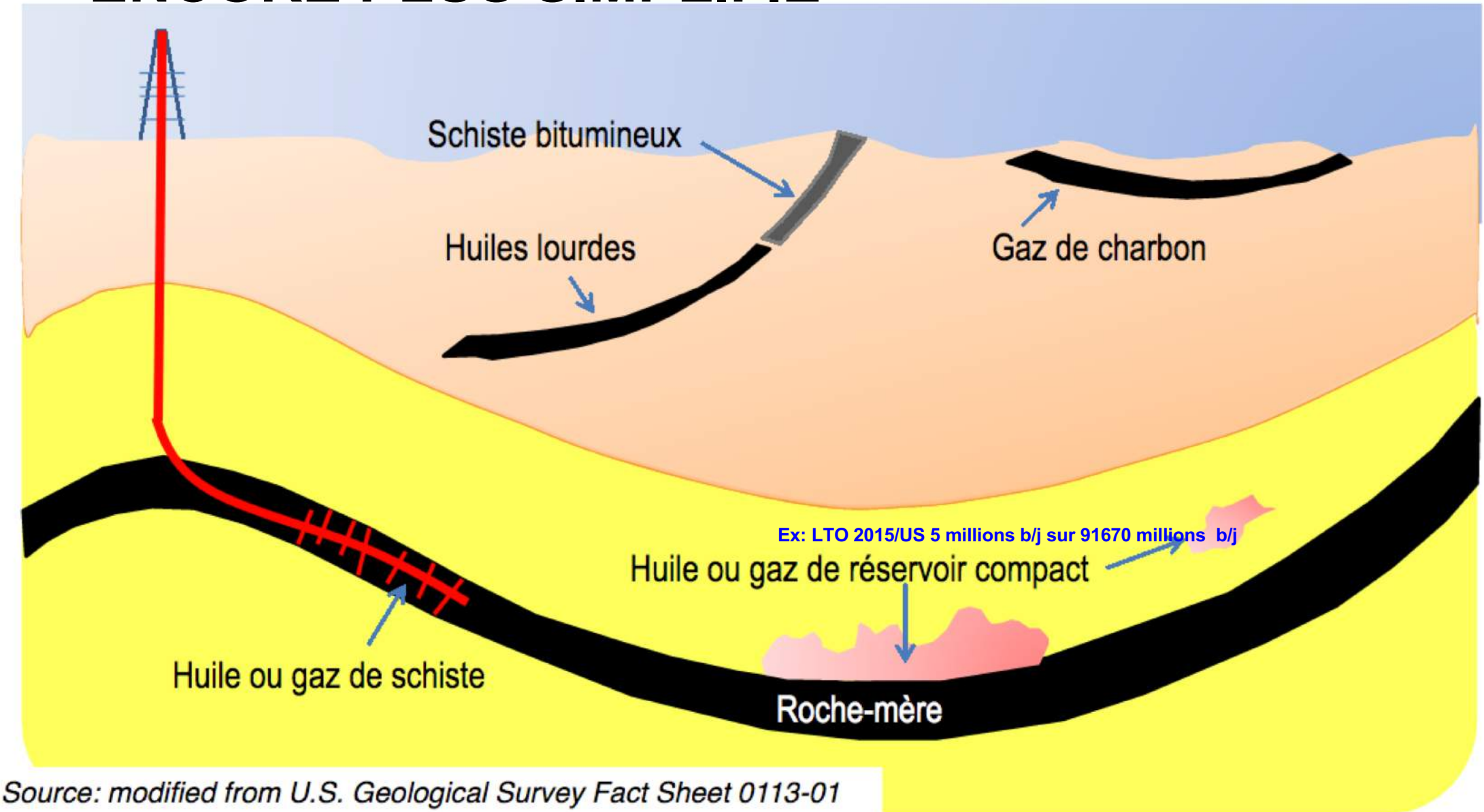
c = RR -- nc = RM



+ subconventionnel (infrasalifère)

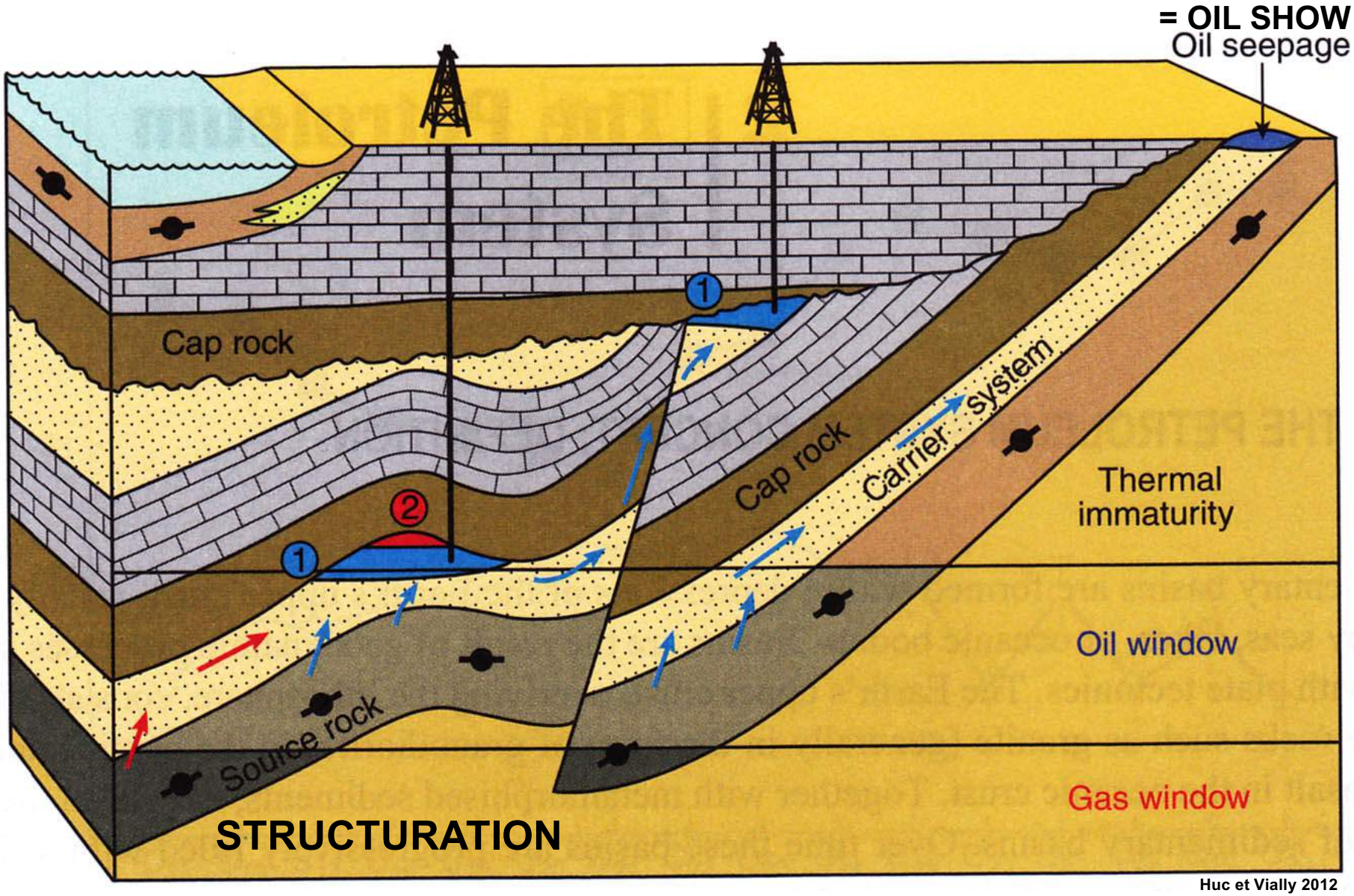
Réservoirs non-conventionnels d'hydrocarbures

ENCORE PLUS SIMPLIFIE

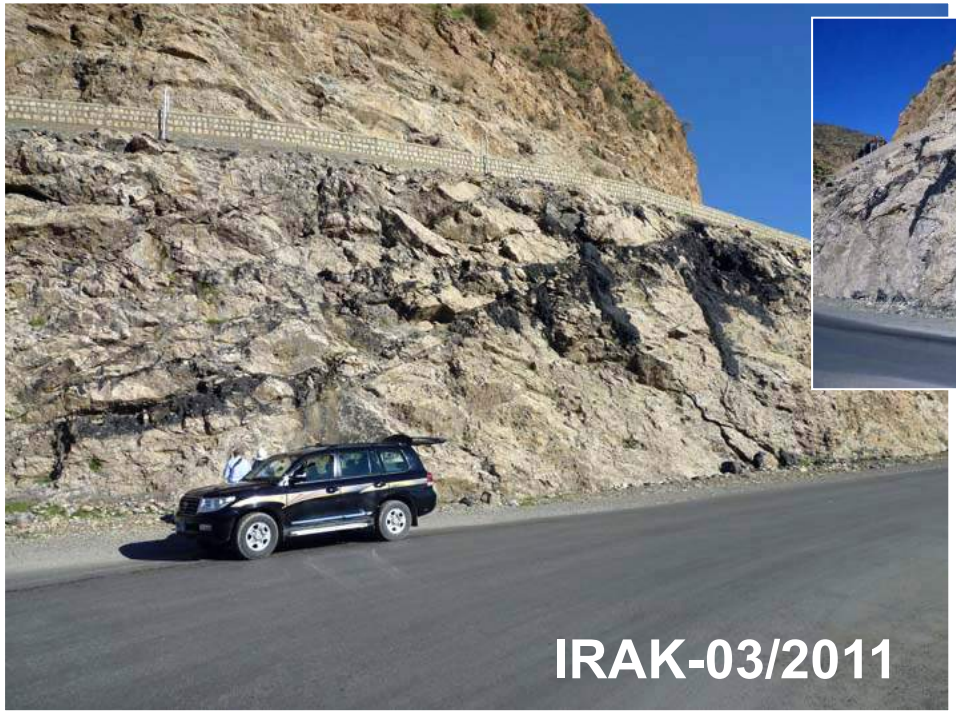


Source: modified from U.S. Geological Survey Fact Sheet 0113-01

UN PEU PLUS COMPLIQUE

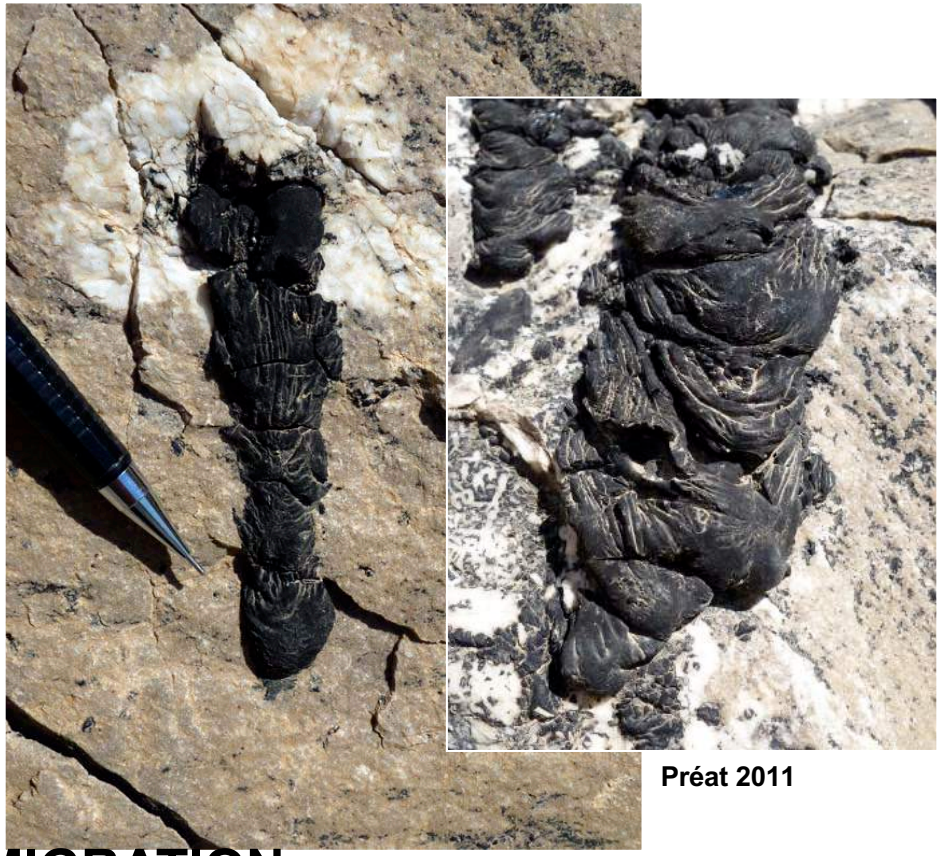


Huc et Vially 2012



OIL SHOW

Préat 2011

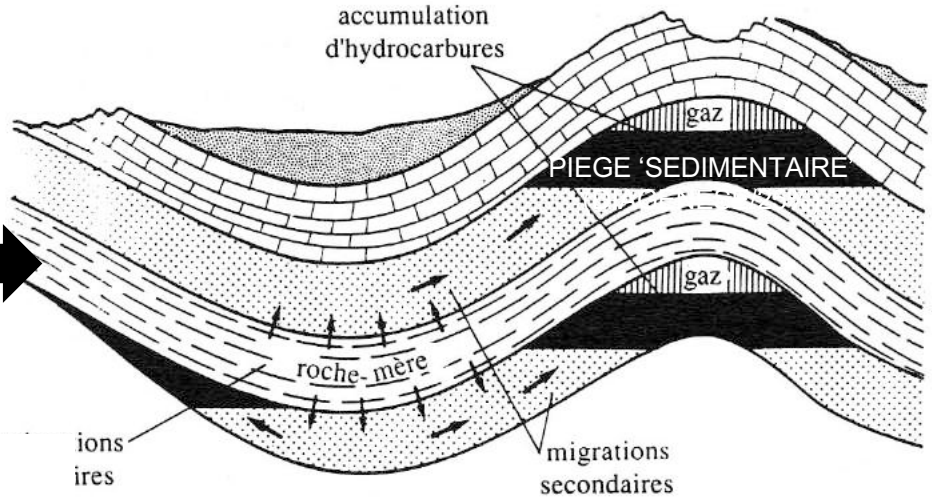


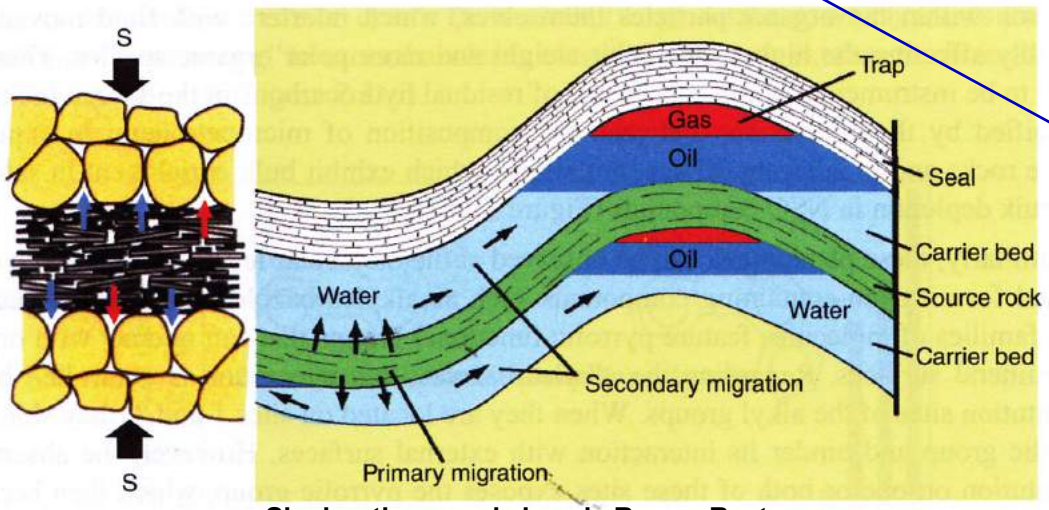
Préat 2011

OIL SHOW or DYSMIGRATION

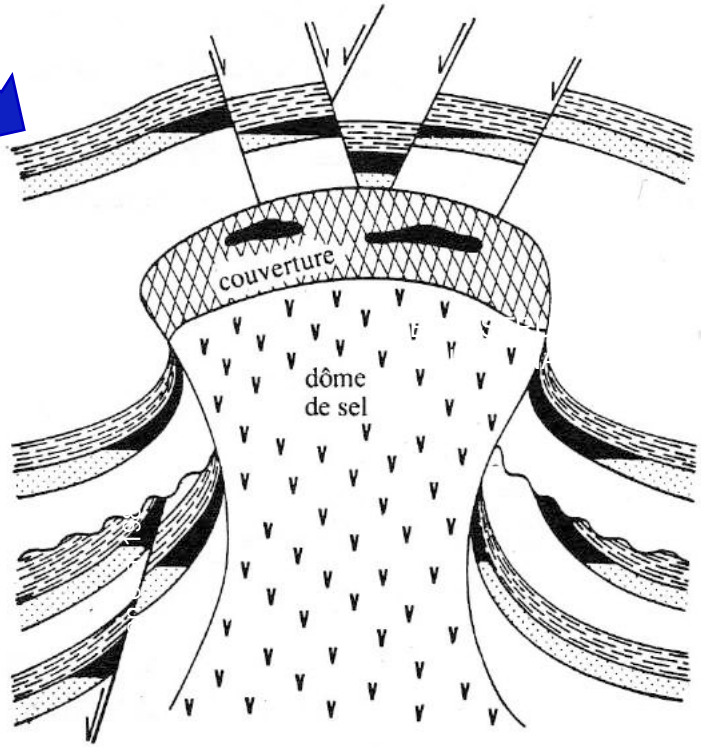
SYSTEME PETROLIER

STRUCTURATION TECTONIQUE ou SEDIMENTAIRE





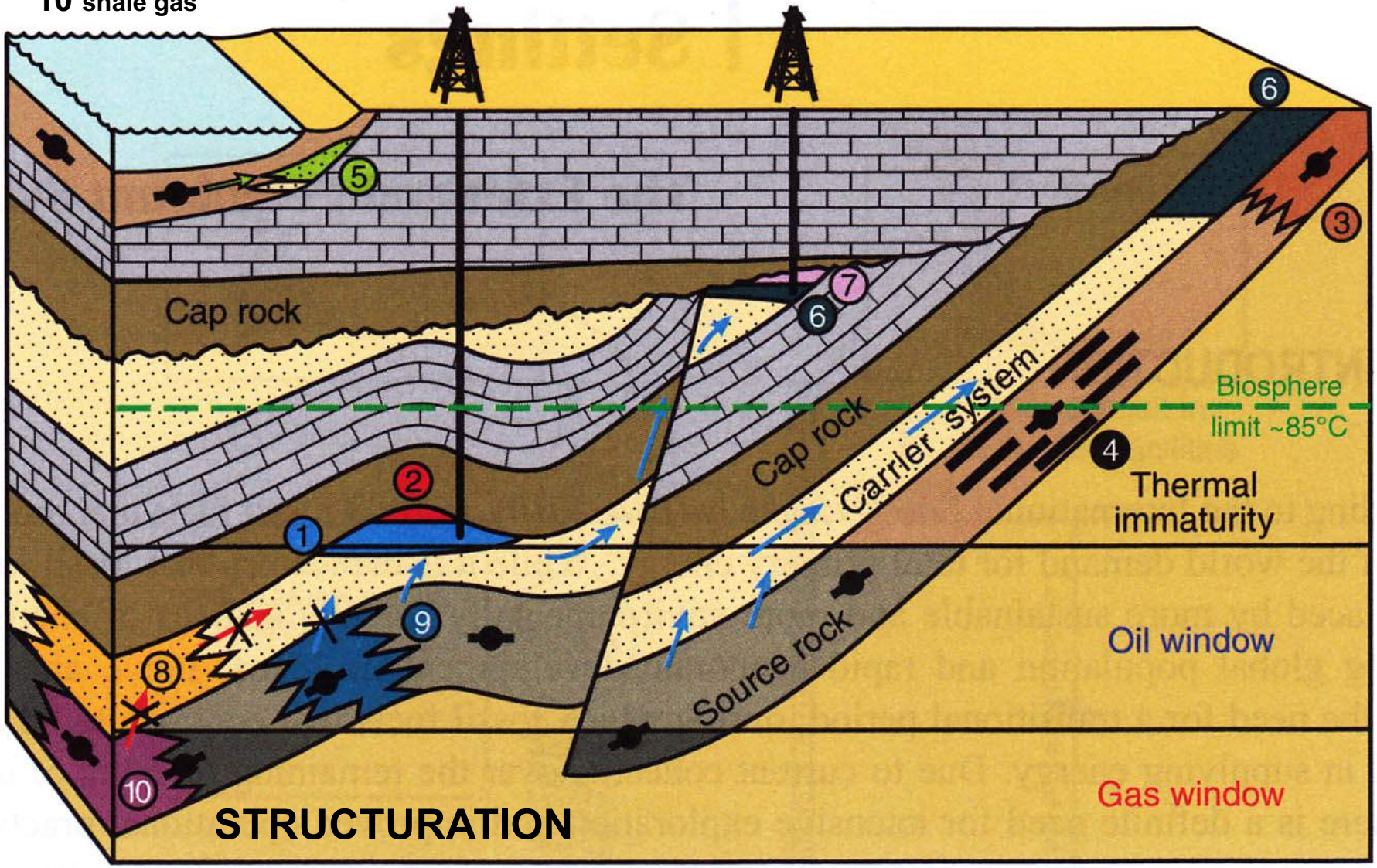
Si migration vers le bas, la Rsce = Rcvture



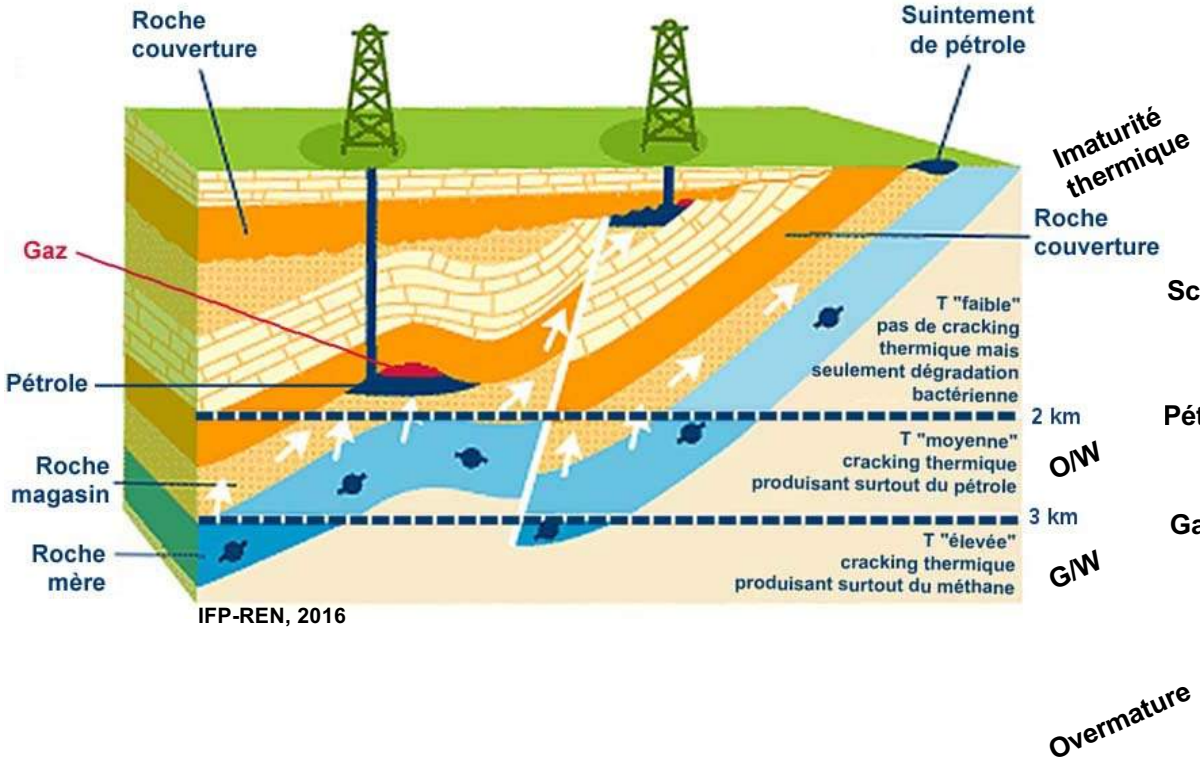
ENCORE UN PEU PLUS COMPLIQUE

EXTENDED PETROLEUM SYSTEM

1 oil c **2** thermogenic gas c **3** oil shale OM I&II **4** coal seams OM III **5** primary biogenic gas
6 heavy/extra heavy oils, bitumen **7** secondary biogenic gas **8** tight gas **9** tight oil/oil from source rock
10 shale gas



SYSTEME PETROLIER : RESERVOIRS CONVENTIONNELS ET NON CONVENTIONNELS
(ANTICLINAL FAILLE, CAS LE PLUS FRÉQUENT CAR LE PLUS SIMPLE)



IFP-REN, 2016

Schistes bitumineux (<2km)

Pétrole de schiste (2-3km)

Gaz de schiste (>>3km)

http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-cles-pour-comprendre/Les-sources-d-energie/Les-hydrocarbures-non-conventionnels/Hydrocarbures-non-conventionnels-definitions

Préservation des hydrocarbures

TEMPS

- Rétention (capacité, intégrité)
- Altération
- Dysmigration

Efficacité •

Couverture

Piégeage des hydrocarbures

- Géométrie du piège

Couverture + Réservoir = Thème pétrolier

Réservoir

- Qualités (porosité, perméabilité, continuité...)
- Faciès

Expulsion de la roche-mère

Efficacité •

Rétention • *in situ*

Migration des hydrocarbures

- Chemin de migration
- Focalisation des hydrocarbures

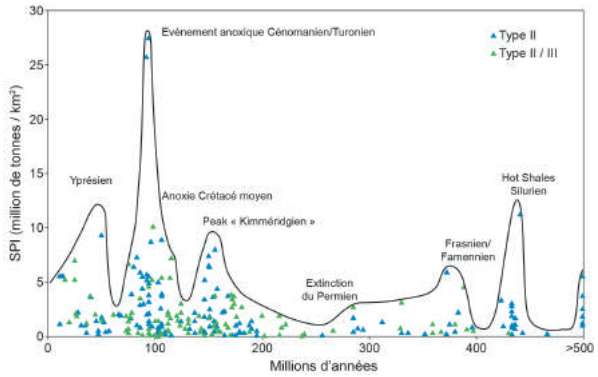
Génération des hydrocarbures

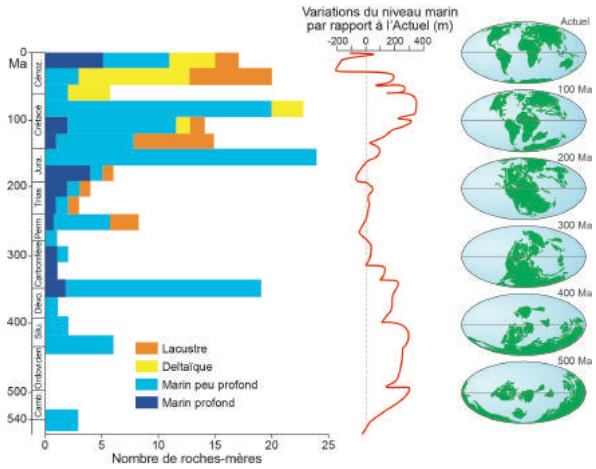
Roche-mère

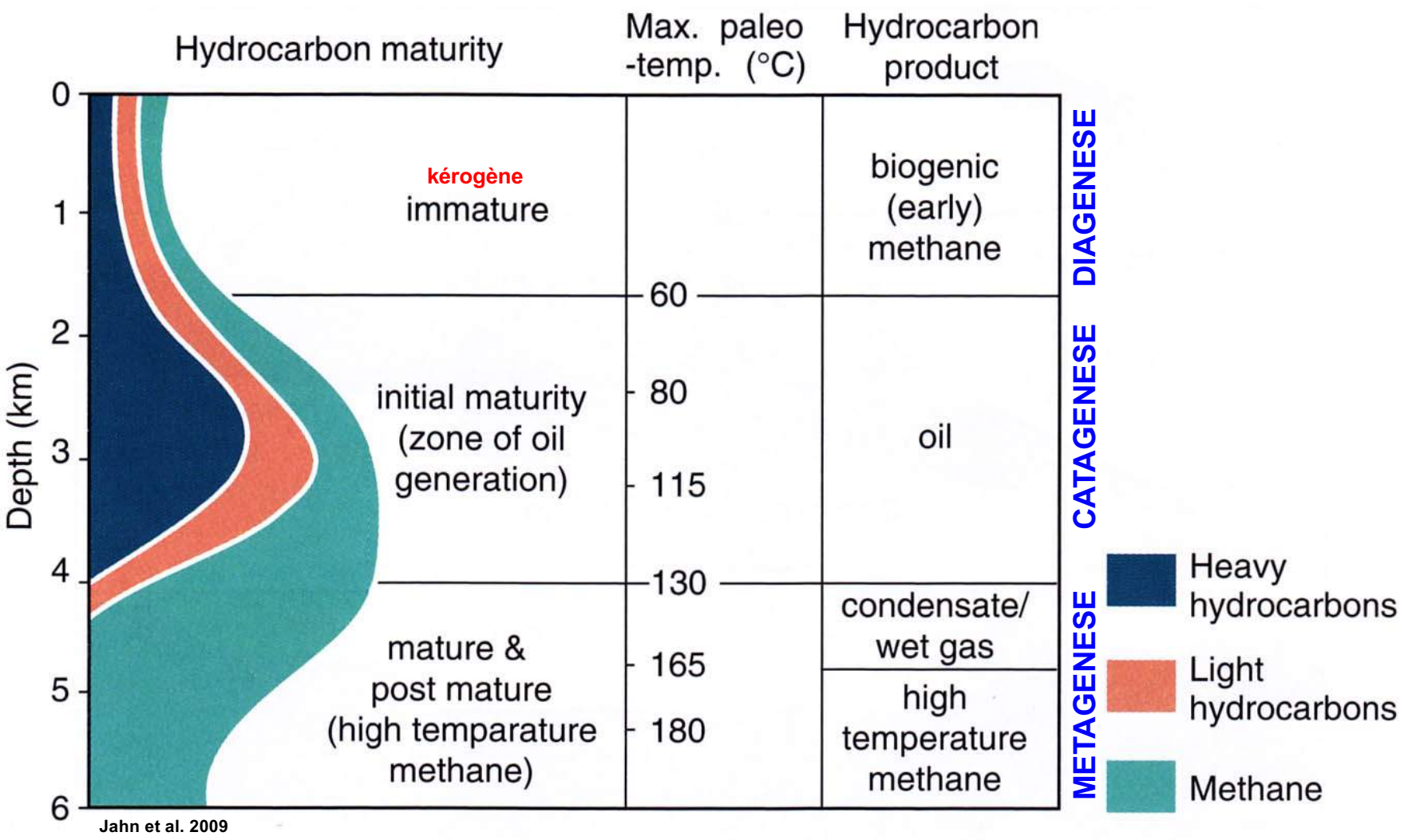
- Extension
- Epaisseur utile
- Capacité générative
- Maturité

Biteau et Baudin, 2017

SPI Source Potential Index

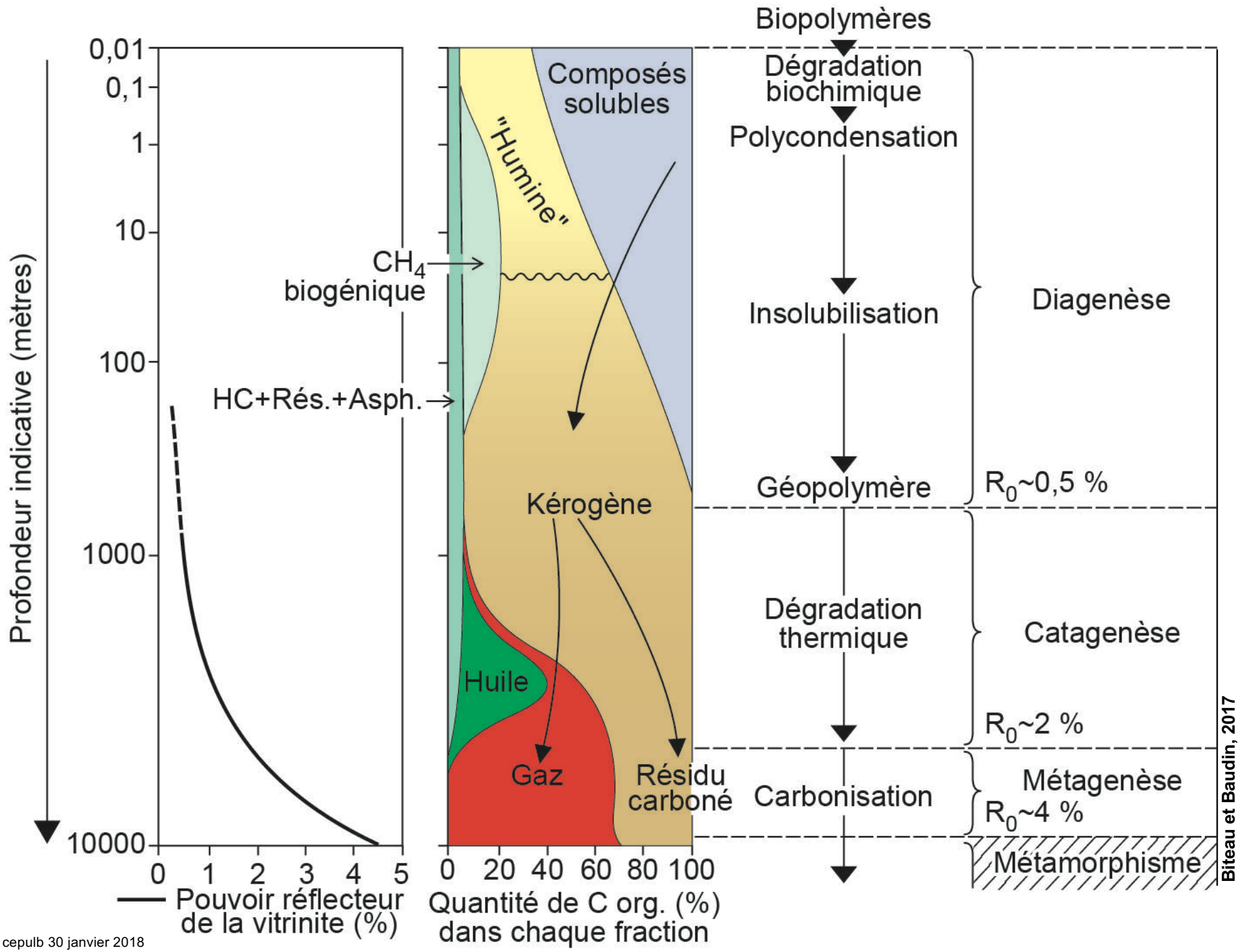






<u>1 à 3% des HC générés sera effectivement piégé</u> et préservé dans des gisements exploitables d'huile et de gaz
Le RESTE est perdu dans les chemins de migration, les petites accumulations diffuses et fuites vers la surface.

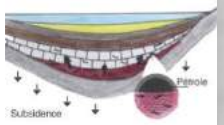
Nb Tous les HC générés représentent seulement 0,1% du kérogène.

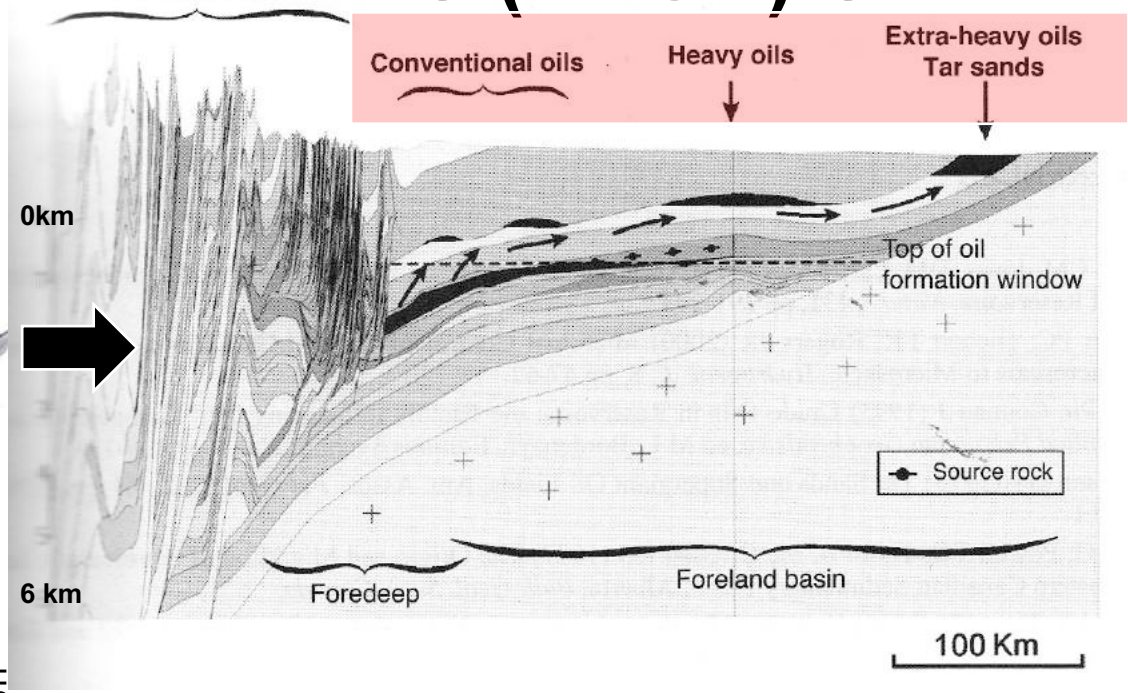


A. Préat-ULB cepulb 30 janvier 2018

A. Préat-ULB cepulb 30 janvier 2018

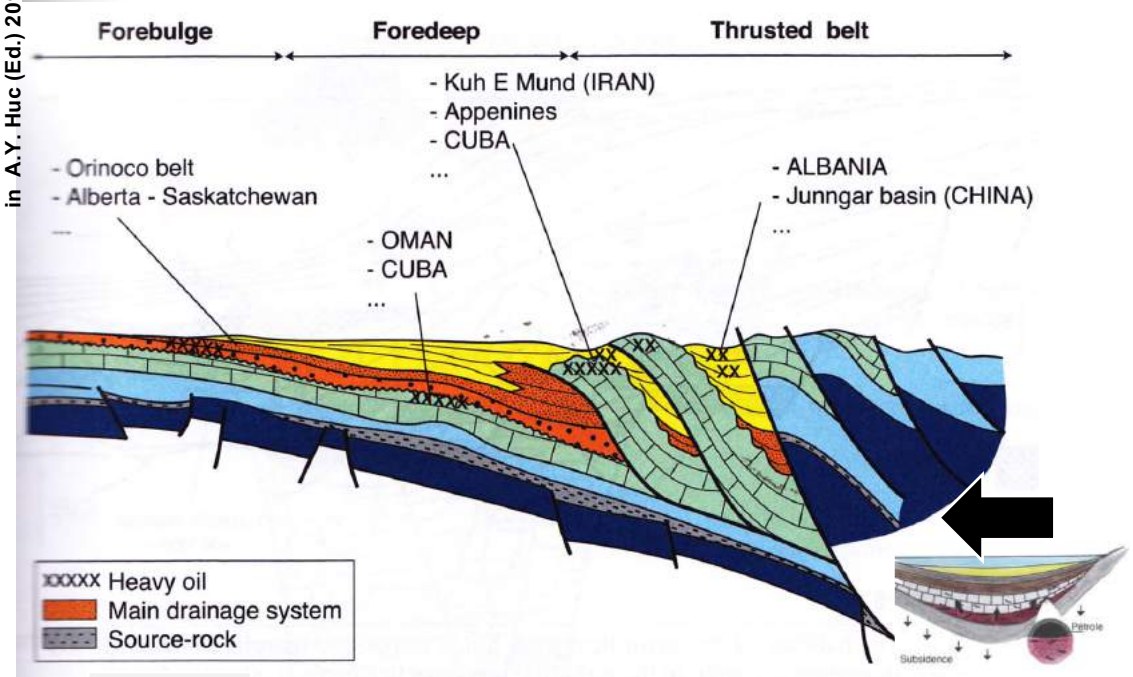
PAS (TROP) SIMPLIFIE …



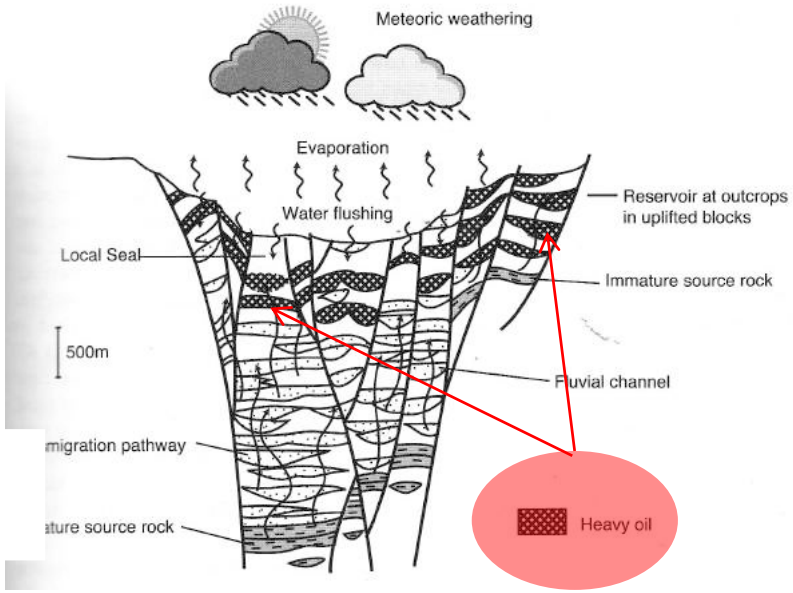


Foreland basins = most favorable situation
Ex : Alberta province, Eastern Venezuela (Orinico)
(world's major heavy oil provinces)

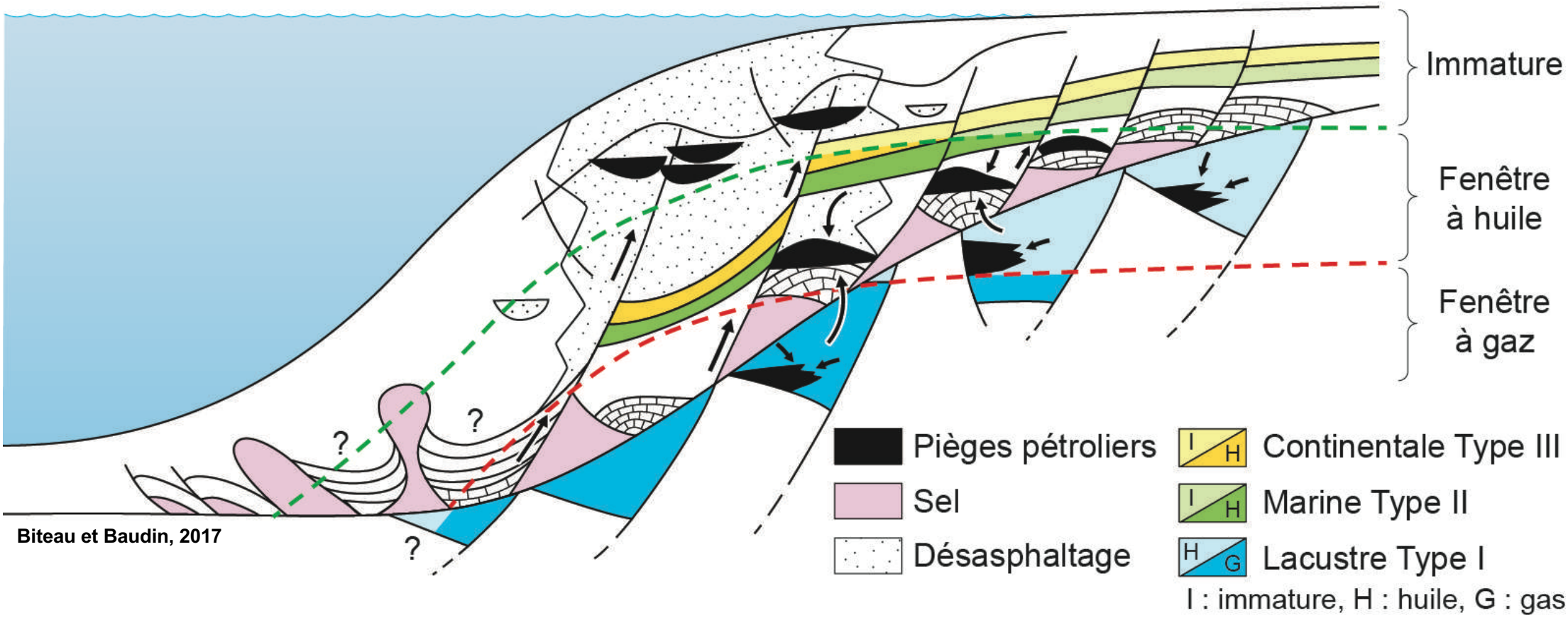
in A.Y. Huc (Ed.) 2011



The oil migrated from the foredeep to the forebulge through fluvial sands draping the foreland basal unconformity. Biodegradation occured at shallow depth. Reservoirs may be laterly buried…. or uplifted in the thrust belt with their heavy oil products. Vertical dysmigration and surface alteration may also occur....

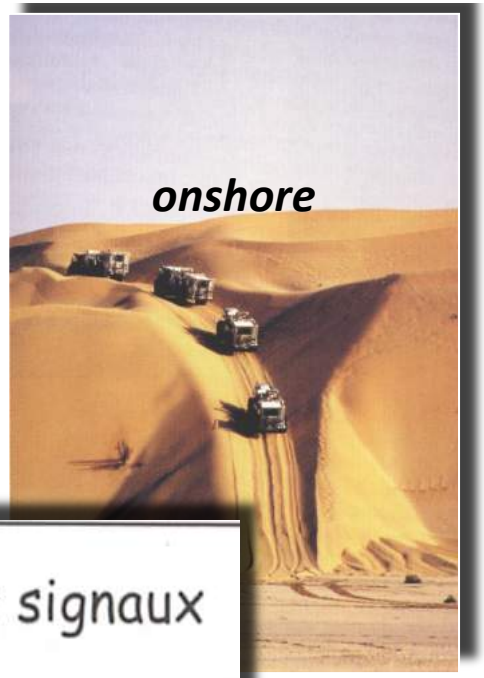


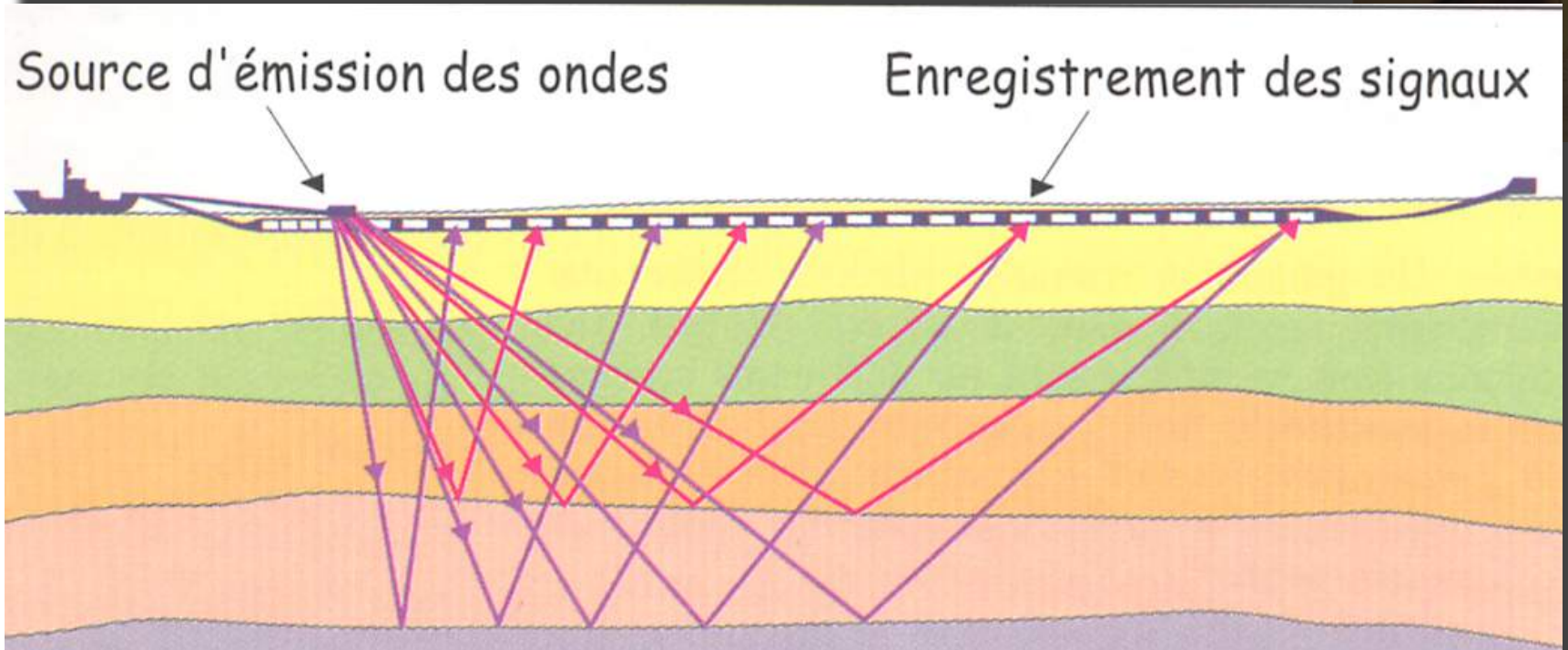
NON



Biteau et Baudin, 2017

SISMIQUE REFLECTION

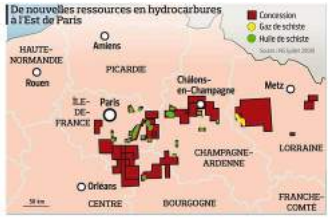




Imagerie sismique par onde de surface = IMPEDANCE càd produit de la vitesse de l'onde par la densité des terrains (roches), délimitation des interfaces [différentes résolutions]...

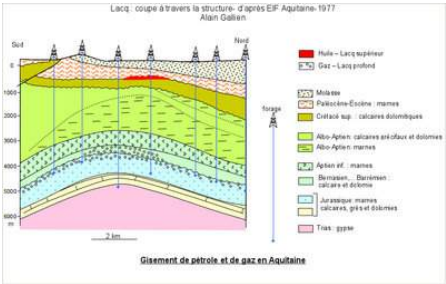
Trias-Tertiaire Intracratonique

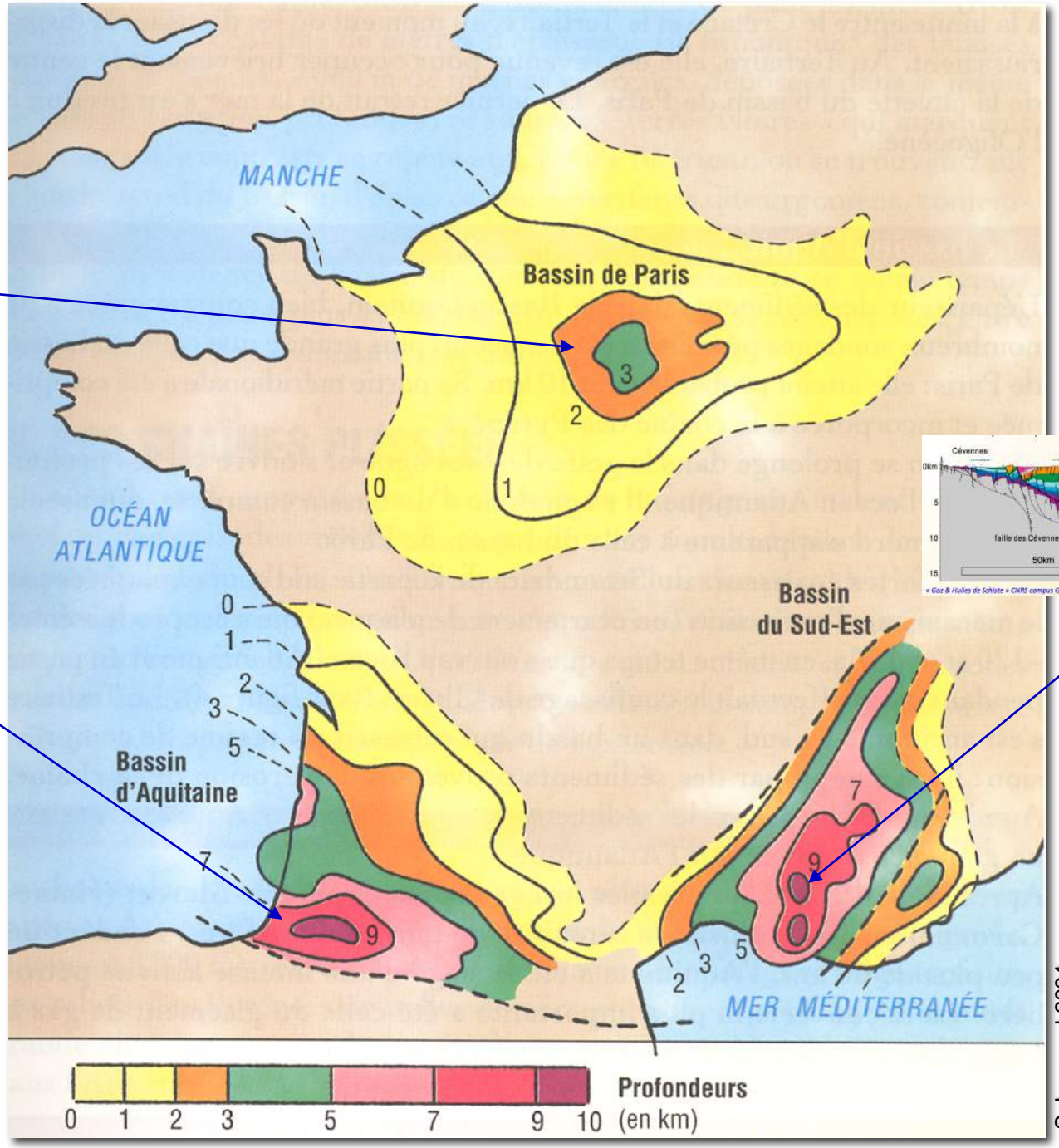
Ex: Schistes 'bitumineux'
60 à 100 Gb, 2750m Toarcien



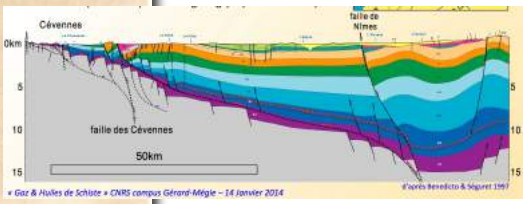
Ex: Gaz de Lacq, 1951-2013
33 millions m³/j
240 milliards de m³

Extension Atlantique Coulissage Ibérie





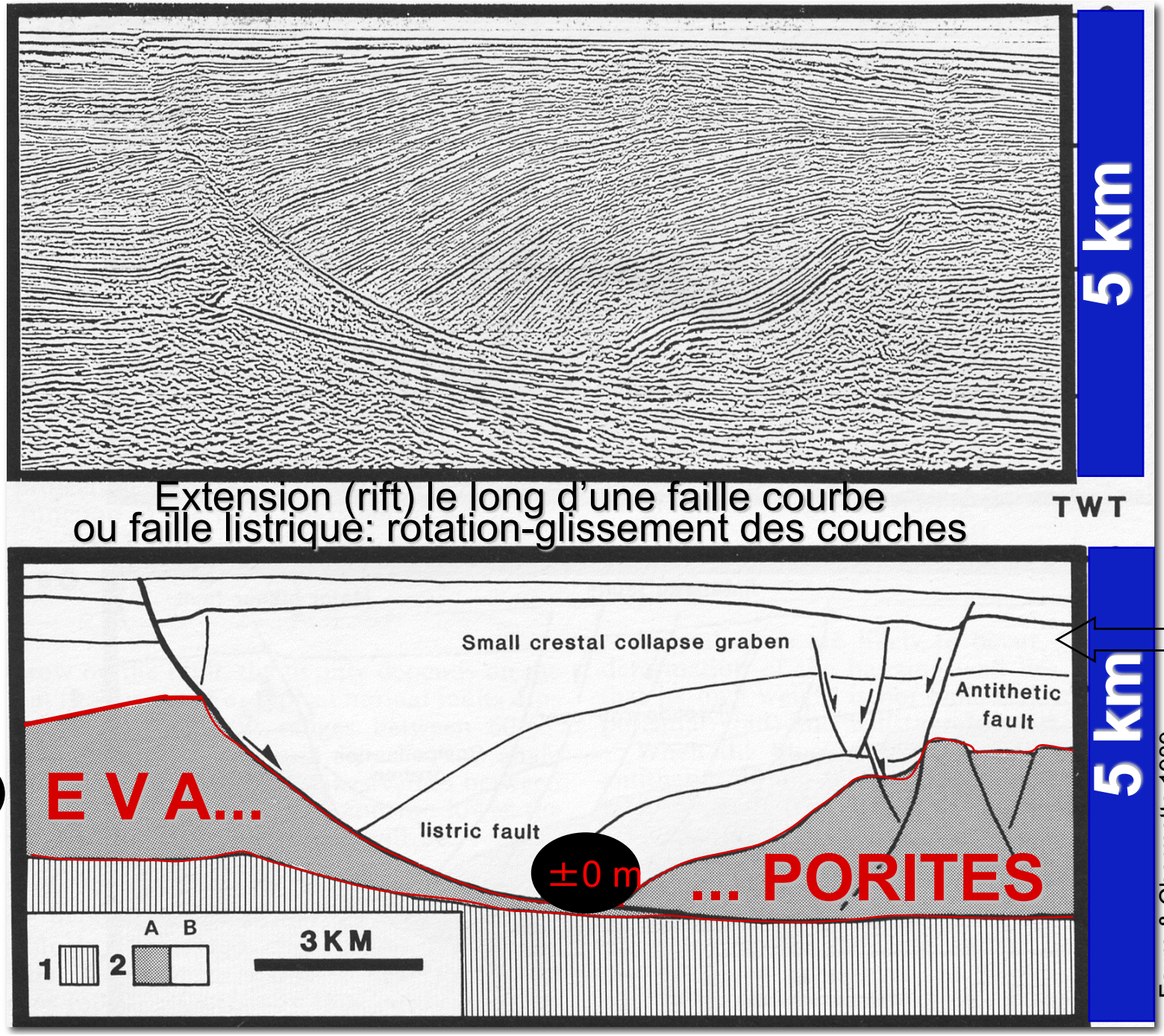
Ex: … les estimations de gaz récupérables (réserves) varient de 1 à 1000!



Trias-Crétacé… Extension Compression Pyrénées et Alpes

Sabouraud 2004

STRUCTURATION SEDIMENTAIRE



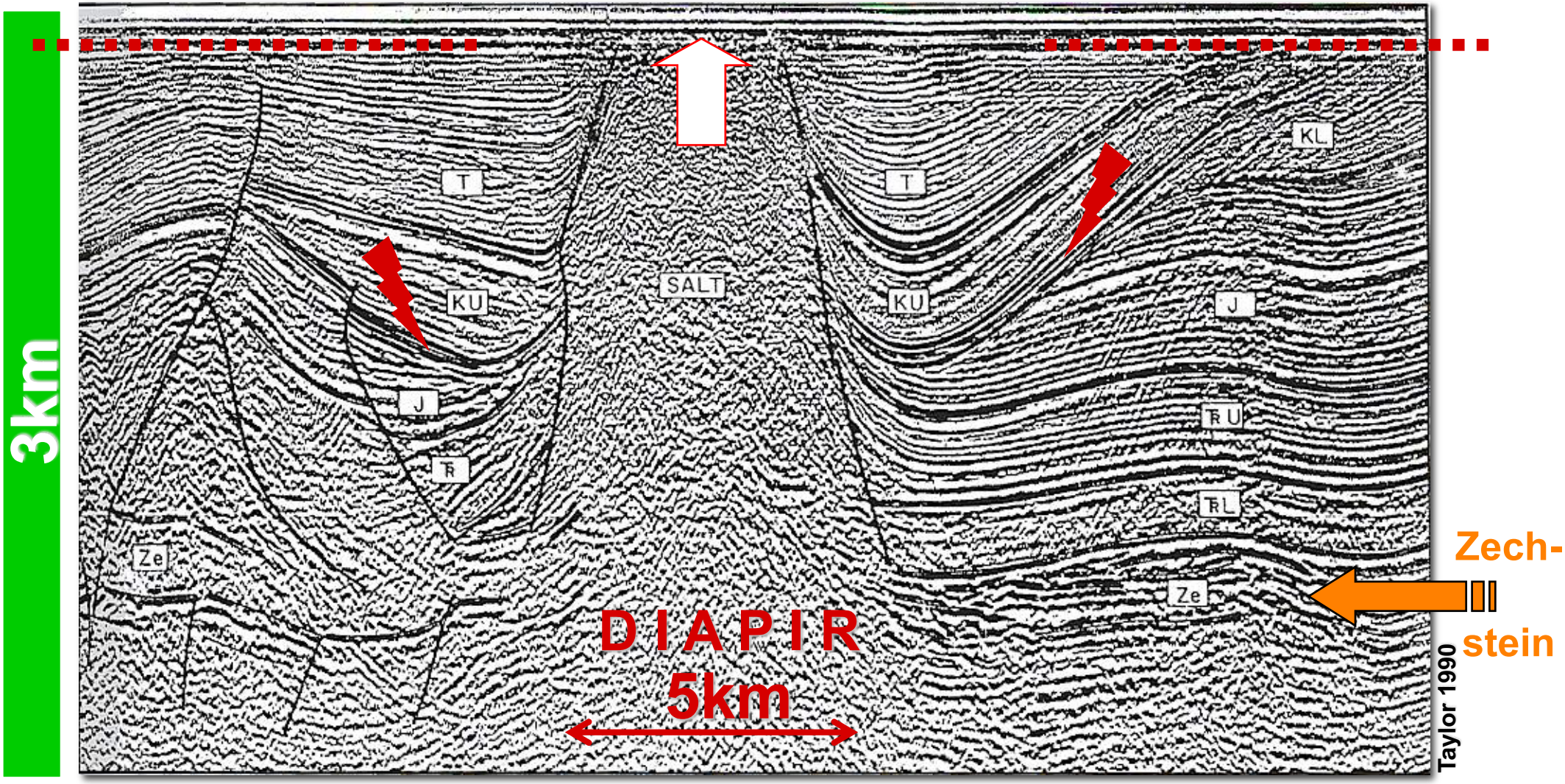
Extension (rift) le long d'une faille courbe
ou faille listrique: rotation-glissement des couches

Failles planes et verticales

Faure & Chermette 1989

STRUCTURATION SEDIMENTAIRE

Halocinèse Crétacé - Tertiaire inférieur [135-55Ma]

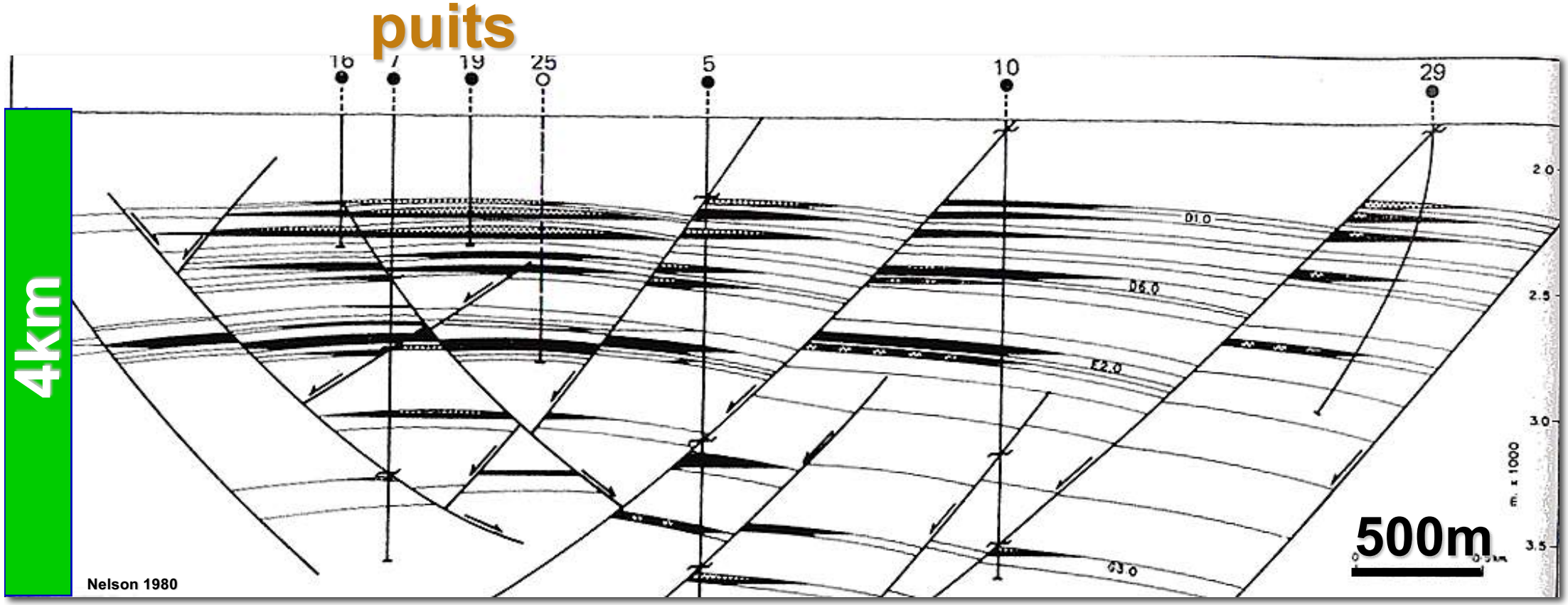


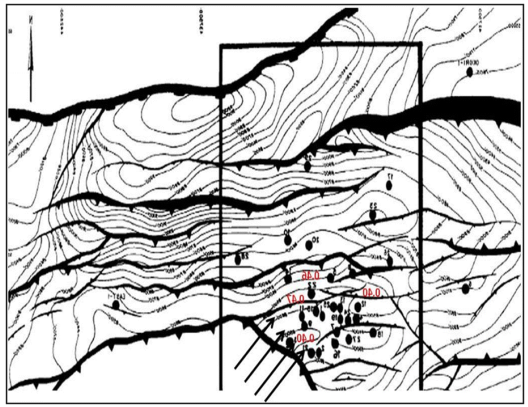
Zechstein = gde mer épicontinentale Pm sup [245Ma]

Profil sismique réflexion, Mer du Nord

[25kmX3km]

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





NIGERIA : (1973, 600 MMb/30 puits)

Nembe Creek Structure = anticlinal complexe 15kmL x 6kml

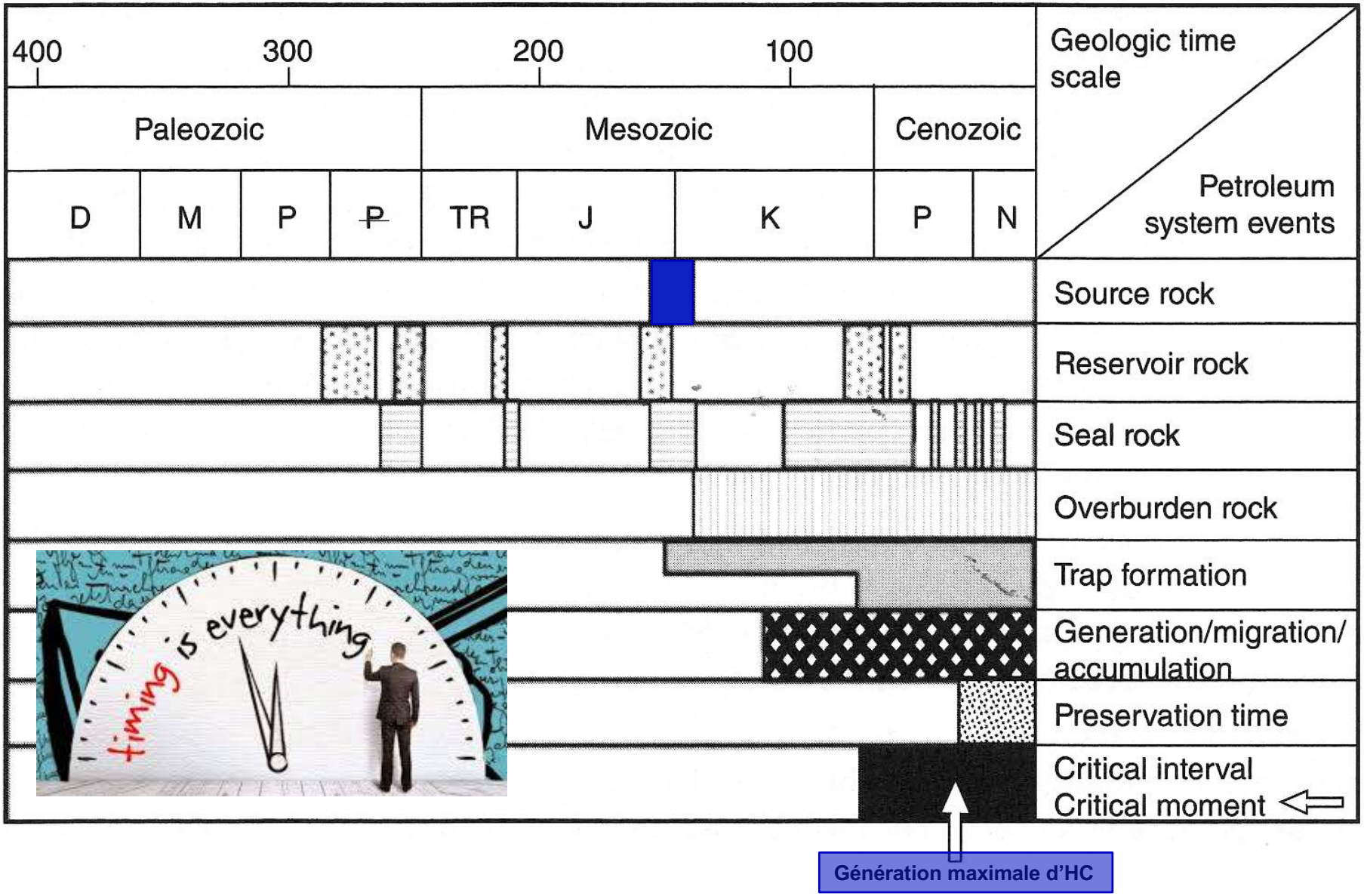
<u>fortement faillé</u> (réseaux conjugués) => blocs faillés

NET OIL SDST = 11 intervalles totalisant 145 m

NET GAS SDST = 8 intervalles totalisant 87 m

EXEMPLE D'UN SYSTEME PETROLIER

Chronologie des événements dans le Graben Central, Mer du Nord



Magoon & Dow, AAPG, 1994

P I E G E conventionnel

avec

- RSce

RR

Rcvture

Structuration

- P I E G E non conventionnel

c = RR et nc = RM

- Although there is no strict definition covering all non-conventional oils and gases, this term is generally considered today to cover all those hydrocarbons that are difficult to extract, either because they are found in very low permeability horizons, or because their nature makes them difficult to produce.

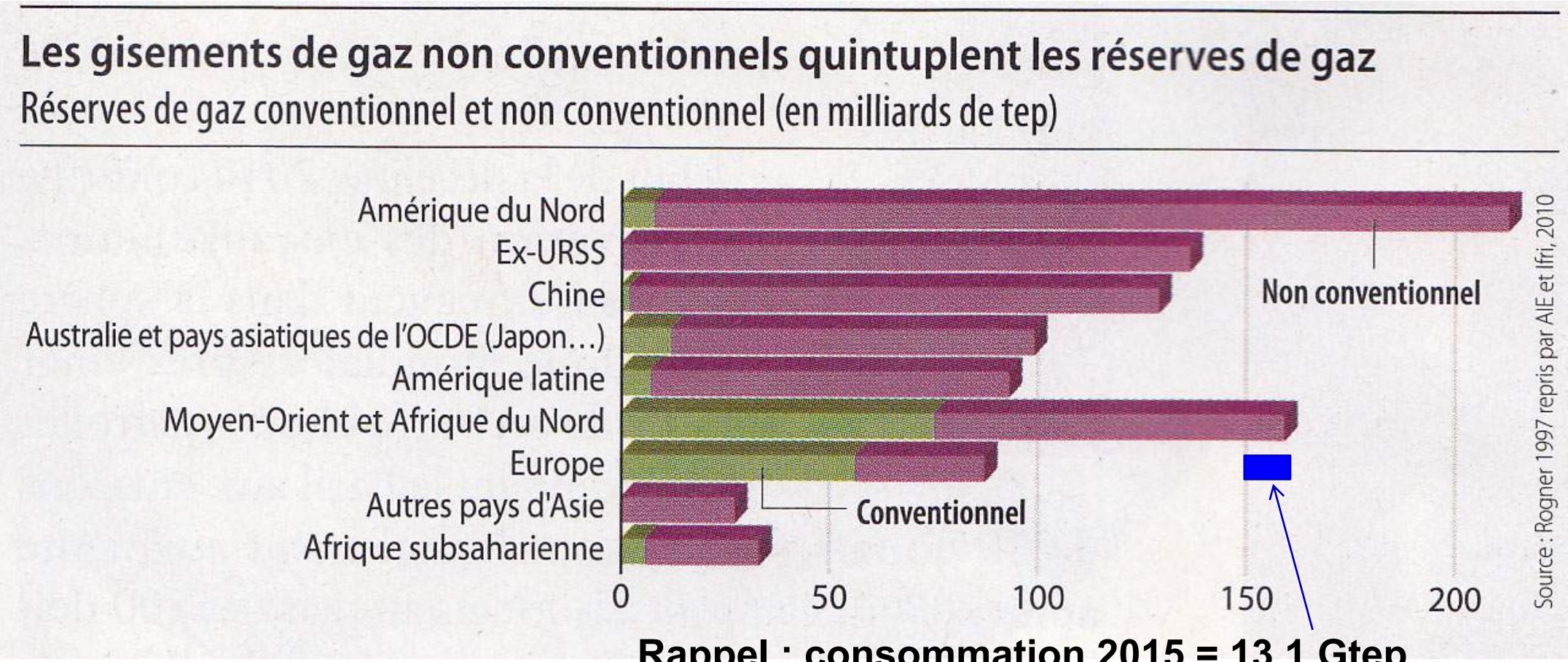
In terms of liquids, this means **heavy and extra-heavy oils, tar sands, shale oils and tar shales**;

For natural gas, it **means tight gas from compact reservoirs, coalbed methane gas, shale gas and in the long term methane hydrates**. Because they are found in very low permeability horizons, or because their nature makes them difficult to produce.

Over the last twenty years, the growth in non conventional oils has accounted for a large proportion of the renewal and increase seen in global reserves

- http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf

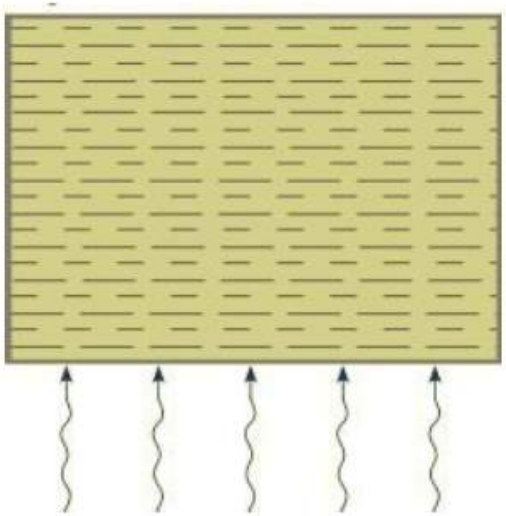
EXEMPLE DU GAZ nc



Rappel : consommation 2015 = 13,1 Gtep

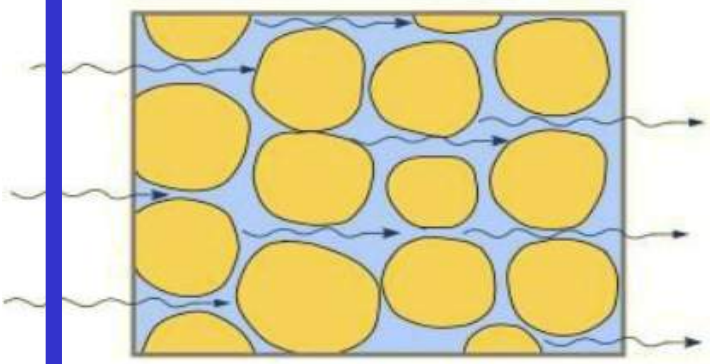
TRES SIMPLIFIE
Notions de Perméabilité (Gaz)

Schiste (*shale*)



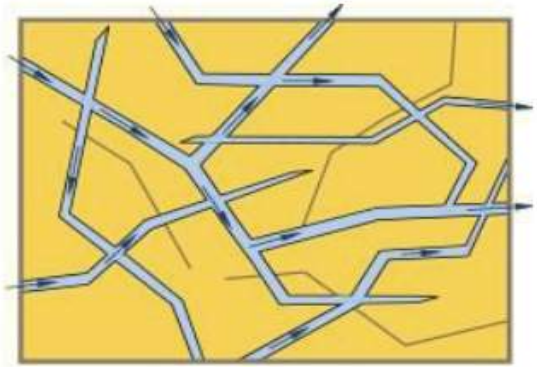
Peu poreux et
peu perméable

Grès



Perméabilité
interparticulaire

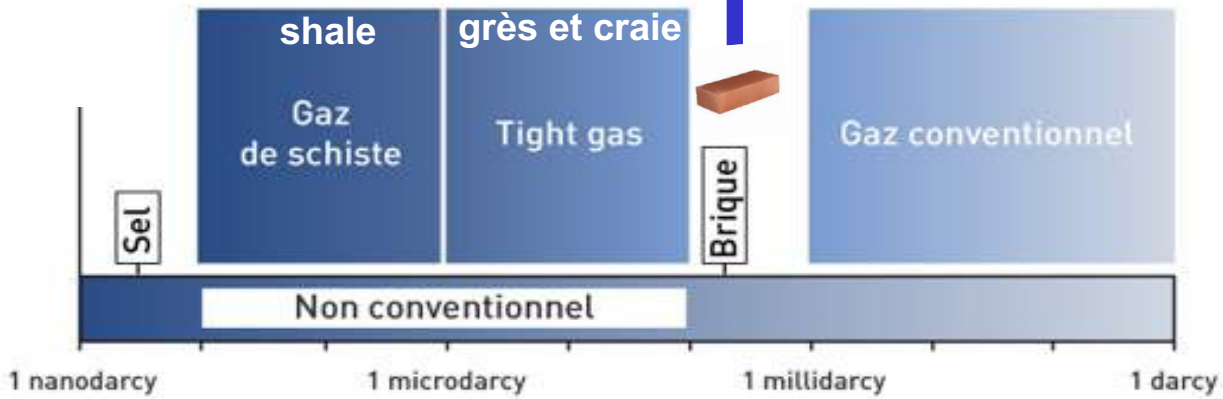
Calcaire



Perméabilité
de fractures

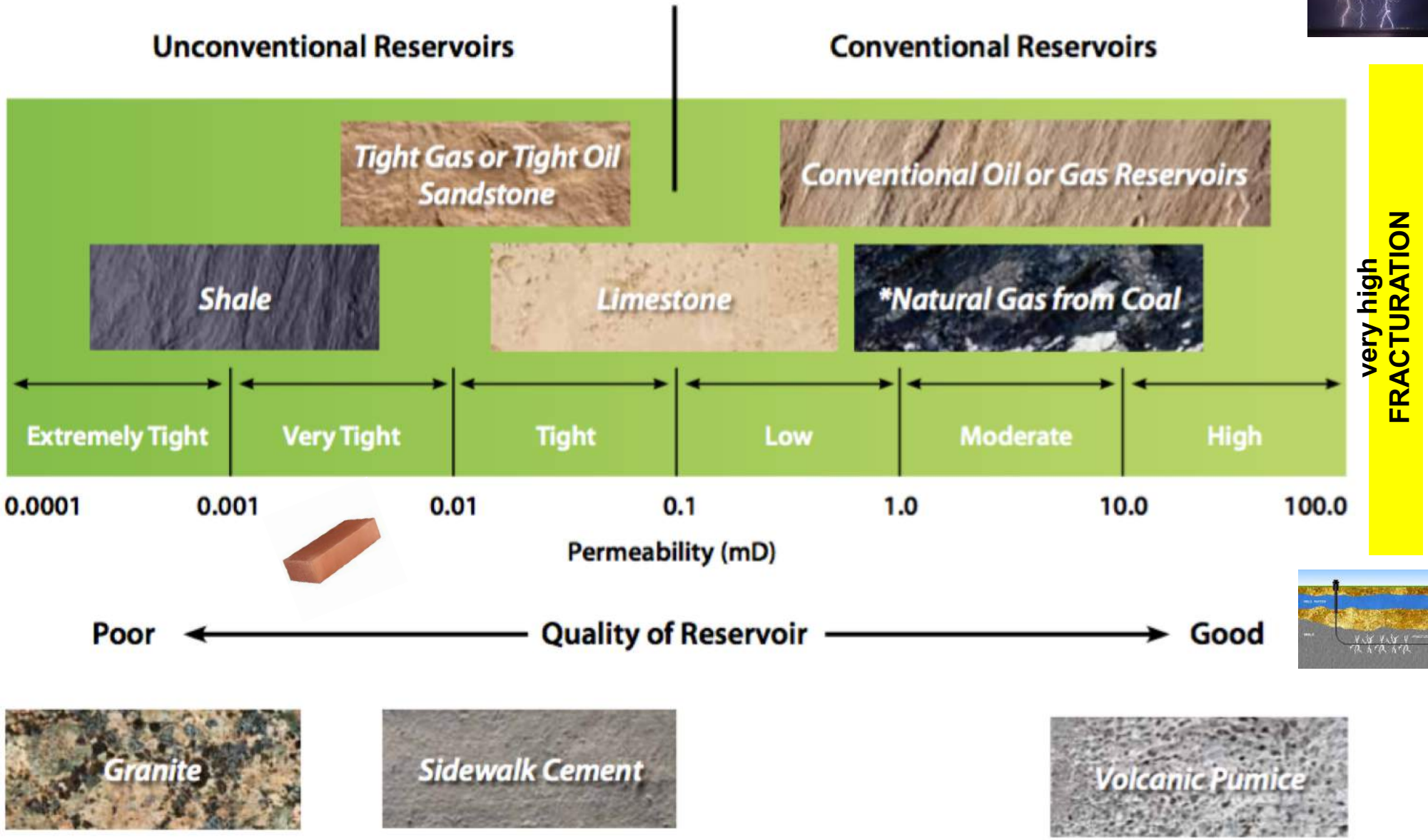
R E S E R V O I R S c

GISEMENTS nc



A. Préat-ULB cepulb 30 janvier 2018

OIL and GAS

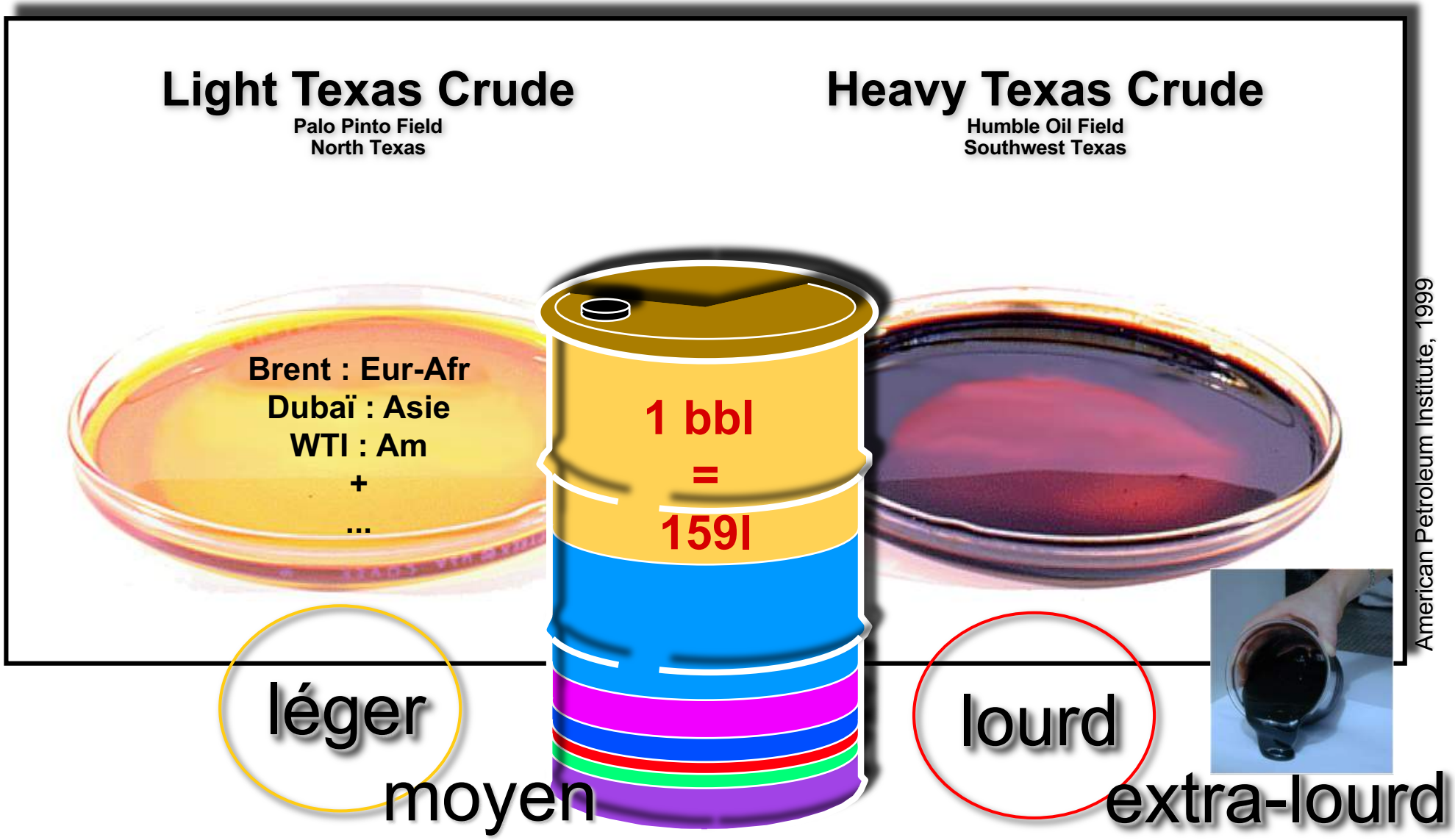


** Natural Gas from Coal reservoirs are classified as unconventional due to type of gas storage*

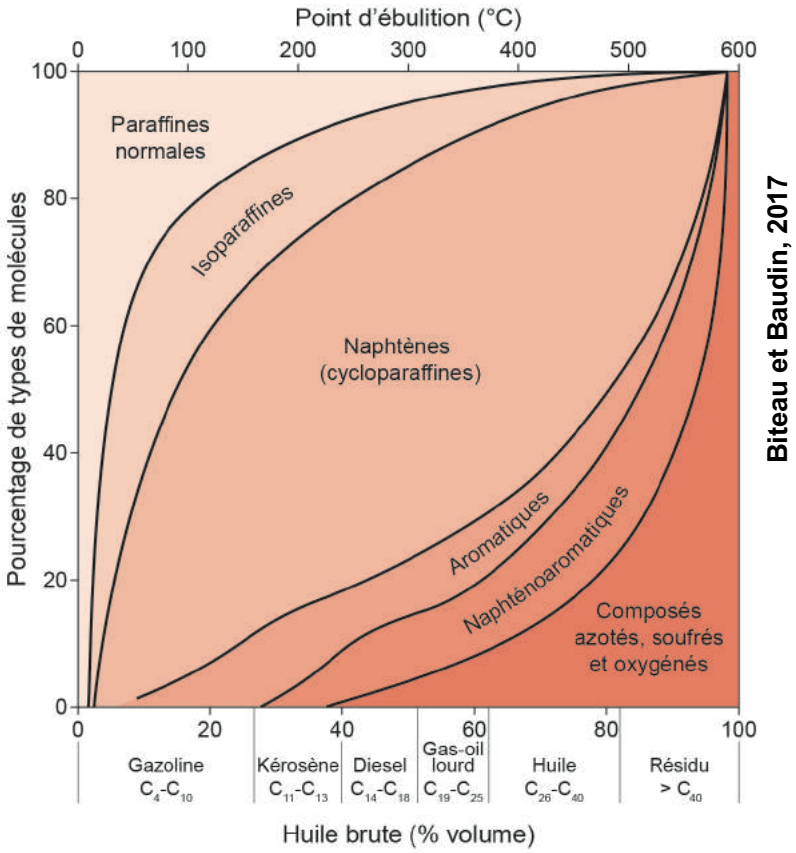
Modified from US Department of Energy

Le Brut - “L’Or Noir”

Le ‘pétrole’ entre en composition majeure dans près de 300 000 produits (pétrochimie = 8%)
Le brut est exploité à partir de plus de 70 000 gisements majeurs d’hydrocarbures



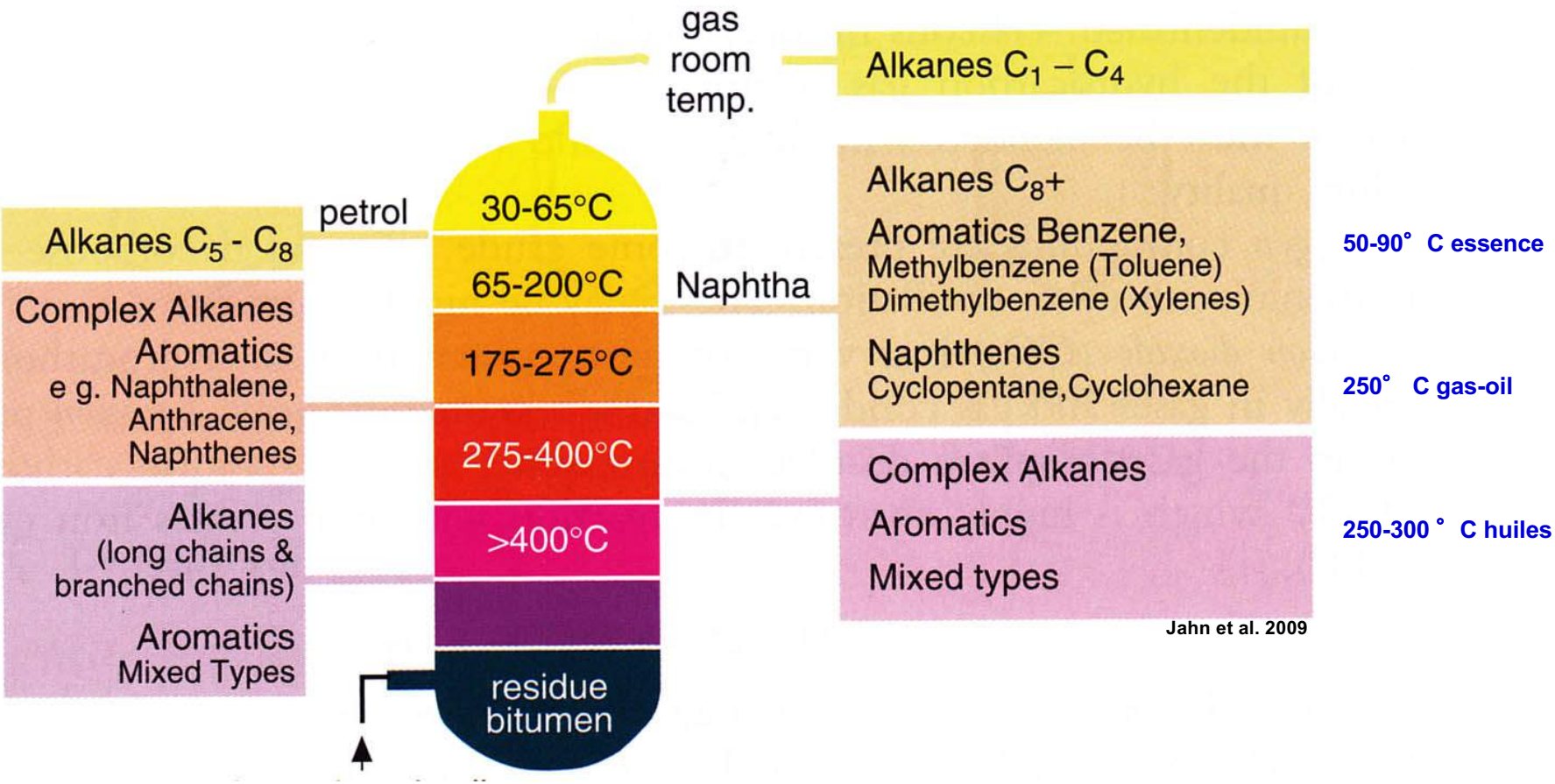
Le brut est un mélange … de centaines de milliers de molécules différentes
DISTILLATION FRACTIONNEE DU BRUT ('CRUDE OIL')



Biteau et Baudin, 2017

DISTILLATION FRACTIONNEE DU BRUT ('CRUDE OIL')

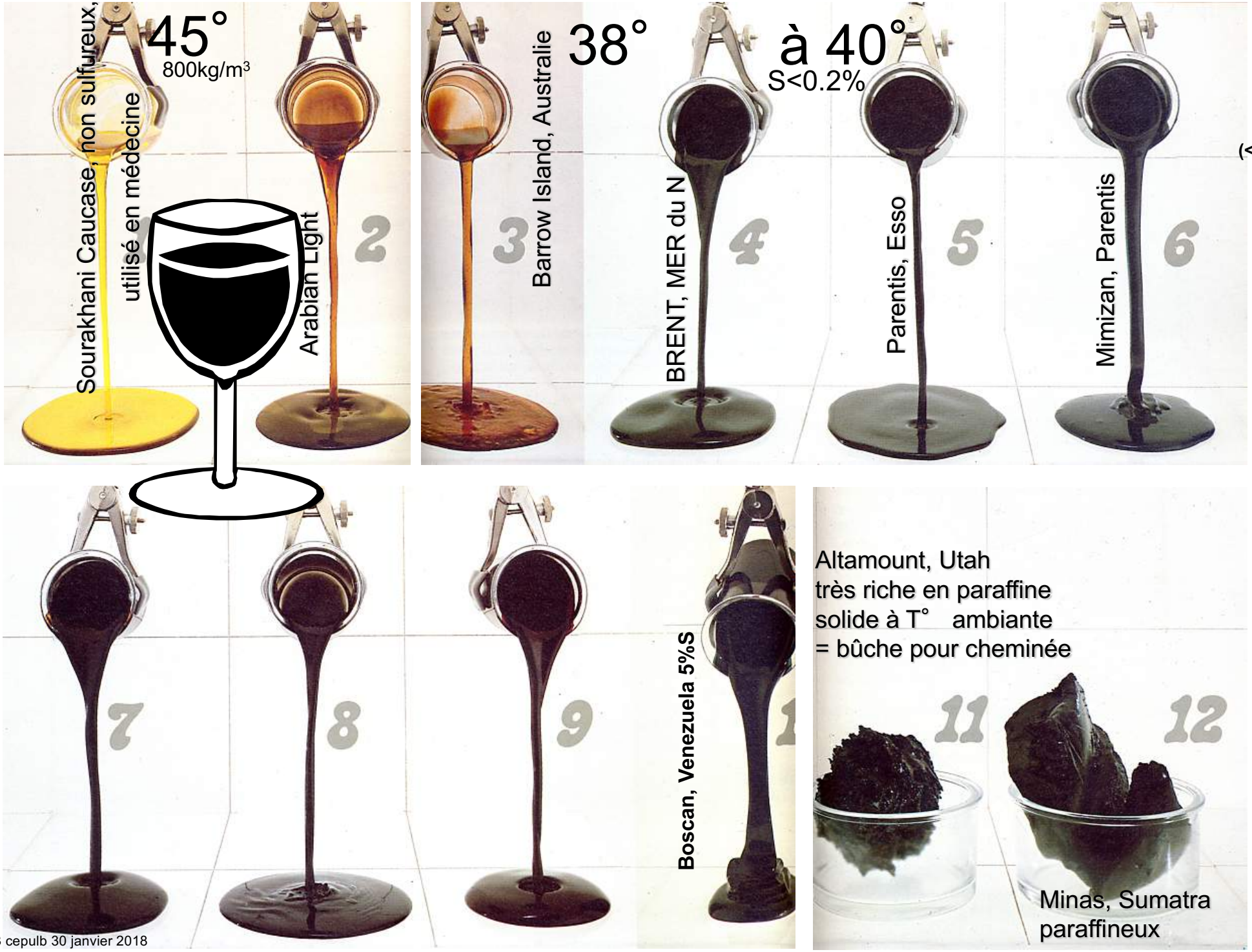
Il y a 18 différentes grandes familles de brut … se ramenant à trois groupes (alcanes, naphtènes, aromatiques)



Jahn et al. 2009

Comme le vin, le pétrole à ses crus… = degré API (densité ou gravité API)
Varie généralement entre 20° (très lourds) et 60° (très légers)

BRUTOTHEQUE EXXON



Sweet (<0.42%S) *vs* Sour

+ SOUFRE

Leygonie et al., 1983

Heavy Oil : a mix of heterogeneous denominations

- Confusing heterogeneous denominations :
  - Heavy Oil, Extra Heavy Oil, Oil Sands, Tar Sands, Bitumen, .
  - → *need for a simple classification*
- 4 Classes based mainly on downhole viscosity :
  - *A Class : Medium Heavy Oil* — *25°> d°API > 18°*
    100 cPo >μ > 10 cPo, mobile at reservoir conditions
  - *B Class : Extra Heavy Oil* — *20°> d°API > 7°*
    10 000 cPo >μ > 100 cPo , mobile at reservoir conditions
  - *C Class : Tar Sands and Bitumen* — *12°> d°API > 7°*
    μ > 10 000 cPo, non mobile at reservoir conditions
  - *D Class : Oil Shales*
    Reservoir = Source Rock, no permeability
    Mining Extraction only

ASPO Annual Meeting 2003 - Ruein 26-27 May 2003 2

TOTAL

API gravity = (141.5/specific gravity) – 131.5
Light crude : API > 31,1° , i.e. specific gravity 's.g.) < 0.87
Medium crude : API 22.3-31.1° , s.g. 0.87-0.92
Heavy crude : API < 22.3, s.g.>0.92, viscosity > 10 cP
Heavy oil : see diagram
Extra-heavy oil : see diagram, (s.g. >1 => >pure water)
Natural bitumen : see diagram, (s.g. >1 => >pure water)

"Heavy Oils" : Resources of 4000 to 5000 Gb (OIP)

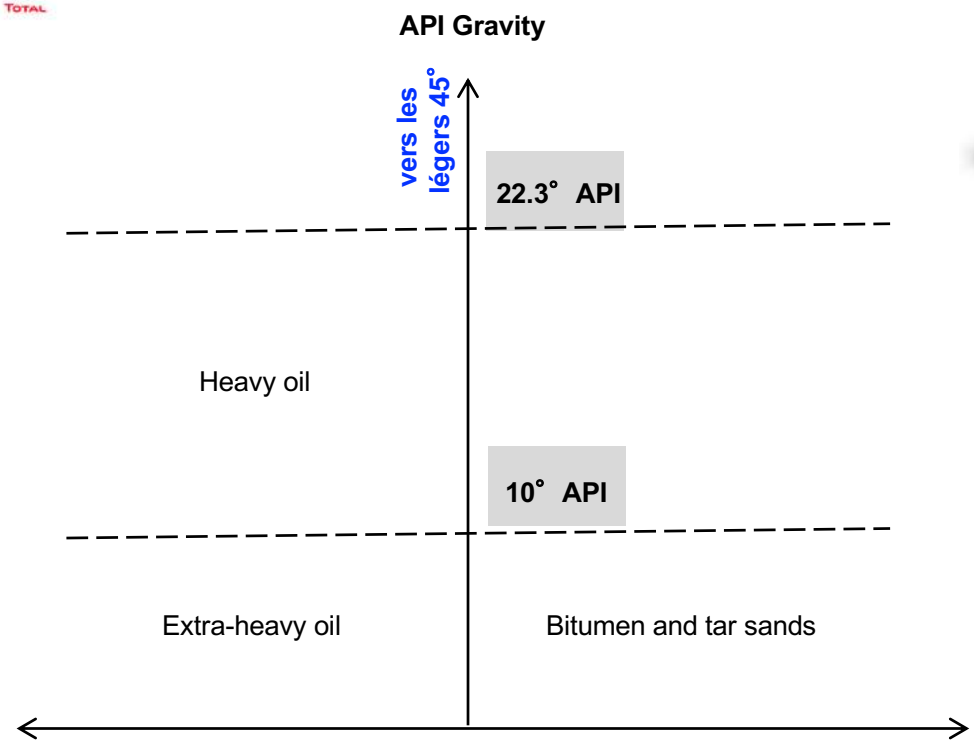
Potential Reserves depends on recovery factors

- Considerable Potential Reserves : # 500 to 1000 Gb
  - equivalent to 50-100% of worldwide conventional oil reserves
  - 5 to 10 times (?) the ultra-deep offshore potential reserves
  - mainly (80%) in extra heavy oil, tar sands and bitumens
  - mainly (80%) in North and South America
  - less than 1% produced or under active development

ASPO Annual Meeting 2003 - Ruein 26-27 May 2003 4

TOTAL

Gilsonite: 99,9% HC, Utah, Colorado, USA point de fusion 150° C Idéal pour 'asphalte'

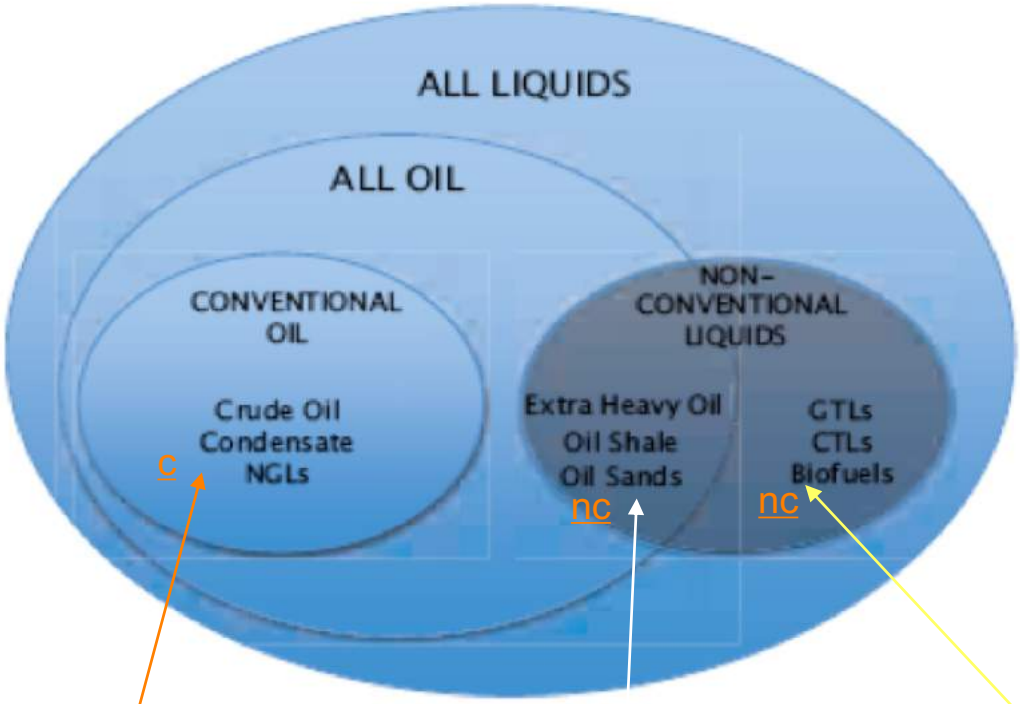


La viscosité de l'eau à 20 ° C est de 1 cPo (centipoise) soit 1 mPa·s.
Nb Gravité 10° API = eau = heavy oil => >10 API 'flotte/floats' et < 10 API 'coule/sinks'

from A.Y. Huc 2011, Am Petr Inst & Canadian Center for Energy

RESSOURCES: 6000 (...) Gb c et 7000 Gb nc

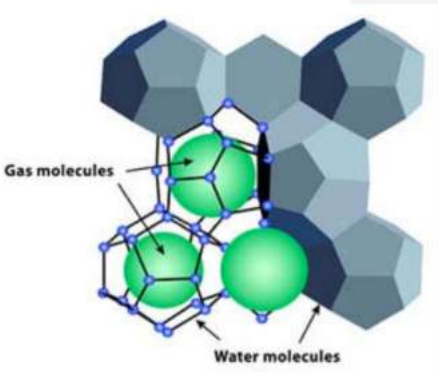
Récupérables, rentables ou non

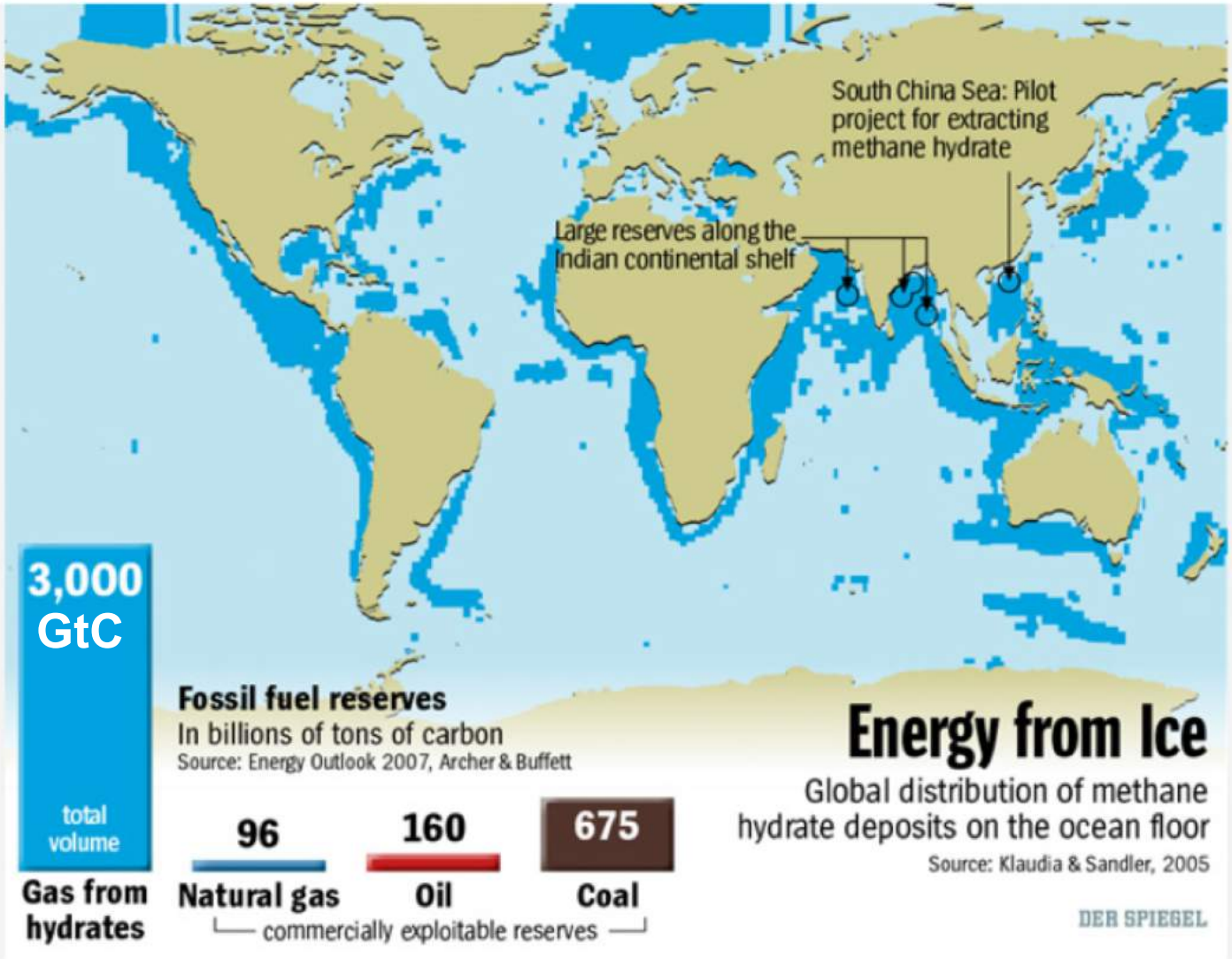


Crude Oil : brut (mélanges HC, $C_{3\ à}\ C_{40}$)
Condensate : huile très légère ($C_{5\text{-}15}$) se condensant à partir de gaz naturels (p,T surface)
NGLs : HC légers liquides associés au brut (éthane, propane, butane, pentane)
S Extra Heavy Oil : brut C_{40} à C_{300} : très visqueux, injection vapeur, ébullition >550° C = 'syncrude'
S Oil/Tar Sands: grès imprégnés d'huile (extra)-lourde ou bitume, 'mining' et ébulliton > 550° C = 'syncrude'
Oil Shales : schistes bitumineux (kérogène), doivent être pyrolisés (>400° C), carrière, mines
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 : carburants synthétiques obtenus par la biomasse (bio-éthanol, bio-diesel)

+hydrates de méthane

Estimation des réserves mondiales des hydrates de méthane





2005

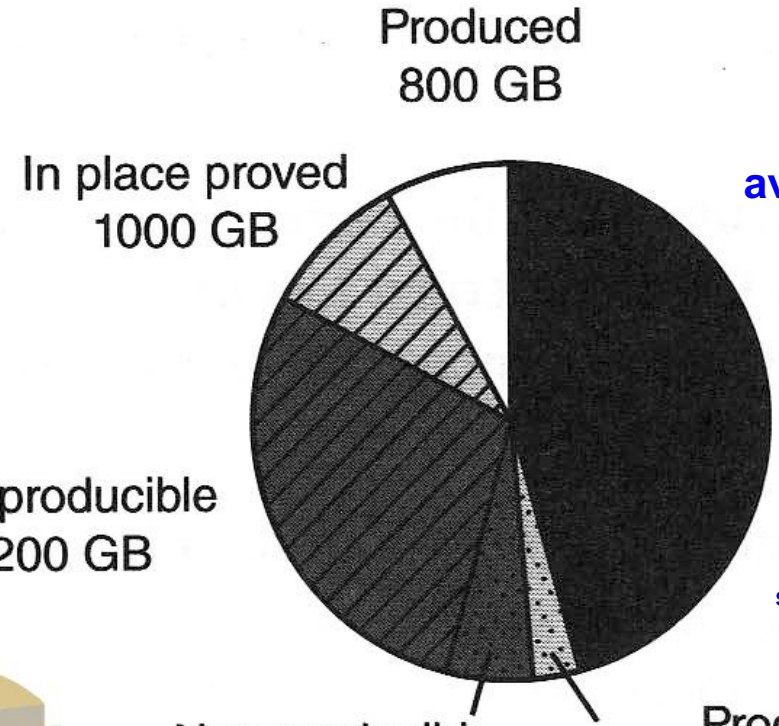
Dégradation microbienne très active jusqu'à 65° C, active jusqu'à 80° C (1500-3000m)

●---------->

> 90° C = 'champs stérilisés'

±6000 Gb
avec oil to find
AIE 2015

Identified oil in place 5000 GB



Oil to find 800 GB

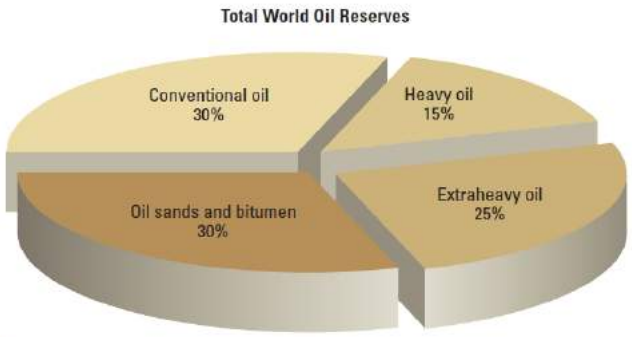
±7000 Gb (ou plus?)
avec schistes bitumineux

Identified heavy oil in place 5000 GB

IFPEN in Huc 2013

seul 1% extrait (2013)
sur 700 Gb récupérables (2013)

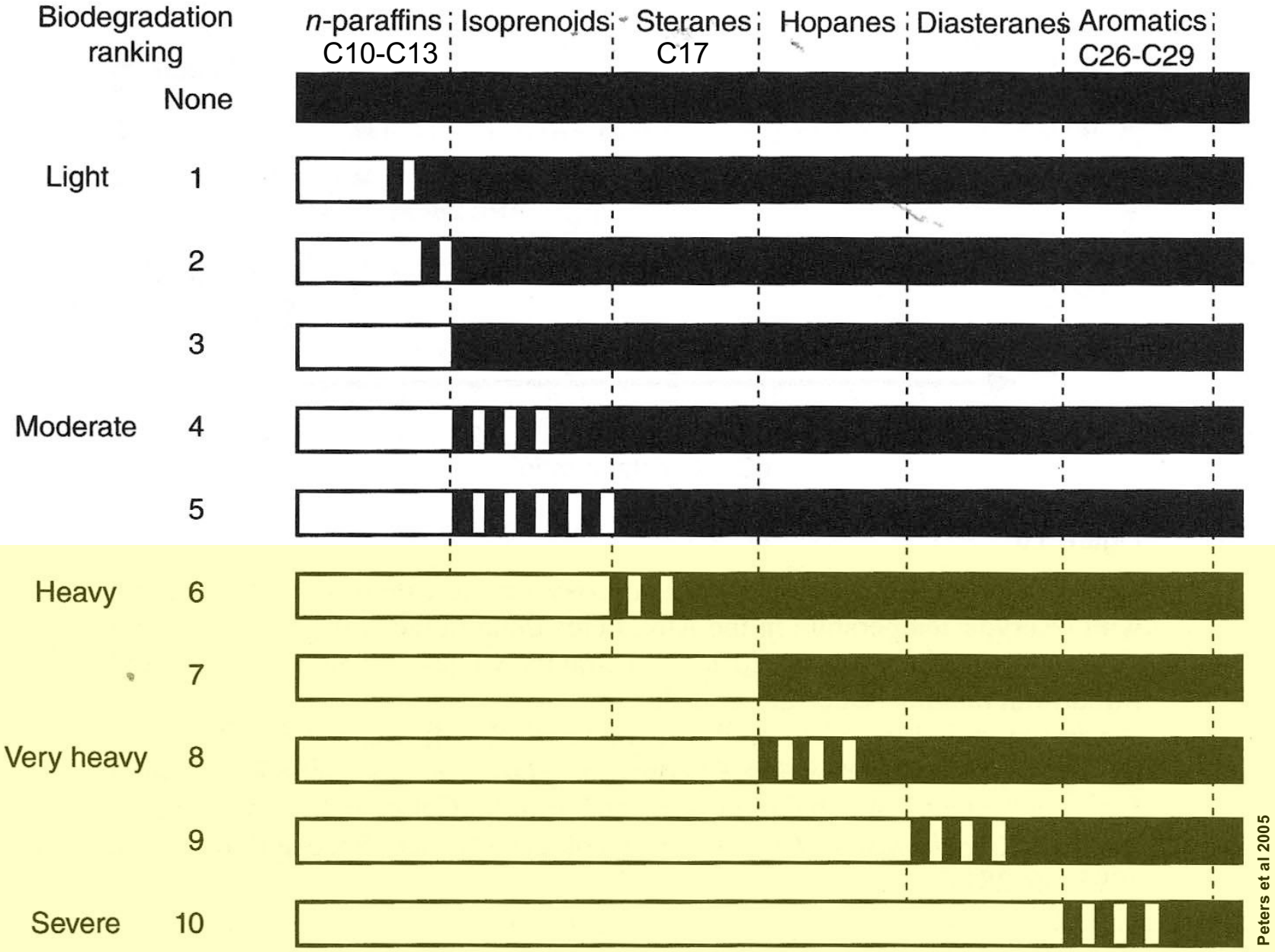
> 50%
=
Canada
Venezuela



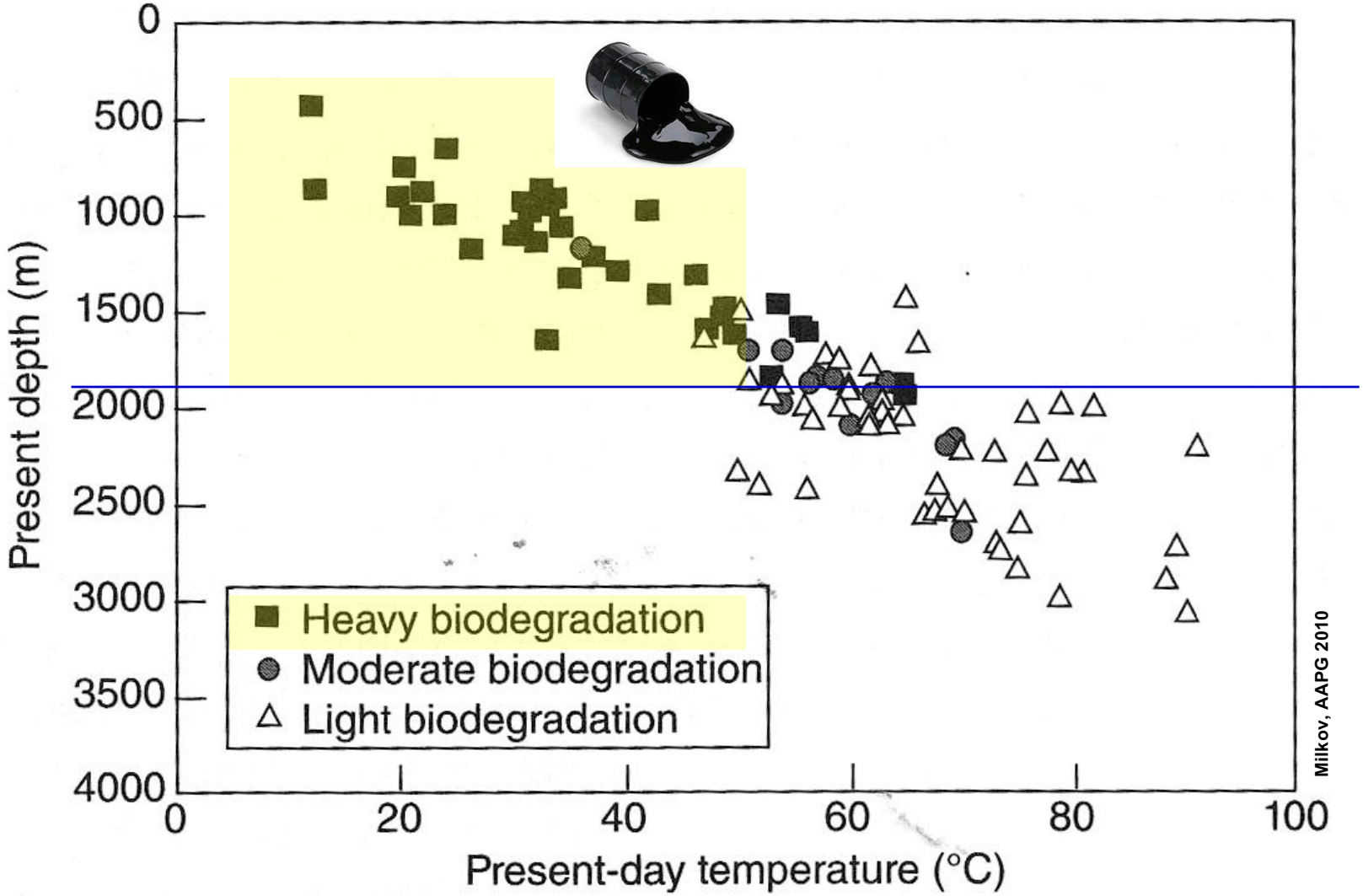
^ Total world oil reserves. Heavy oil, extraheavy oil and bitumen, make up about 70% of the world's total oil resources of 9 to 13 trillion bbl.

http://www.stopaugazdeschiste07.org/rubrique1.html

En 2015, les ressources <u>récupérables</u> de pétrole <u>non-conventionnel</u> sont évaluées par l'AIE à 3300 Gb y compris les sables bitumineux
En 2015, les <u>réserves prouvées</u> (1P) de pétrole conventionnel sont estimées à 1696,7 Gb, **1707,0 Gb** en 2016 (BP) et de 2700 Gb à 3100 (?) Gb <u>récupérables</u> (BP, AIE… 2016)


Biodegradation ranking
n-paraffins C10-C13
Isoprenoids
Steranes C17
Hopanes
Diasteranes
Aromatics C26-C29
None
Light
1
2
3
Moderate
4
5
Heavy
6
7
Very heavy
8
9
Severe
10
Peters et al 2005

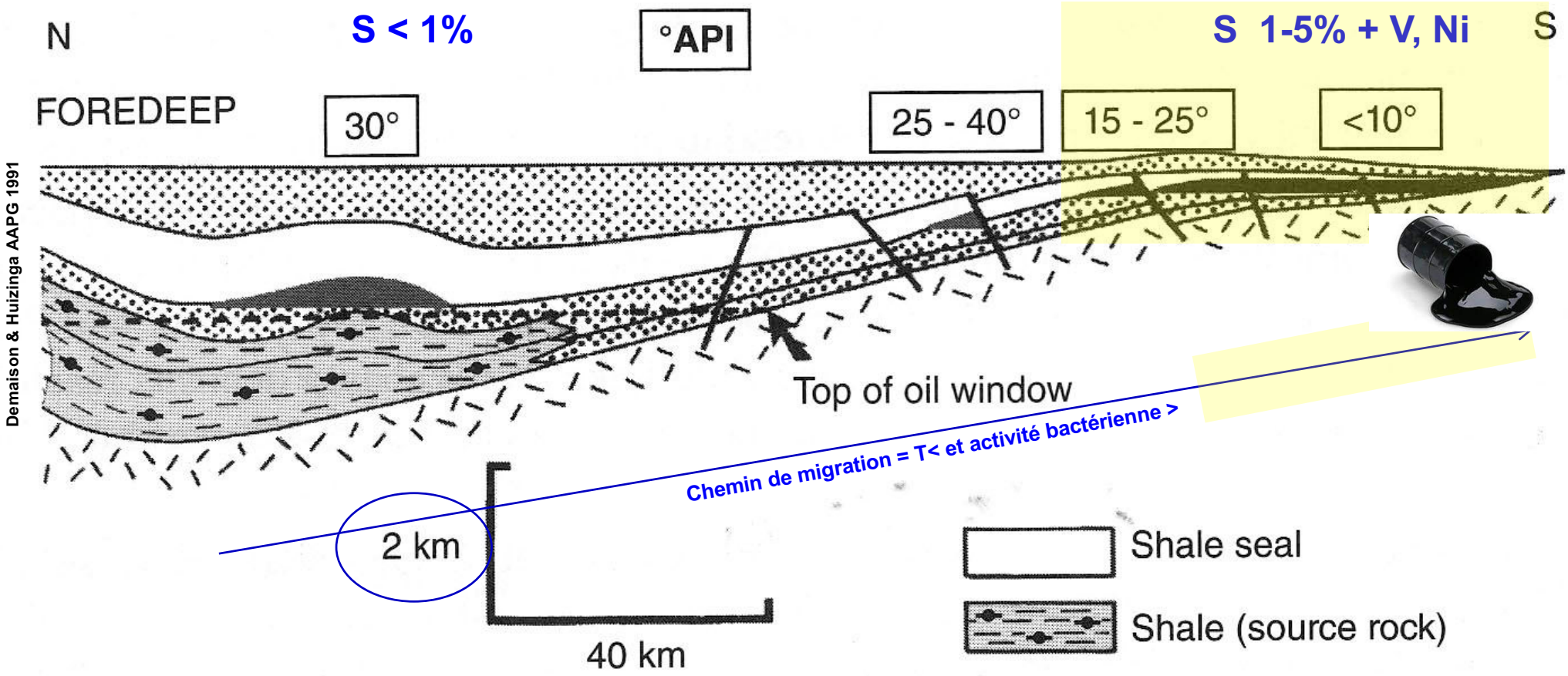
CENOMANIEN, SIBERIE OUEST



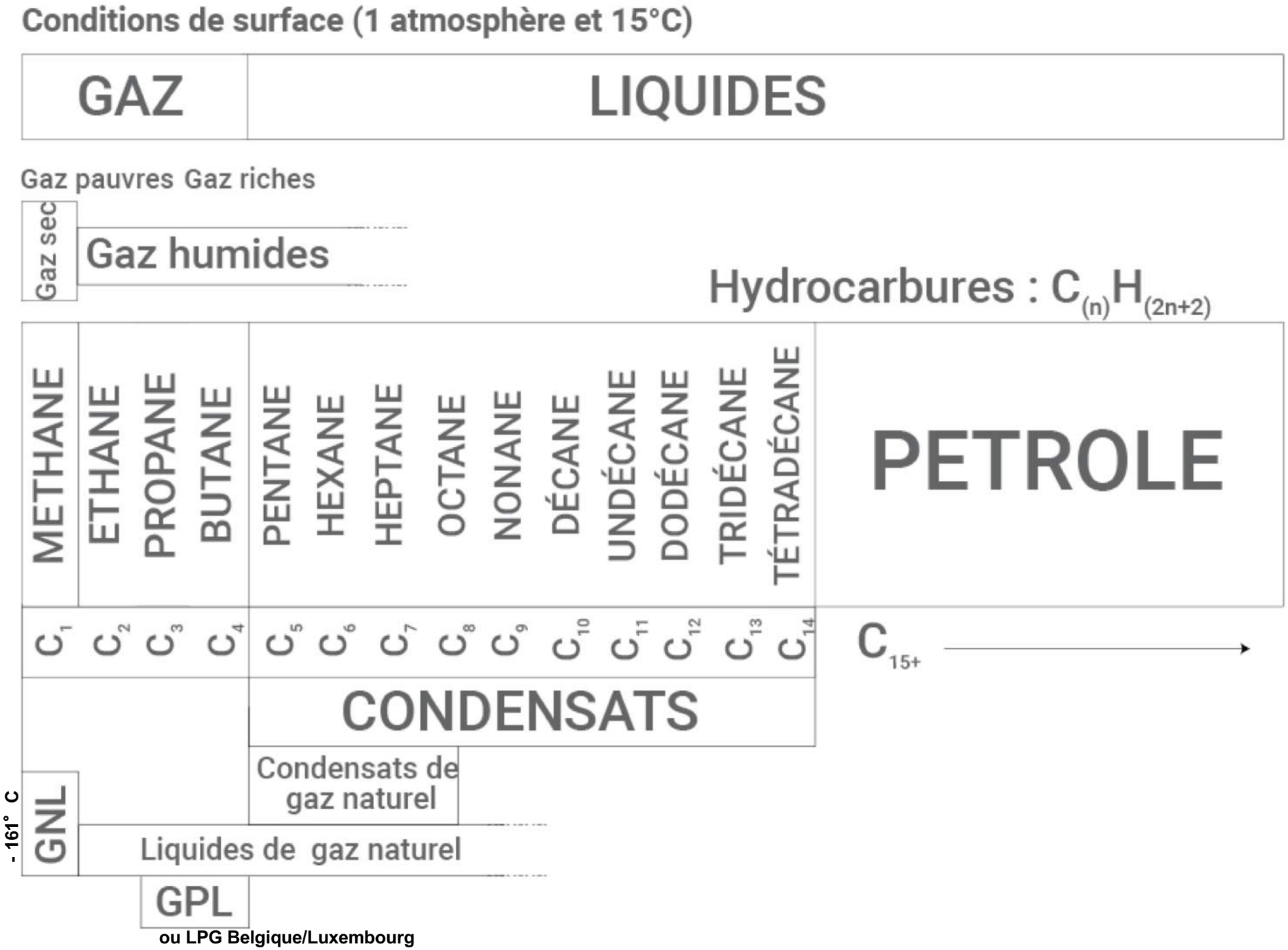
Nb Egalement à faible profondeur = invasion eaux météoriques avec dissolution minéraux (roches) et <u>apports nutriments (P, N) et augmentation activité bactérienne</u> avec dégradation HC accrue…

EASTERN VENEZUELA FORELAND BASIN

Bassin Maturin, COLLISION OBLIQUE PLAQUES CARAÏBES ET AMÉRIQUE DU SUD
Upper Cretaceous loaded by the Serrania and Monagas Foreland thrust belts



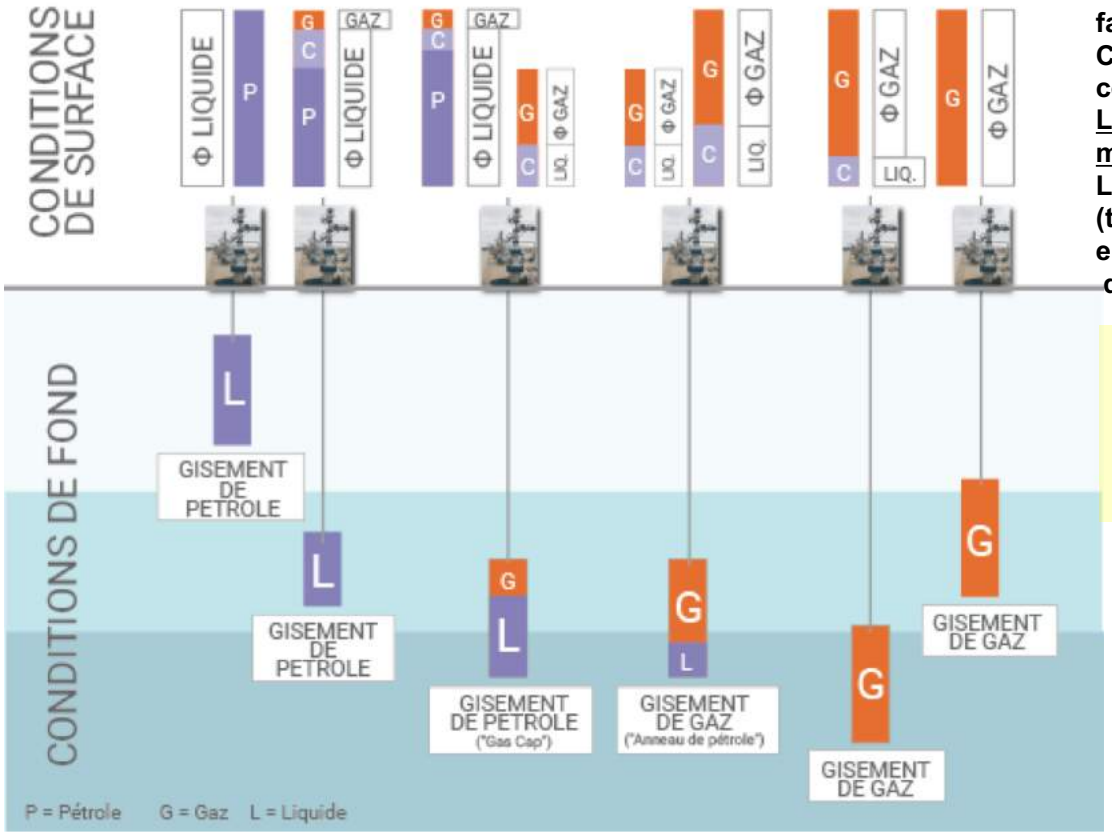
RSce : Crétacé Supérieur (Querecual Fm, in the foredeep)



A. Préat-ULB cepulb 30 janvier 2018

PARTS DES PHASES LIQUIDES ET GAZEUSES DES HYDROCARBURES EN CONDITIONS DE FOND ET DE SURFACE

Oil L => L + G associés
Gas G => G + L condensats



Roland Vially IFP_REN, http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/IFPEN/En-bref

La distinction entre hydrocarbures liquides et gazeux est finalement très compliquée
Historiquement, l'exploitation des hydrocarbures a commencé par celle du pétrole (étymologiquement « l'huile de pierre ») au sens large du terme.
Dans les classifications des hydrocarbures, on a alors distingué cette phase liquide facilement valorisable de la phase gazeuse plus difficilement exploitable.
Cette distinction apparemment évidente basée sur la nature de leur phase, est compliquée dans le cas de fluides complexes comme les hydrocarbures.
La nature de la phase d'un fluide dépend directement de sa composition mais aussi de la pression et de la température que l'on considère.
La figure illustre cette complexité, entre les hydrocarbures en « conditions de fonds » (tels qu'ils se trouvent dans les gisements) et les hydrocarbures que l'on produit en tête de puits aux conditions de surface qui se rapprochent des conditions « standards » (pression d'une atmosphère et température de 15° C).

Ainsi, un gisement de « pétrole » en profondeur soumis à une pression de 300 atmosphères et une température de 110° C va pouvoir relâcher des hydrocarbures gazeux en surface alors que ces mêmes composés étaient dissous dans la phase liquide en profondeur : on parlera alors de « gaz associés ». Un gisement de gaz en profondeur va quant à lui pouvoir fournir en surface des hydrocarbures liquides qualifiés de « condensats ». Ces transformations sont d'autant plus complexes que l'apparition en surface (ou lors de la remontée vers la surface) d'une nouvelle phase va modifier l'équilibre du fluide, entraînant des modifications physiques (augmentation de la densité et de la viscosité) ou chimiques pouvant être responsables de la précipitation de composés lourds comme les résines ou les asphaltènes.
Cette complexité entre les conditions de fond et de surface explique en partie les incertitudes sur les ressources en place (estimation de la part de gaz dans le pétrole ou de la part de liquide dans le gaz une fois ramenés en surface). Les données de production, qui se réfèrent aux conditions de surface, ne devraient en revanche pas être affectées par ces incertitudes.

Le gaz naturel ou gaz de ville: méthane (C1) CH_4

Les liquides de gaz naturels LGN : éthane, propane, butane (C2 à C4)

restent des gaz à T° ambiante, mais sont liquéfiés par cryogénie

butane et propane = GPL (gaz de pétrole liquéfié), ***lease condensates*** = C5 et > C5…= 'gaz associés' aux gisements de pétrole

Les condensats : fraction légère allant du pentane (C_5H_{12}) à l'octane (C_8H_{18})

ils ne sont pas liquides dans les gisements, mais gazeux (effet T) et se condensent lorsqu'ils sont refroidis par la détente à la sortie du puits et sont alors liquides

Le pétrole brut (ou crude), état liquide dans le gisement,

coule librement sous pression au début de l'exploitation d'un puits et par pompage

Les pétroles extra-lourds, très visqueux (heavy crude oil).

produit via des opérations d'ajout d'hydrogène et d'injection de vapeur et/ou de solvants

Les schistes bitumineux (oil shales), roche sédimentaire riche en kérogène (>20%)

engendre de l'huile par distillation thermique (500-600° C), rendement minimum 5%, exploités minière

Les gaz de schiste (shale oil) = roche-mère (g/w) : méthane (C1) CH_4

gaz de roche-mère, perméabilité < brique, nécessite une fracturation (hydraulique)

Les tight oil/tight gas

dans roches compactes (shales/grès), nécessite une fracturation (hydraulique)

Le gaz de houille ou grisou (coal bed methane CBM), pas de fracturation

Les <u>sables</u> bitumineux (tar/oil sands), mélange sable-argile-eau-huile extralourde

=? fraction 'lourde' après dégradation (bactérienne) de pétrole brut, exploitation minière, gdes surfaces à toutes pfdeurs

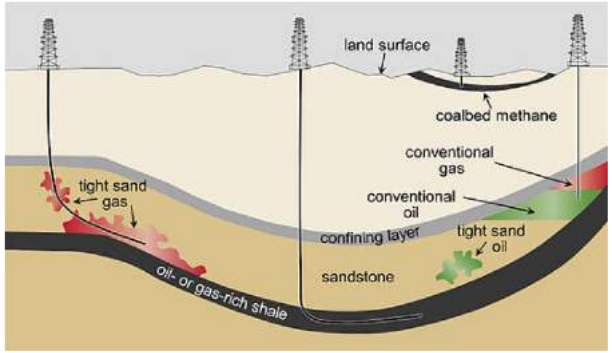
Généralement <1000m <u>car ces bactéries ne survivent pas à plus de 50/55° C</u>

CTL (coal to liquid), liquéfaction du charbon (combustion incomplète, oxydation partielle)

à 1000° C en présence d'eau, on obtient … $CO+2H_2$ se recombinant en méthanol (CH_3OH), ½ pouvoir calorifique essence, également procédé Fischer-Tropsch, catalyse (avec Fe ou Co) du CO et H_2 donnant le syncrude (HC liquide synthétique)

Les tight oil/tight gas

dans roches **compactes** (shales/grès), nécessite une fracturation (hydraulique)



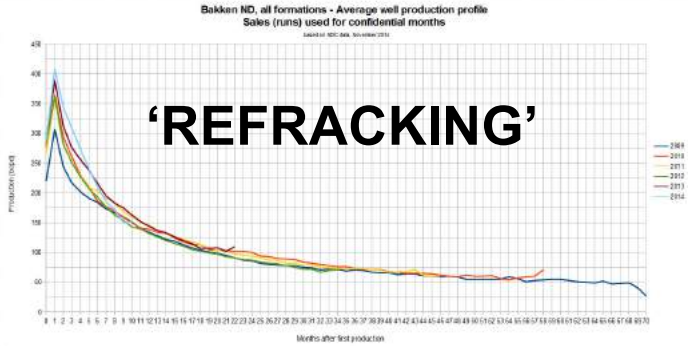
= **LTO, light tight oil ou 'shale oil' ou 'source rock oil'**
ou '**pétrole de schiste**', de roche-mère ou de formations compactes

REBOND SPECTACULAIRE PRODUCTION US DEPUIS 2008
(+1 MB/J DE 2001-2013, puis +1,4 MB/J EN 2014 = augmentation de la production pétrolière **mondiale**
Soit 5,8Mb/j en 2015 [objectif annoncé en 2013: 4,5Mb/j vers 2025!)

Bassin Permien Texas + Eagle Ford (L. Cretaceous Texas)+Bakken (Dev-Cferous, bassin Williston Dakota Nord)

- 'sweet spots' : coût de production 30$/b à > 80 $/b (taux de récupération 2016: 3-5%...);
- récupération cumulée/puits: faible 300 à 500.10^{3}b >< 10 à 30.10^{6}b pour un bon puits en offshore profond:
- mise en production rapide : durée du forage 2 semaines, fracturation 1 sem
- déclin très rapide: 65 à 75%produit au cours des deux premières années ..

⇒ nécessité de forer….



- en 2012, AIE : 35 Gb récupérable soit > réserves brut conventionnel (US)
- en 2015, AIE : ré-évaluation à 88 Gb (pas unanimité…!).
- en 2016 Rystad Energy : il reste encore 50% de découvertes probables (US), soit 264 Gb (?)

- de 2012 à 2016 l'AIE: 250 Gb à 420 Gb = ressources mondiales récupérables (Russie, Argentine, Algérie, Chine?, + Europe (UK, Pologne, Allemagne, Ukraine, France).

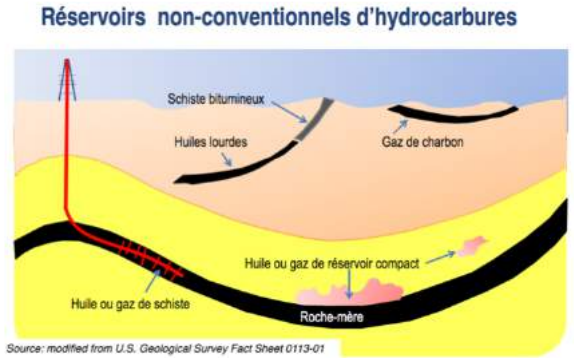
Les pétroles extra-lourds et les sables bitumineux

Densité et viscosité très élevées

- **Venezuela** (Ceinture Orénoque = 'extra-lourd') : 1400 Gb en place, taux de récupération actuel 10%

- **Canada** (Athabasca = sables bitumineux) : 1800 Gb en place, taux de récupération actuel 20% à 30%
  Production *in situ* et production minière par injection de vapeur

- Egalement **Kazakhstan**, **Russie**, **USA**



Les schistes bitumineux (oil shale ou kerogen oil)

Kérogène = Matière Organique Immature

- Nécessite de très fortes consommations d'énergie (de 30 à 40% de l'énergie contenue dans les schistes)
- **USA, Australie, Brésil, Maroc** : aujourd'hui une seule exploitation = Brésil
- 1100 Gb seraient récupérables.

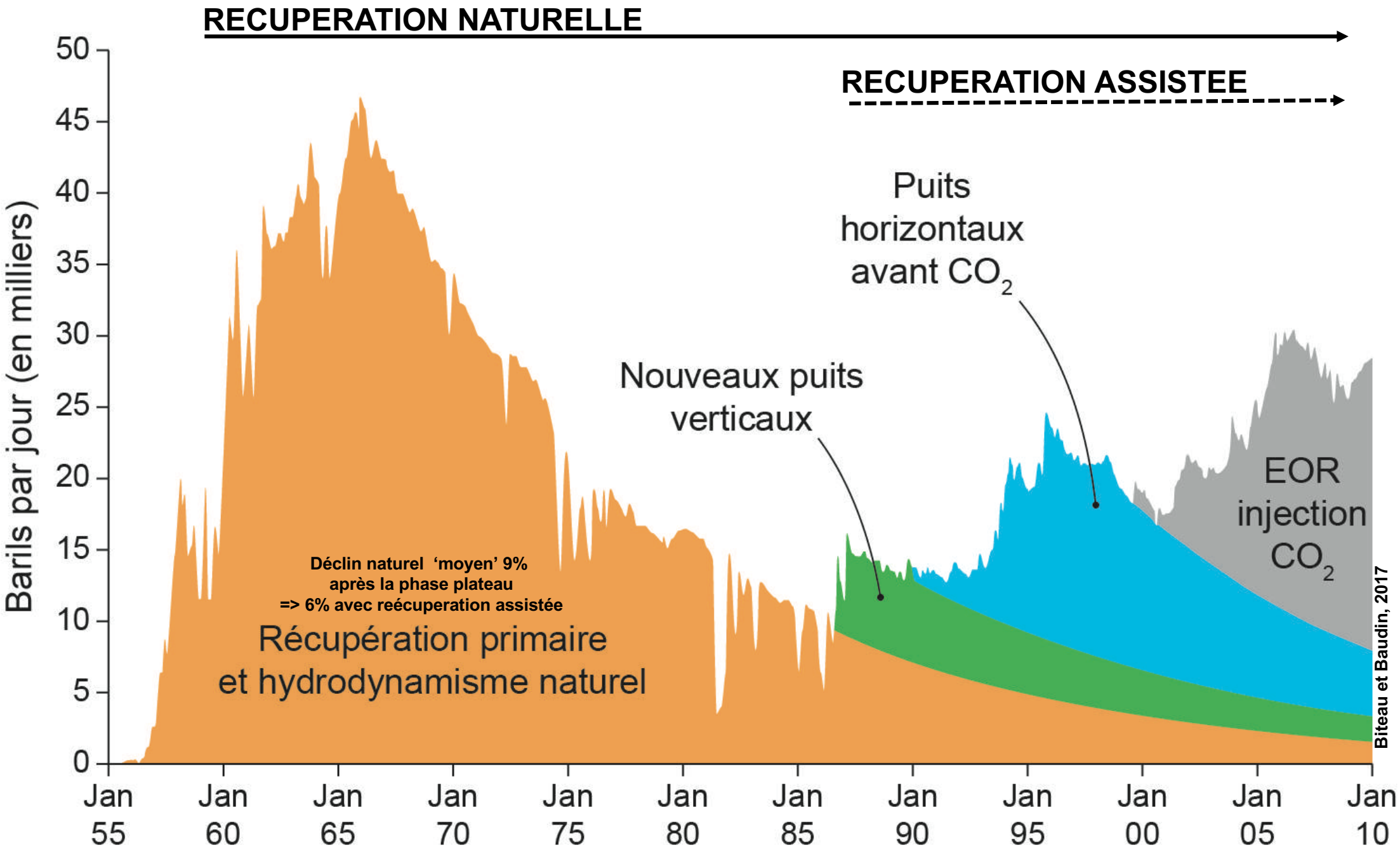
Les pétroles EOR

Enhanced Oil Recovery ou récupération assistée

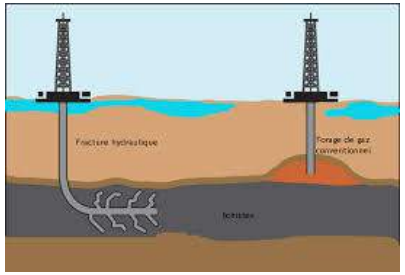
- Récupération primaire, secondaire et tertiaire (8% des gisements en 'tertiaire' et gain de 1,5% seulement)
- L**e taux de récupération moyen mondial est auj estimé à 35%** [5-75‰]
  Si on gagnait 5 à 6% = 1P de l'Arabie Saoudite

Les pétroles de synthèse (XTL) ou hydrocarbures de synthèse

- CTL = Coal to Liquids 2015 rentabilité 50$/b (hors coût émission CO_2), auj: 70 à 80$/b
- GTL = Gas to Liquids auj : rentabilité 60$/b done diesel, essences, kérosène, bases pour lubrifiants


RECUPERATION NATURELLE
RECUPERATION ASSISTEE
Barils par jour (en milliers)
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
Jan 55
Jan 60
Jan 65
Jan 70
Jan 75
Jan 80
Jan 85
Jan 90
Jan 95
Jan 00
Jan 05
Jan 10
Puits horizontaux avant CO_2
Nouveaux puits verticaux
EOR injection CO_2
Déclin naturel 'moyen' 9% après la phase plateau => 6% avec reécuperation assistée
Récupération primaire et hydrodynamisme naturel
Biteau et Baudin, 2017

HYDROCARBURES NON CONVENTIONNELS



Hydrocarbures non conventionnels	Méthodes de production	Recherches & développments
- Sables bitumineux (pétrole) - Schistes bitumineux (pétrole)	Carrières	Réduction de l'empreinte environnementale des techniques d'extraction Empreintes au sol Émissions de gaz à effet de serre (ACV) Cycle de l'eau Nuisances liées à l'activité de production
- Coal-mine méthane (gaz) - Schistes bitumineux (pétrole)	Mines	
- Coalbed méthane (gaz) - Sables bitumineux (pétrole) - Huiles lourdes et extralourdes (pétrole) - Hydrates de méthane (gaz) - Pétrole de schistes (pétrole) - Gaz de schistes (gaz) - Pétrole et gaz de réservoirs compacts (pétrole, gaz)	Forages complexes + Fracturation hydraulique	

Source : IFPEN

EXPLOITATION GAZ DE SCHISTE (Wyoming, USA)

GAZ de SCHISTE = mauvaise traduction de l'anglais 'shale gas'

'Shale' mot anglais, n'a pas de traduction simple en français
un 'shale' est une roche sédimentaire litée à grain très fin, en général argileuse ou marneuse;

'Schiste' *s.l.* (à éviter!) = toute roche susceptible de se débiter en feuillet
⇒ aussi bien un schiste métamorphique (= *schist* en anglais)
⇒ qu'une roche présentant un clivage ardoisier (= *slate* en anglais)
⇒ ou bien une 'pélite' (argile, argillite) feuilletée (= *shale* en anglais);

'Schiste' *s.s.* = roche ayant acquis une schistosité sous l'influence de contraintes tectoniques, processus tectono-métamorphiques.

CONCLUSION: 'gaz de schiste' contenu dans des argiles et marnes litées, SEDIMENTAIRES
= 'GAZ de MARNES' OU 'GAZ DE PELITES'

A. Préat-ULB 2013

LGN **liquide de gaz naturel (C2…C5 /associés)** **> < GNL** **gaz naturel liquéfié (C1-C2)**

NGL **natural gas liquid** **> < LNG** **liquified natural gas**

Les 'LGN' sont classés dans les pétroles c. Ils sont produits à partir du gaz naturel, soit 'un gisement de gaz *ss*, soit de gaz associé à la production de pétrole. Leur production a fortement augmenté ces dernières années => ± 10% de la production pétrolière mondiale, cela devrait continuer dans les 20 à 30 années.

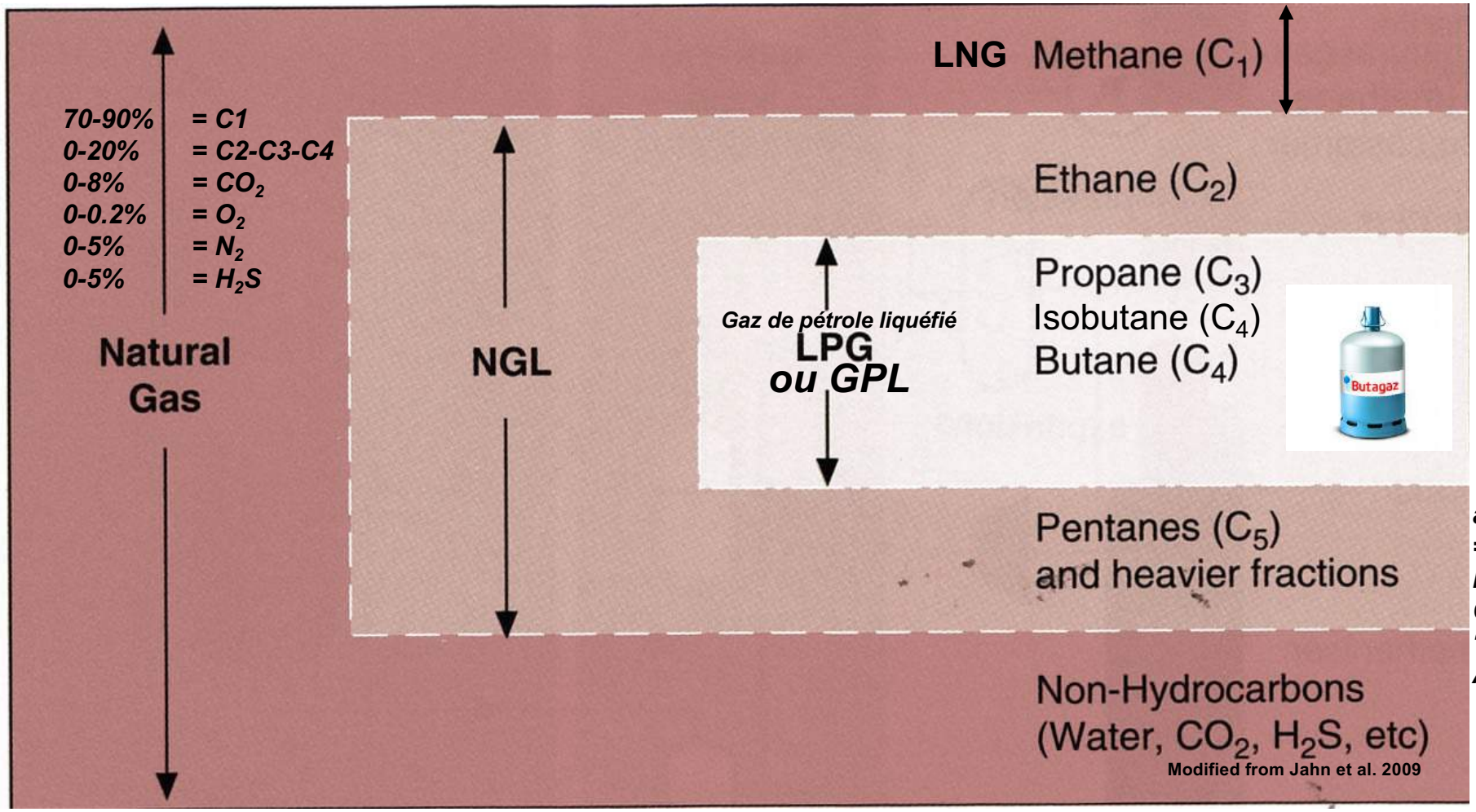
METHANE (C1) <u>is not</u> a NGL (C2-C5+)

(under normal processes, it can not be condensed due to a too low boiling point = -161° C)

Methane = 'LNG' by refrigerated tanker rather than by pipeline (cooled to -161° C , compressed x600)

LPG: liquified petroleum gas in bottled gas … to sell in remote areas

Nb 'LNG' *uk-us* = GNL *fr* = Gaz naturel liquéfié = *Gaz = GPL Gaz de pétrole liquéfié*



at the wellhead
=
Lease Condensates
'Gaz associés'
API gravity 45-75°

LNG –**L**iquified **N**atural **G**as (methane) <u>IS NOT</u> NGL **N**atural **G**as **L**iquids (ethane, propane, butane, pentane**)**

A. Préat-ULB cepulb 30 janvier 2018

Hydrocarbon	Boiling Point	Classification		Grades		Formula
Methane	164–160 °C, -263-256 °F	Gas *si liquéfié = LNG ou GNL*				CH_4
Ethane	-89 °C, -127 °F	Gas or NGL		X		CH_2H_6
Propane	-42 °C, -43 °F	NGL *LPG/GPL*		X	Y	CH_3H_8
IsoButane	-9 °C, 8-16 °F	NGL *LPG/GPL*	Nat Gasoline	X	Y	CH_4H_{10}
Butane	-1 °C, 30-34 °F	NGL *LPG/GPL*	Nat Gasoline	X	Y	CH_4H_{10}
Pentane	36 °C, 97 °F	NGL	Nat Gasoline	X	Y	CH_5H_{12}
Hexane	68-69 °C, 155-156 °F	NGL	Nat Gasoline	X	Y	CH_6H_{14}
Other Heavier (C7+	>70 °C, >157 °F	NGL	Nat Gasoline	X	Y	CH_6H_{14}

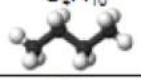
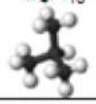
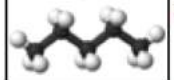
Y : easily condensable

C5-C7 : 'light naphta' or heavier gasoline : 'mélange d'HC <u>légers</u>' = '<u>napata</u>' = '<u>qui flambe</u>'
C5-C12 : naphta NOT ABUNDANT IN NATURAL GAS SOURCED LIQUIDS, MORE IN CRUDE OIL OR AS INTERMEDIATE PRODUCT IN REFINERY
Nb: 'bad' gases (to be eliminated): He, H_2, N_2, H_2S, CO_2, H_2O

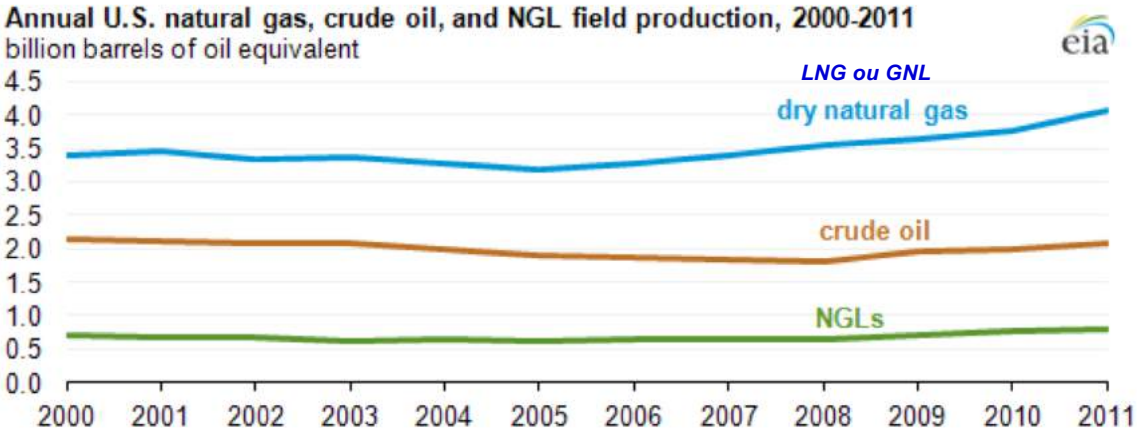
Nb : 6000 cubic feet of gas (at standard conditions) = 1boep

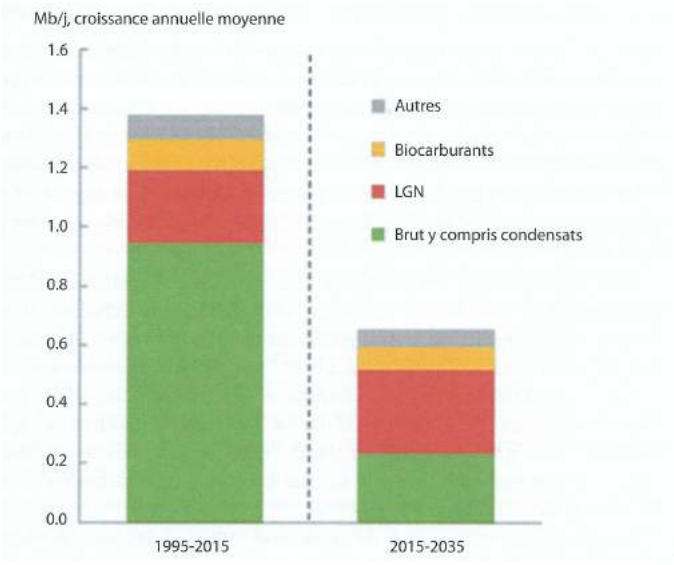
http://www.midstreamenergygroup.com/DisplayBlog.aspx?id=622&blogid=116

NGL Attribute Summary

Natural Gas Liquid	Chemical Formula	Applications	End Use Products	Primary Sectors
Ethane	C_2H_6	Ethylene for plastics production; petrochemical feedstock	Plastic bags; plastics; anti-freeze; detergent	Industrial
Propane	C_3H_8	Residential and commercial heating; cooking fuel; petrochemical feedstock	Home heating; small stoves and barbeques; LPG	Industrial, Residential, Commercial
Butane	C_4H_{10} 	Petrochemical feedstock; blending with propane or gasoline	Synthetic rubber for tires; LPG; lighter fuel	Industrial, Transportation
Isobutane	C_4H_{10} 	Refinery feedstock; petrochemical feedstock	Alkylate for gasoline; aerosols; refrigerant	Industrial
Pentane	C_5H_{12} 	Natural gasoline; blowing agent for polystyrene foam	Gasoline; polystyrene; solvent	Transportation
Pentanes Plus*	Mix of C_5H_{12} and heavier	Blending with vehicle fuel; exported for bitumen production in oil sands	Gasoline; ethanol blends; oil sands production	Transportation

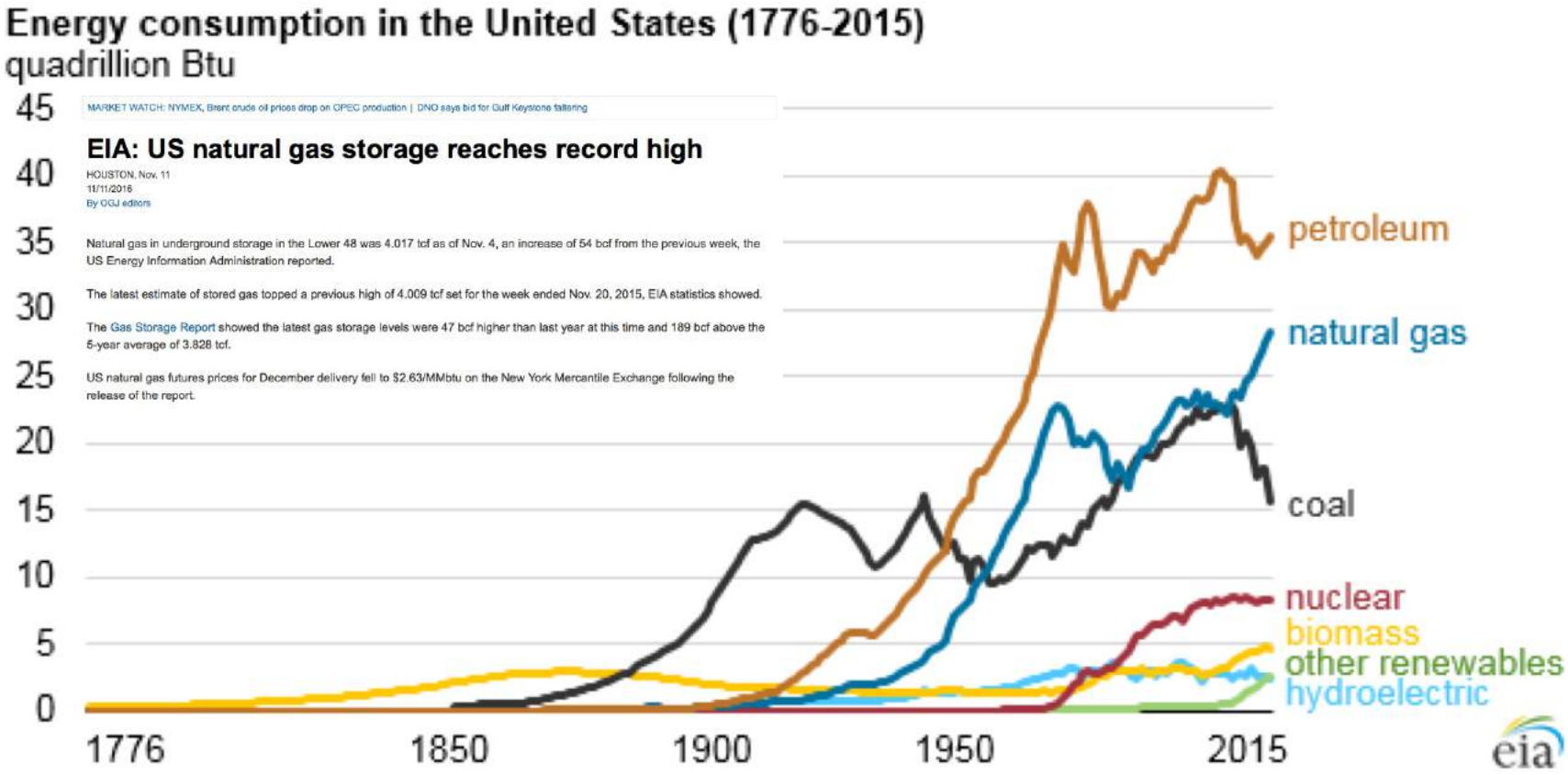
C indicates carbon, H indicates hydrogen; Ethane contains two carbon atoms and six hydrogen atoms
*Pentanes plus is also known as "natural gasoline." Contains pentane and heavier hydrocarbons.





Augmentations des productions de liquides (BP2017)
***in* Babusiaux et Bauquis,2017**

FOSSIL FUELS STILL DOMINATE U.S. ENERGY CONSUMPTION DESPITE RECENT MARKET SHARE DECLINE



MARKET WATCH: NYMEX, Brent crude oil prices drop on OPEC production | DNO says bid for Gulf Keystone faltering

EIA: US natural gas storage reaches record high

HOUSTON, Nov. 11
11/11/2016
By OGJ editors

Natural gas in underground storage in the Lower 48 was 4.017 tcf as of Nov. 4, an increase of 54 bcf from the previous week, the US Energy Information Administration reported.

The latest estimate of stored gas topped a previous high of 4.009 tcf set for the week ended Nov. 20, 2015, EIA statistics showed.

The Gas Storage Report showed the latest gas storage levels were 47 bcf higher than last year at this time and 189 bcf above the 5-year average of 3.828 tcf.

US natural gas futures prices for December delivery fell to $2.63/MMbtu on the New York Mercantile Exchange following the release of the report.

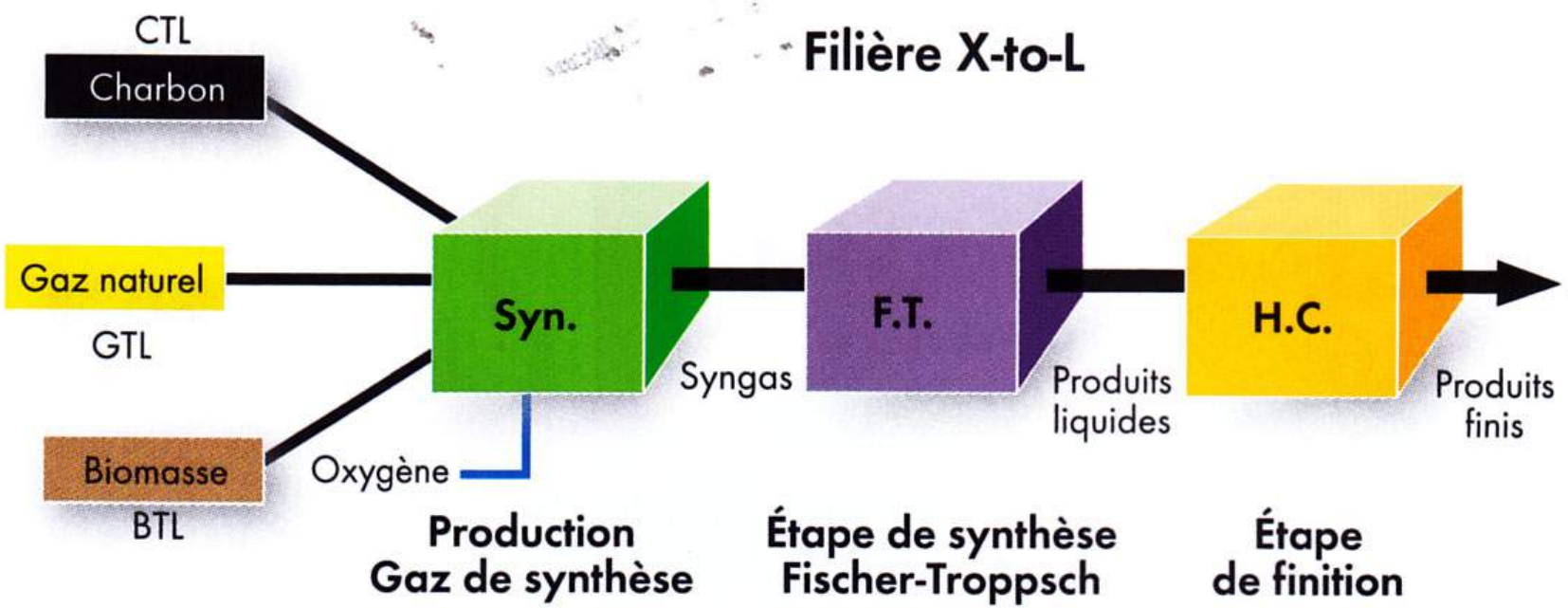
Three fossil fuels—petroleum, natural gas, and coal—have provided more than 80% of total U.S. energy consumption for more than 100 years.
In 2015, fossil fuels made up 81.5% of total U.S. energy consumption, the lowest fossil fuel share in the past century.
Reference case projections, which reflect current loaw and policies, that percentage declines to 76,6 % by 2040.

In 2015, the renewable share of energy consumption in the United States was its largest since the 1930s at nearly 10%. The greatest growth in renewables over the past decade has been in solar and wind electricity generation. Liquid biofuels have also increased in recent years.

The most significant decline in recent years has been coal: U.S. coal consumption fell 13% in 2015, the highest annual percentage decrease of any fossil fuel in the past 50 years. The only similar declines were in 2009 and 2012, when coal fell 12% below the level in the previous year.

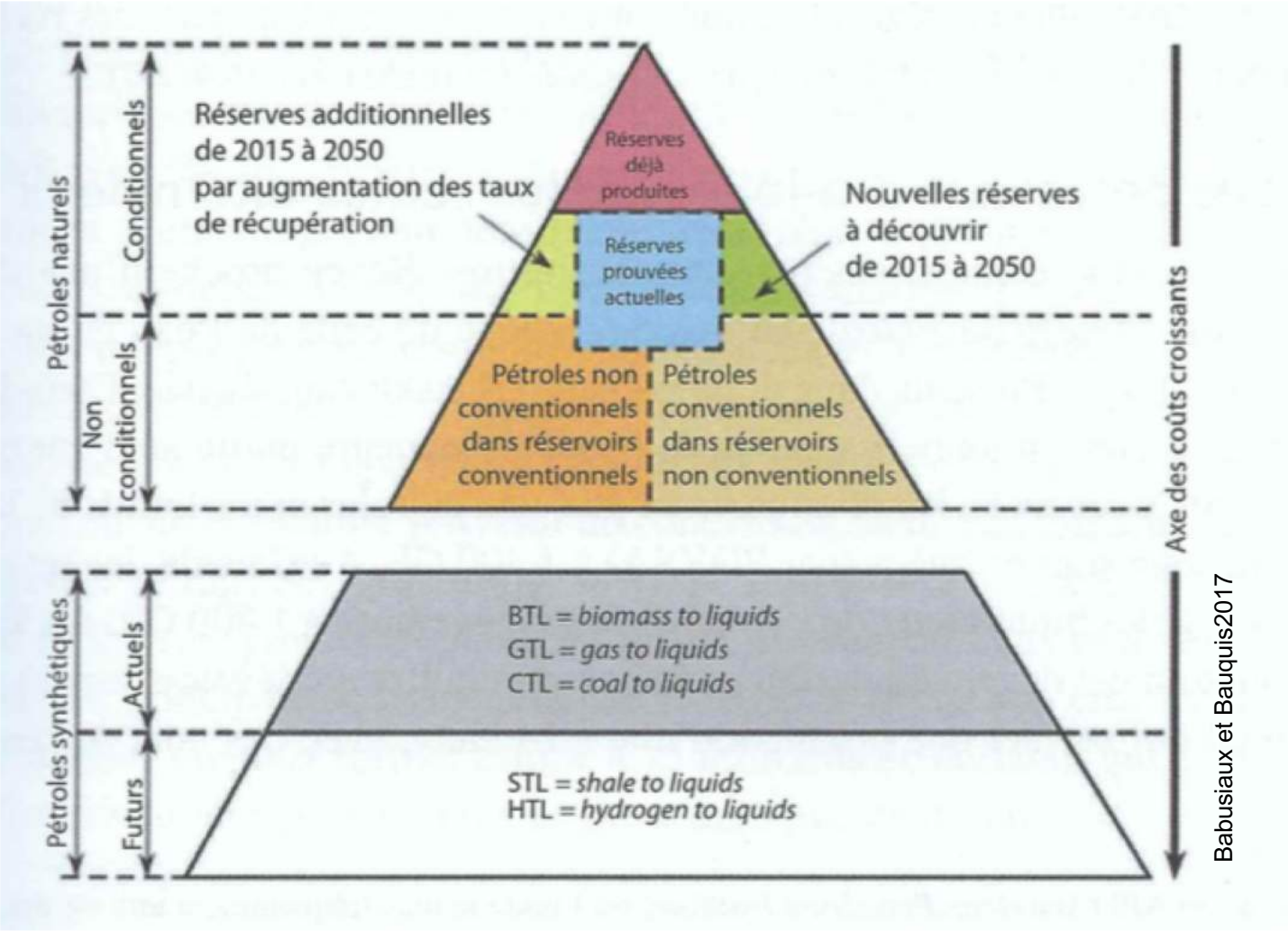
In EIA's Annnual Energy Outlook 2016

LES DIFFÉRENTS TRAJETS DE LA FILIÈRE « X-TO-L »



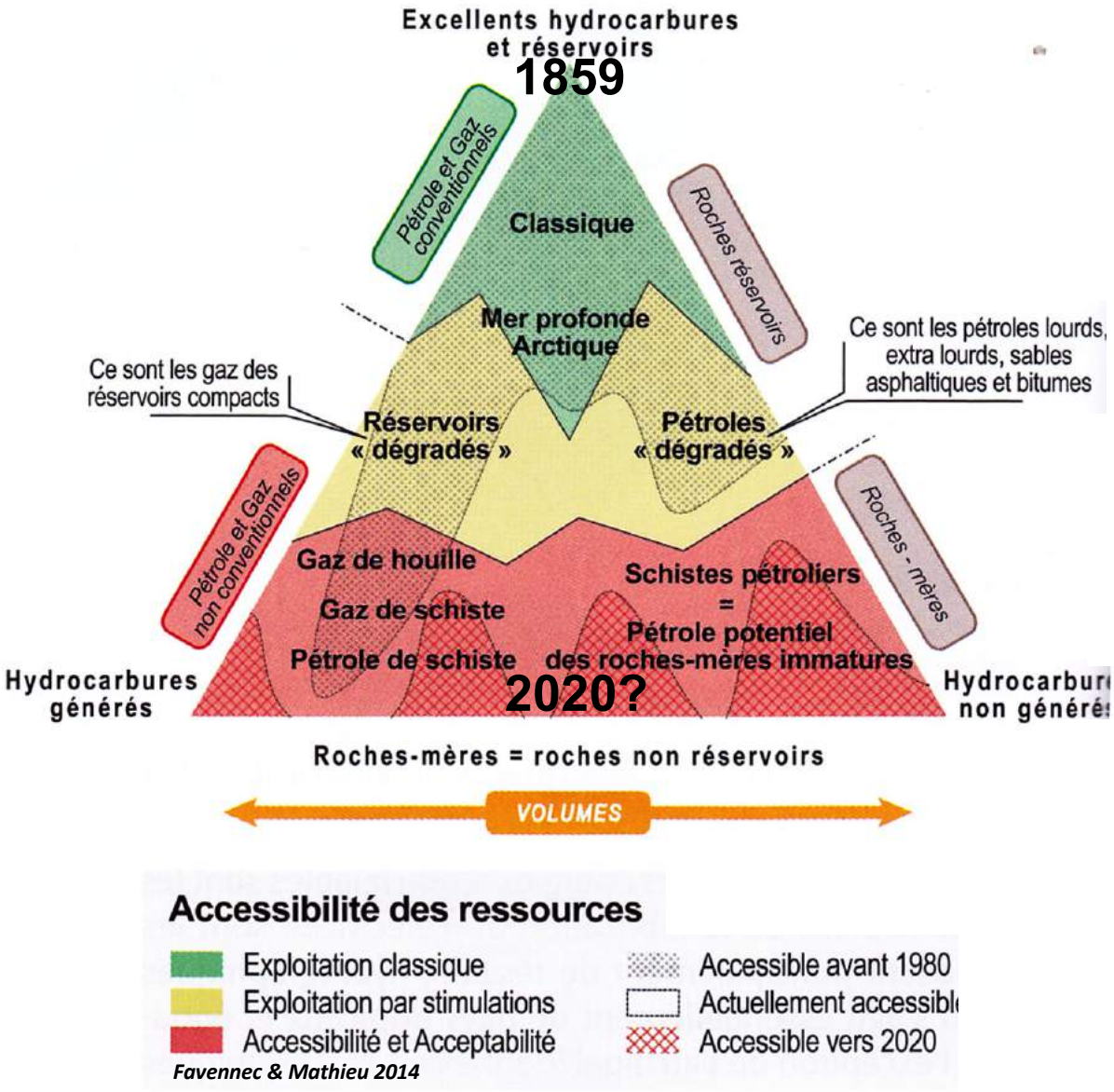
Source : A Rojey IFP 2007.

Les « X-to-L ». Il est possible de fabriquer des carburants liquides (L) en se passant de pétrole, mais alors, bien souvent, il faut y mettre plus d'énergie qu'on n'en récupérera en utilisant ces carburants. On part de charbon (C-to-L), de gaz (G-to-L) ou de biomasse (B-to-L). Tous les « X-to-L » commencent par la fabrication de gaz à l'eau ($CO + H_2$) suivie de synthèses diverses.



+ NOUVEAUX CONCEPTS
Pétroles 'frontières' = régions écologiqement sensibles, zones arctiques, forêts vierges, zones urbaines
+ Marges continentales abruptes (géologie de l'offhore Guyane)
+ Pétroles profondément enfouis (faible gradient géothermique, Golfe Mexique, Brésil)

SITUATION ACTUELLE
2003-2016



Favennec & Mathieu 2014

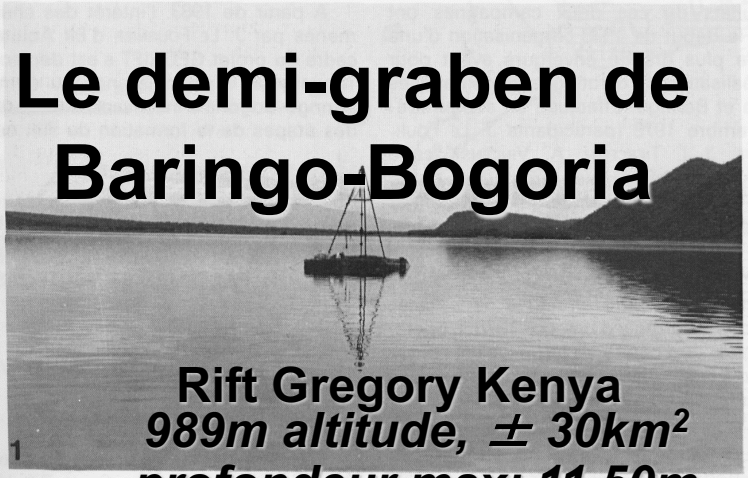
Mais d'où VIENT LE PETROLE?

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

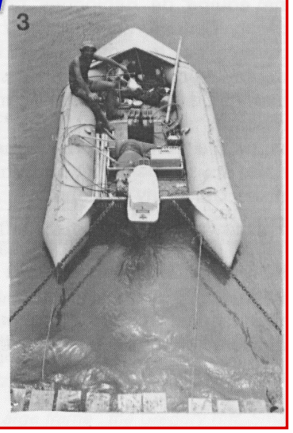


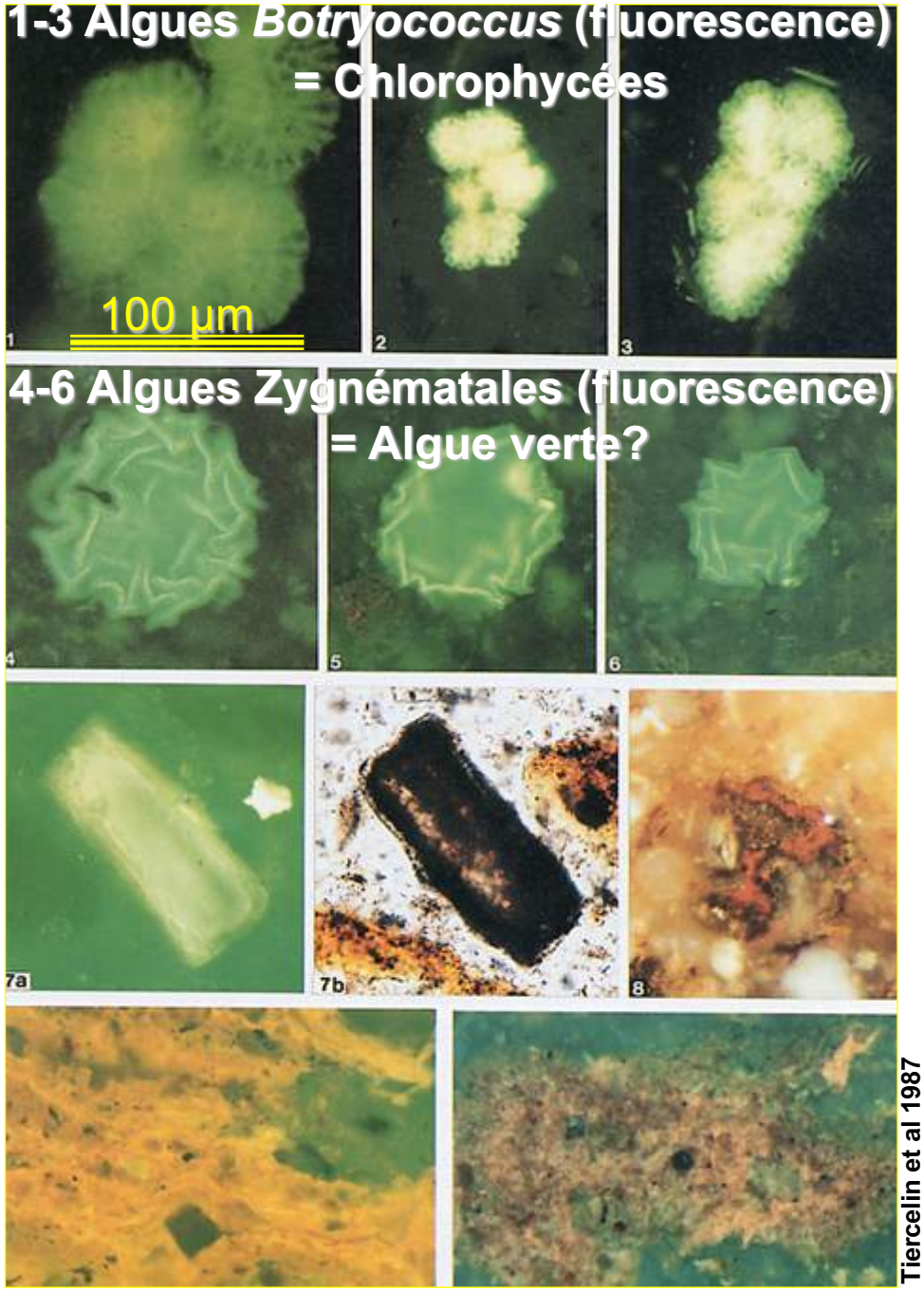
Rift Gregory Kenya
989m altitude, ± 30km²
profondeur max: 11,50m

30 000 d'histoire sédimentaire

Carottages de 0 à 16 m

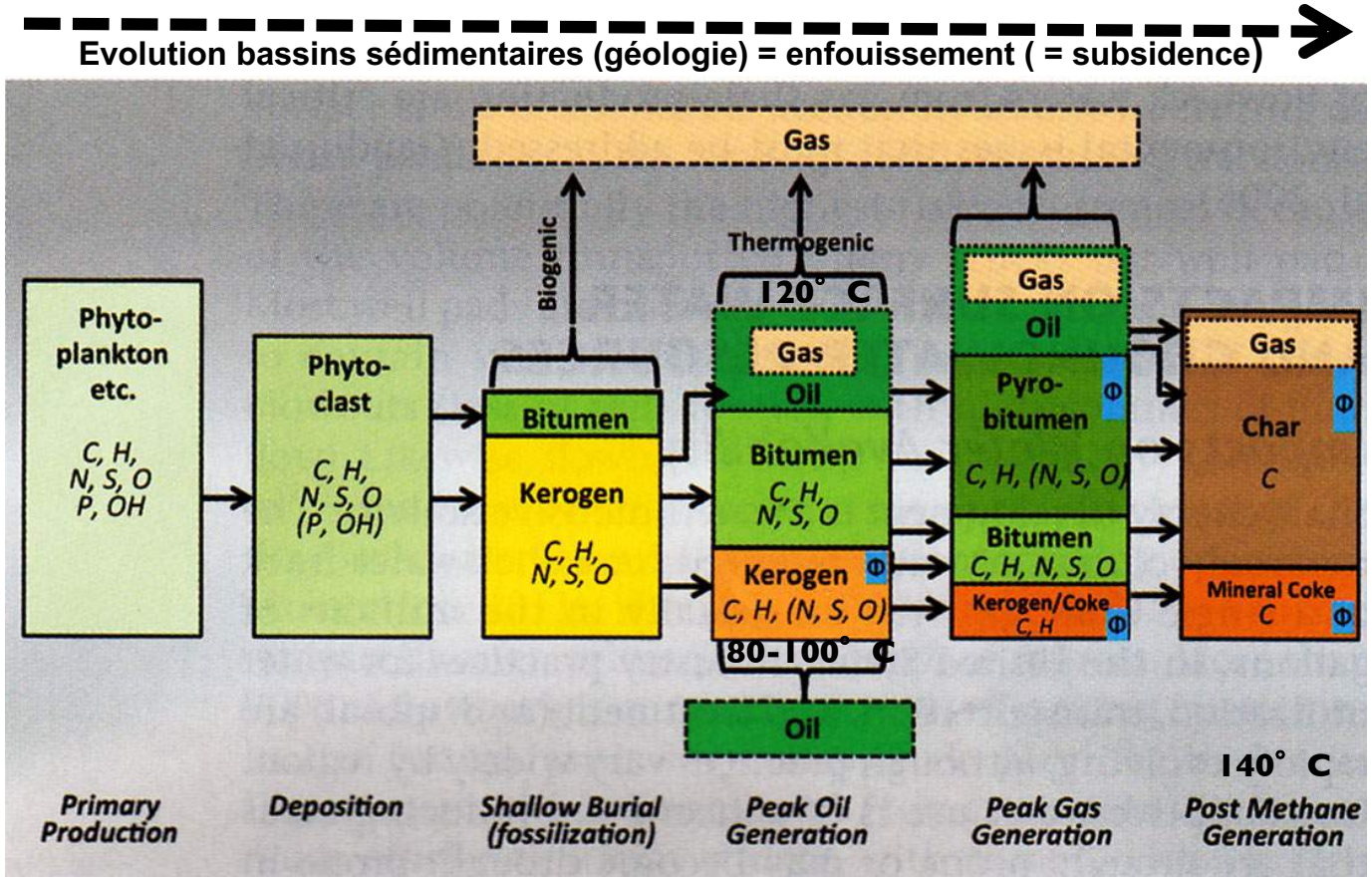
[entamés en 1977…]





Tiercelin et al 1987

MATIERE ORGANIQUE – ROCHE MERE

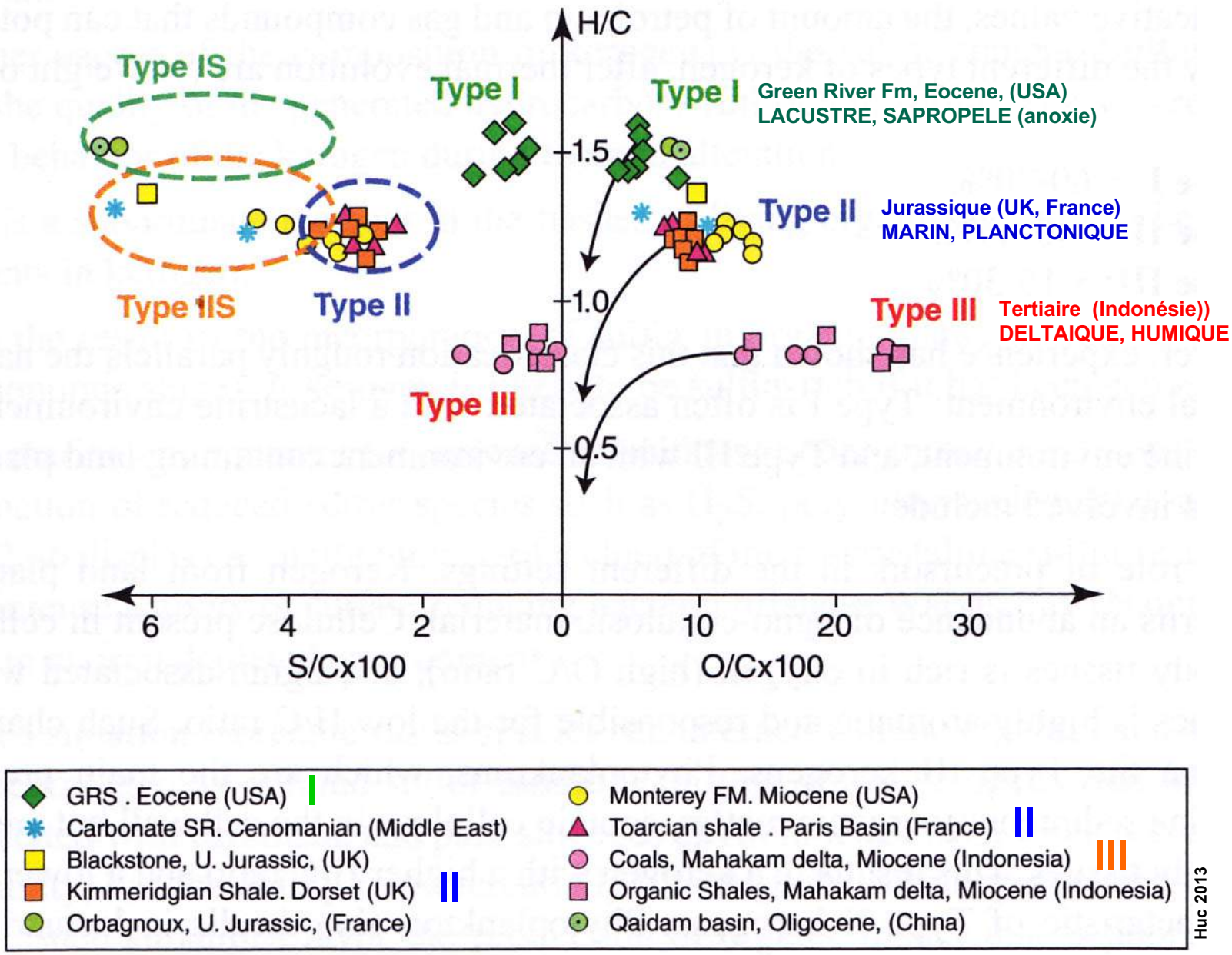


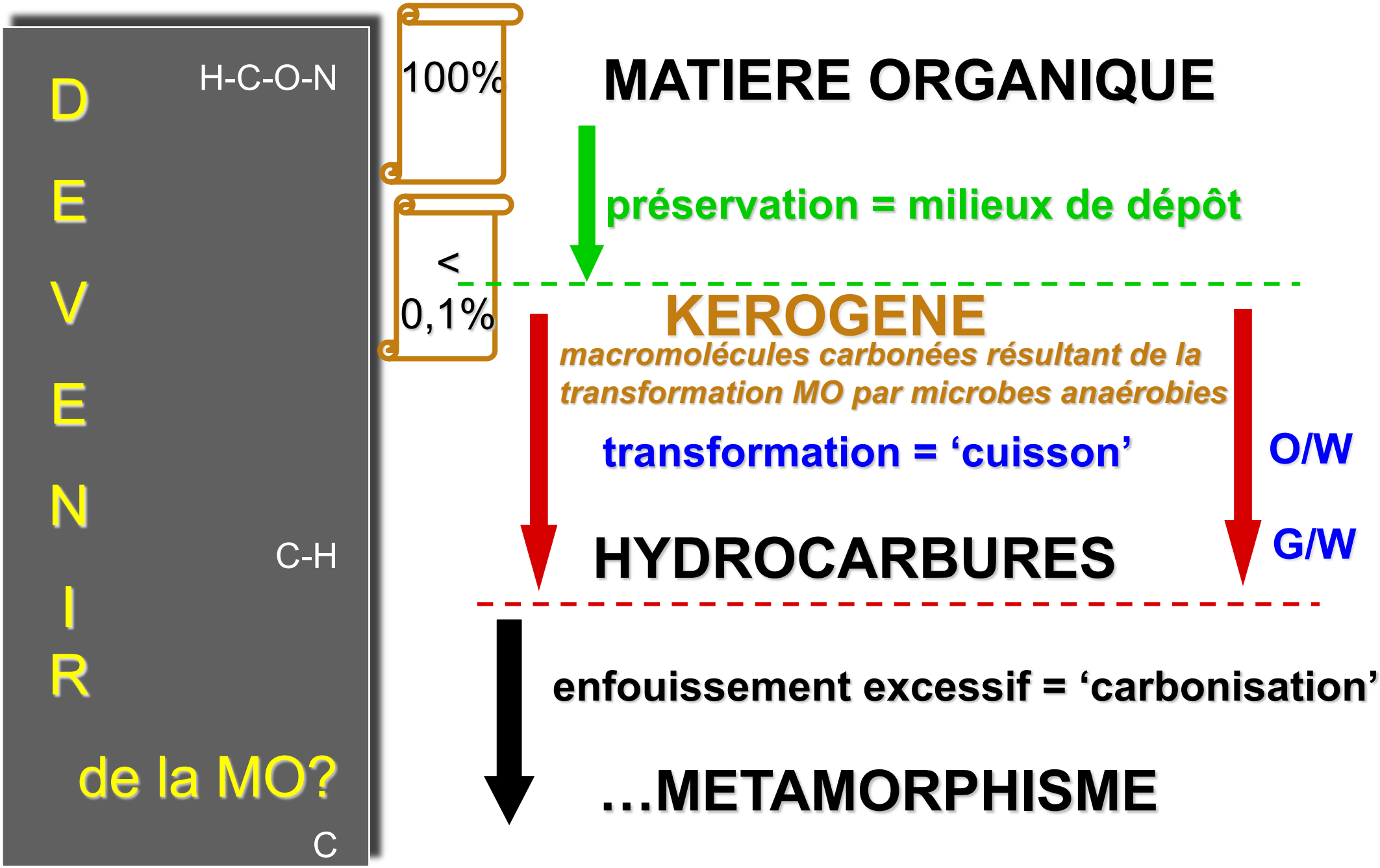
Bohacs et al. 2013

Arhtur & Cole 2014

PHI = porosité (encaissant)

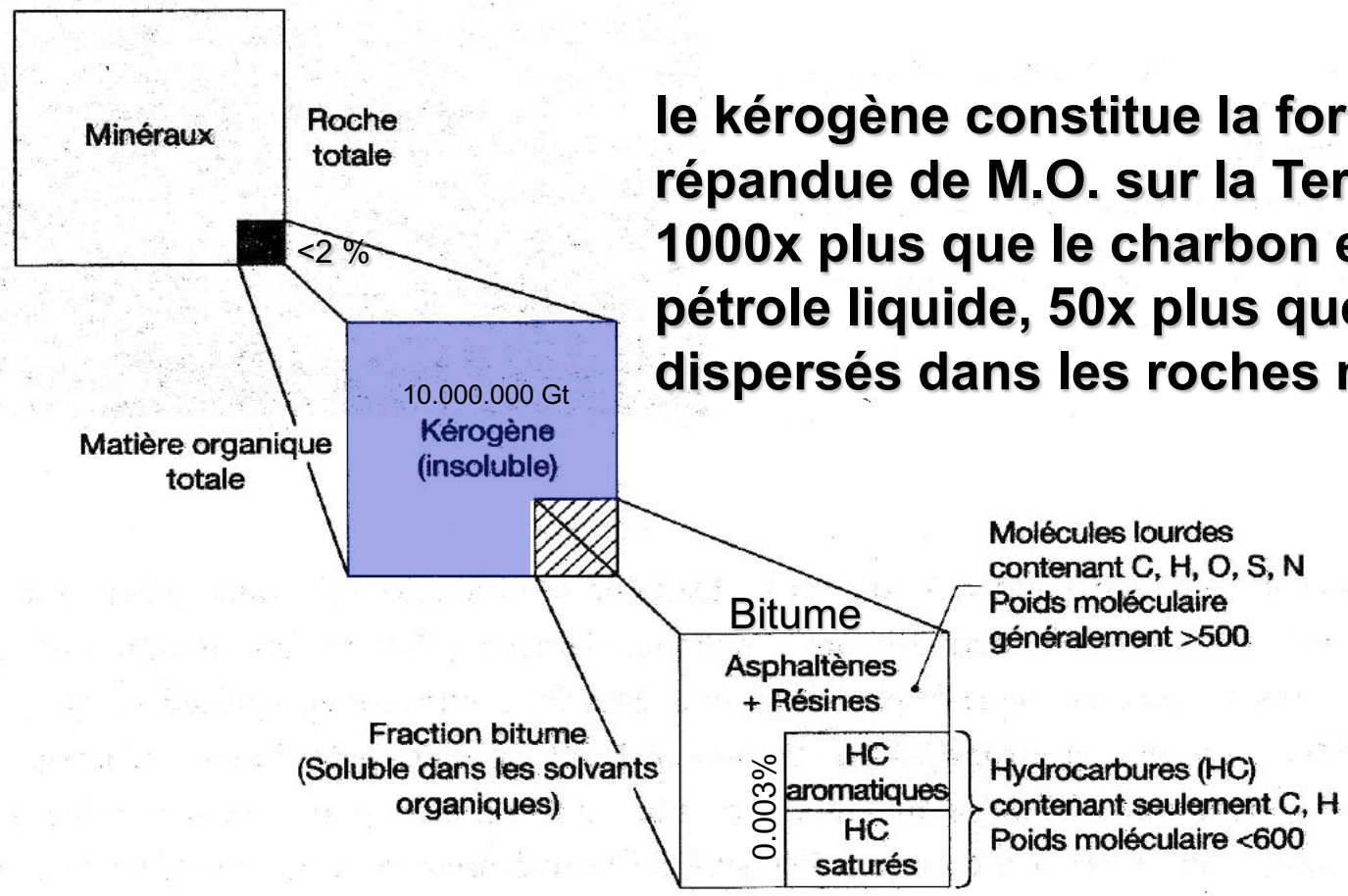
solid boxes = solid matter
dotted boxes = fluids in pores in rocks
dashed boxes = expelled fluids (oil-gas)


H/C
Type IS
Type I
Type I
Green River Fm, Eocene, (USA)
LACUSTRE, SAPROPELE (anoxie)
1.5
Type II
Jurassique (UK, France)
MARIN, PLANCTONIQUE
Type IIS
Type II
1.0
Type III
Tertiaire (Indonésie))
DELTAIQUE, HUMIQUE
Type III
0.5
6
4
2
0
10
20
30
S/Cx100
O/Cx100
GRS . Eocene (USA)
I
Carbonate SR. Cenomanian (Middle East)
Blackstone, U. Jurassic, (UK)
Kimmeridgian Shale. Dorset (UK)
II
Orbagnoux, U. Jurassic, (France)
Monterey FM. Miocene (USA)
Toarcian shale . Paris Basin (France)
II
Coals, Mahakam delta, Miocene (Indonesia)
III
Organic Shales, Mahakam delta, Miocene (Indonesia)
Qaidam basin, Oligocene, (China)
Huc 2013


DEVENIR
de la MO?
H-C-O-N
C-H
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
G/W
HYDROCARBURES
enfouissement excessif = 'carbonisation'
…METAMORPHISME

Kérogène : fraction organique insoluble dans les solvants organiques ≠ Bitume (soluble)

Le kérogène est 10 000 [10^{16}t] plus abondant que la MO vivante [10^{12}t] malgré que 0,01 (à 1%) de la production primaire soit fossilisée
⇒ importance des 'temps' géologiques pour les accumulations…
(un rapport de 1 à environ 10 000 pour le 'passage' de kérogène en HC)

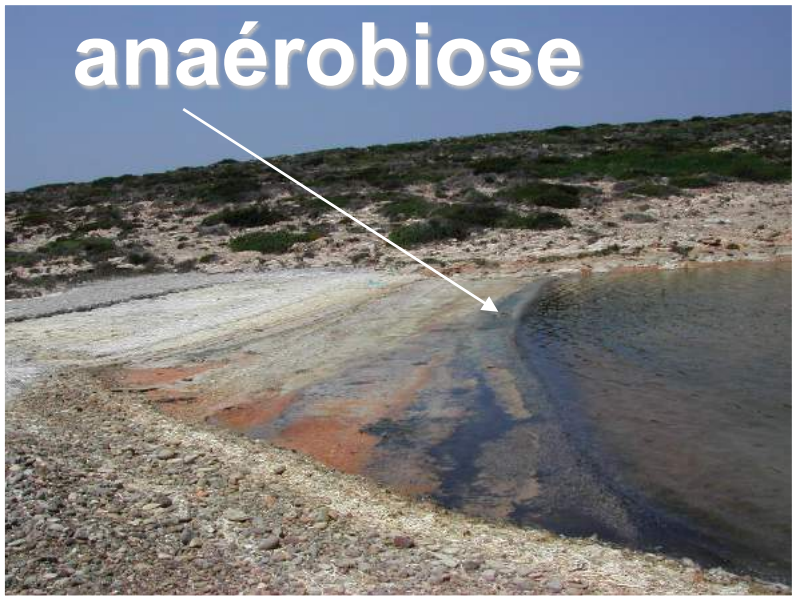


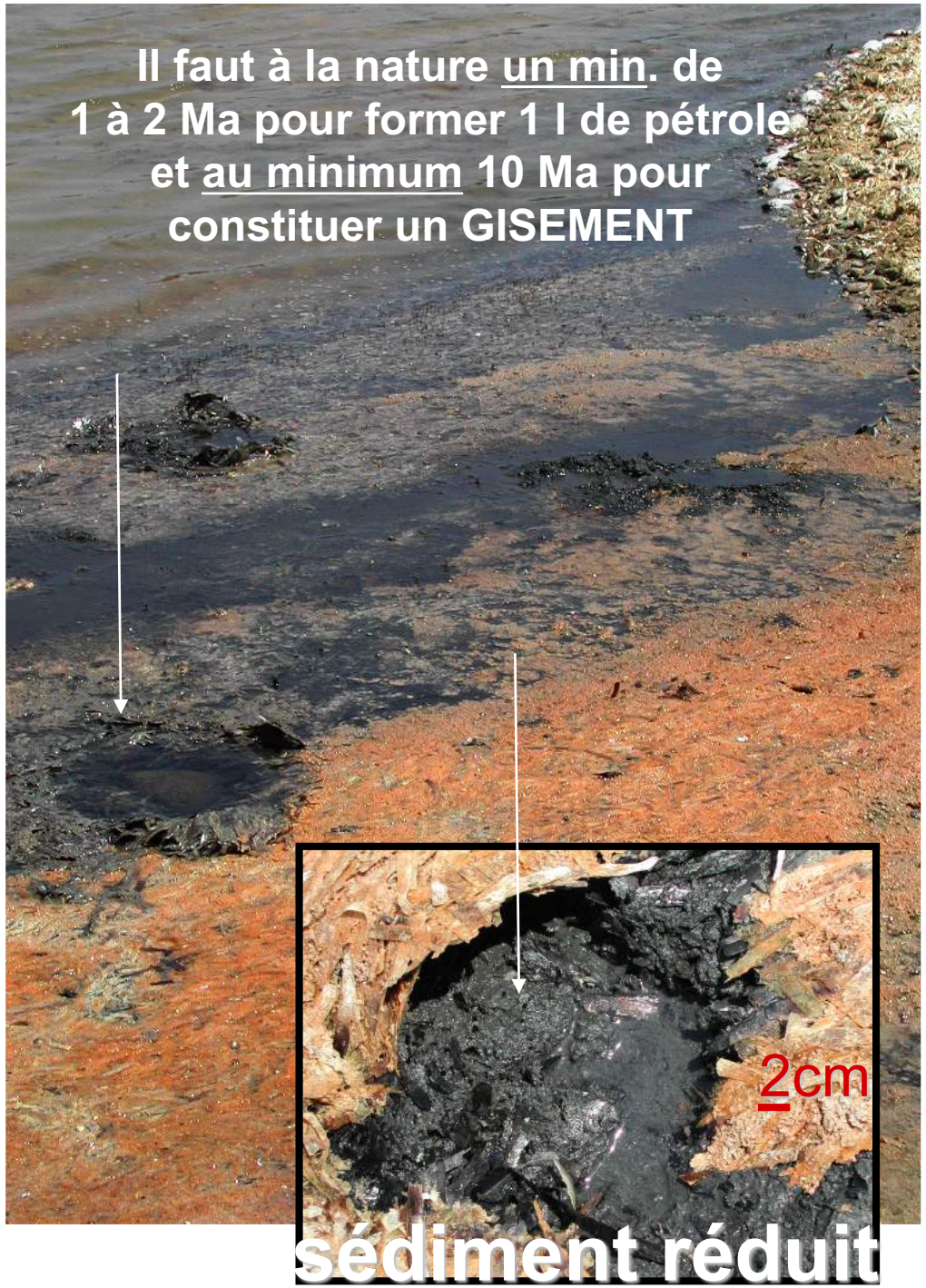
le kérogène constitue la forme la plus répandue de M.O. sur la Terre, 1000x plus que le charbon et le pétrole liquide, 50x plus que les bitumes dispersés dans les roches non réservoirs

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

HERBIERS à POSIDONIES

Cyclades, Grèce, 2003





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

GENESE DU PETROLE = DIAGENESE + CATAGENESE

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

de la chaleur (T° = 10'-100'°)
du temps (géologique = 10' Ma)

cela fonctionne grâce à la subsidence
(pression+gradient géothermique)
1° C/33m, perte CO_2, H_2O, NH_3….

-si tout va bien-
un piège

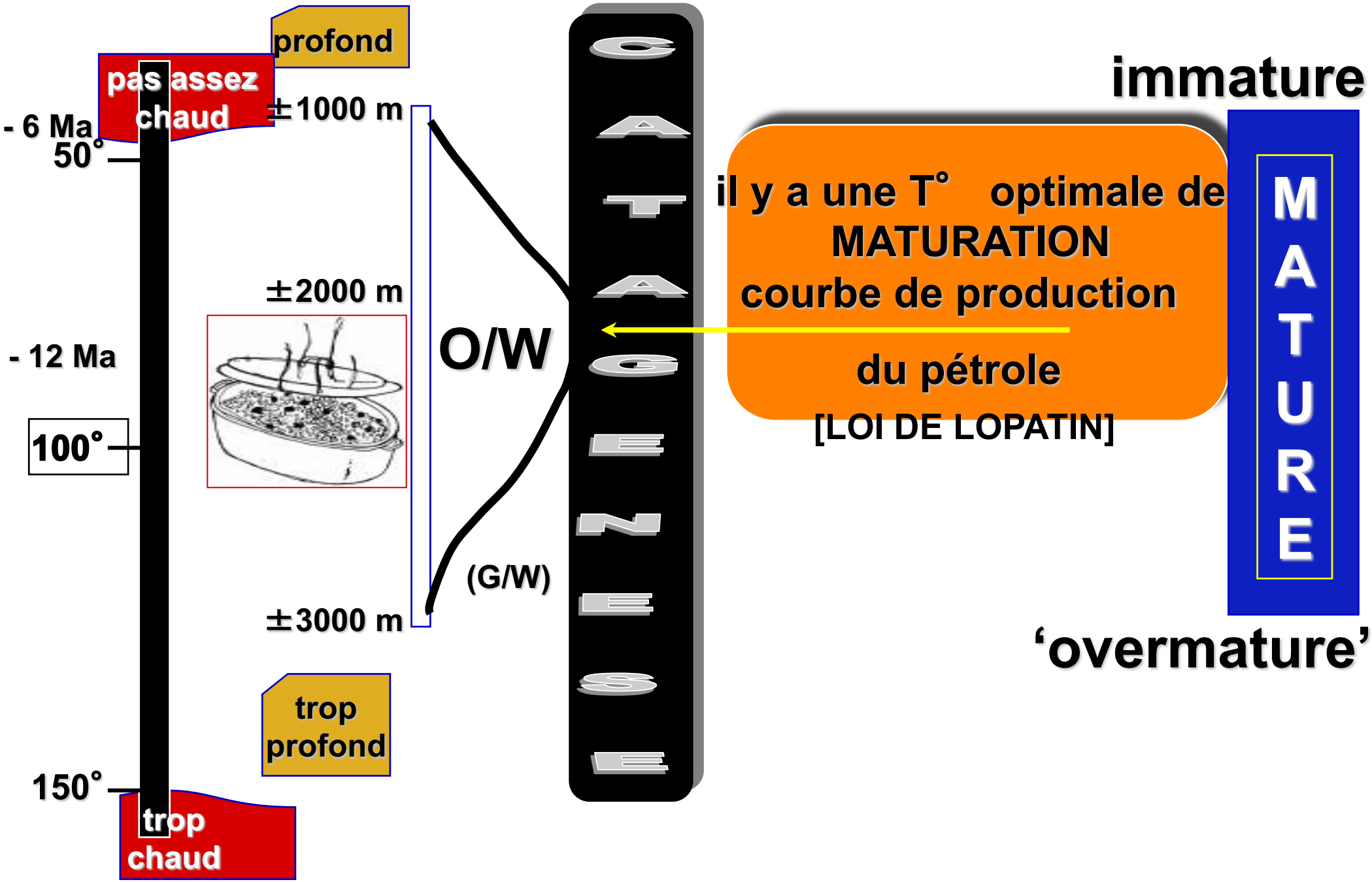
DIAGENESE

CATAGENESE

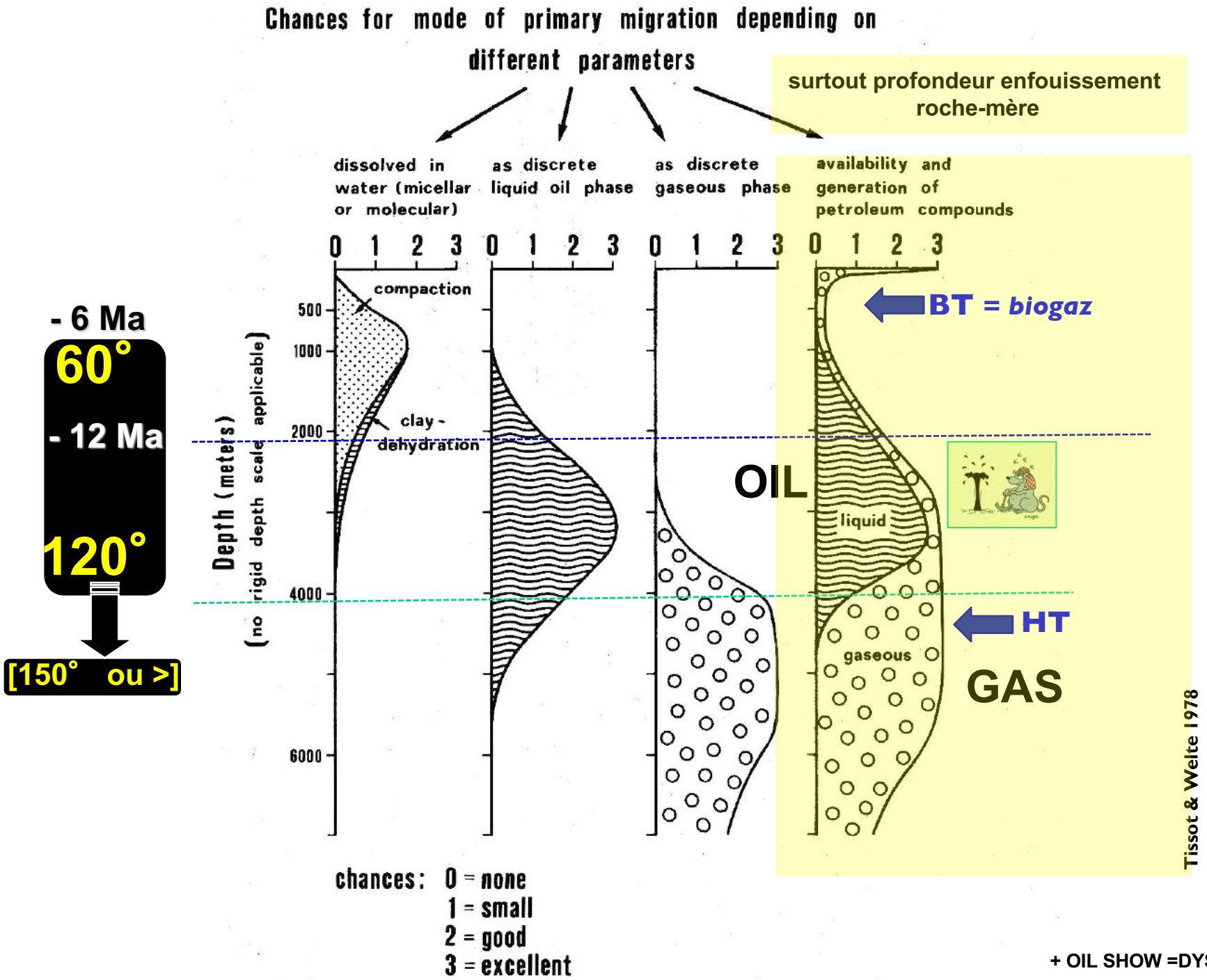
Roche Source
riche en Matière Organique

Maturation Thermique
de la Matière Organique

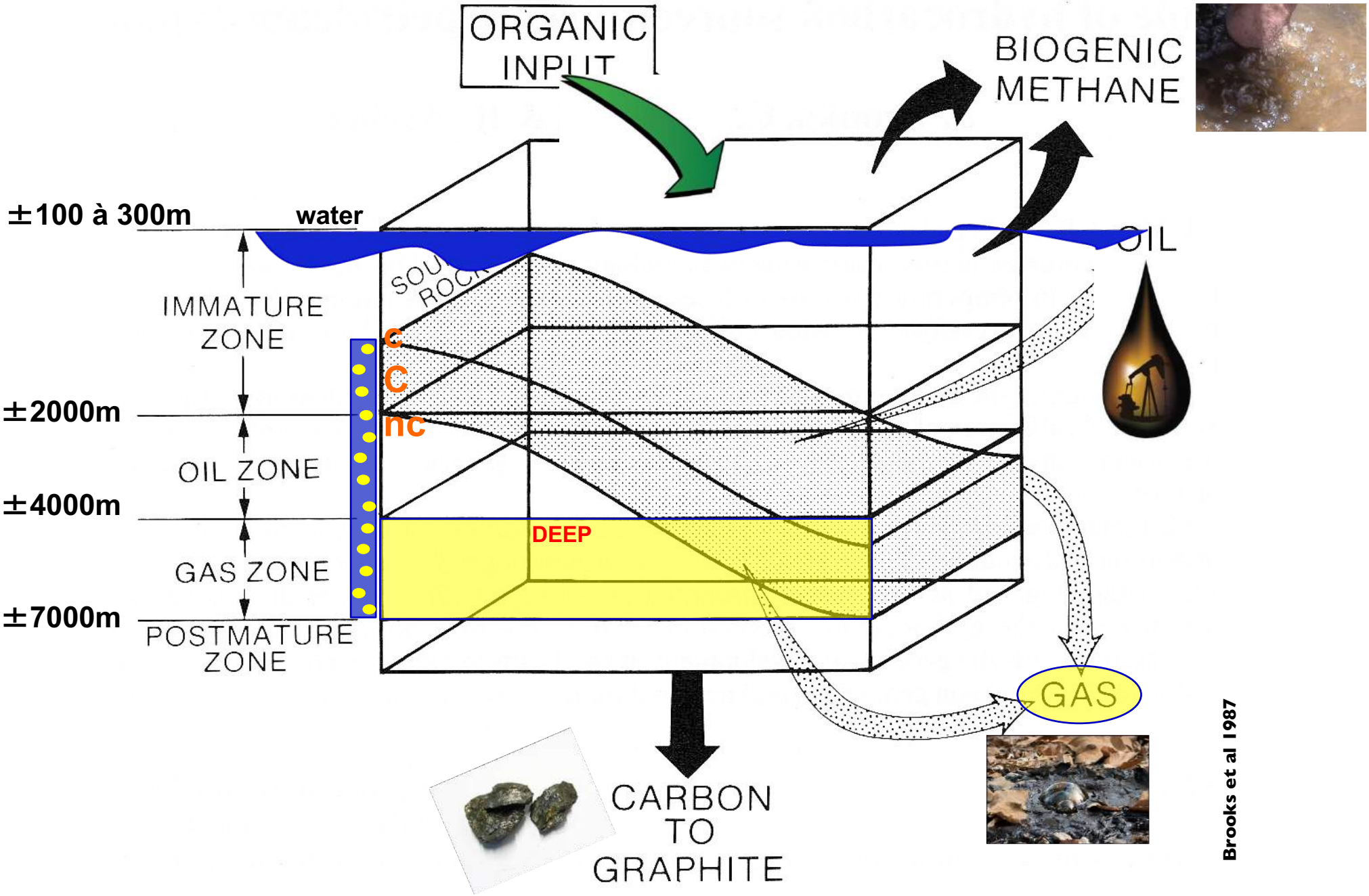
HUILE



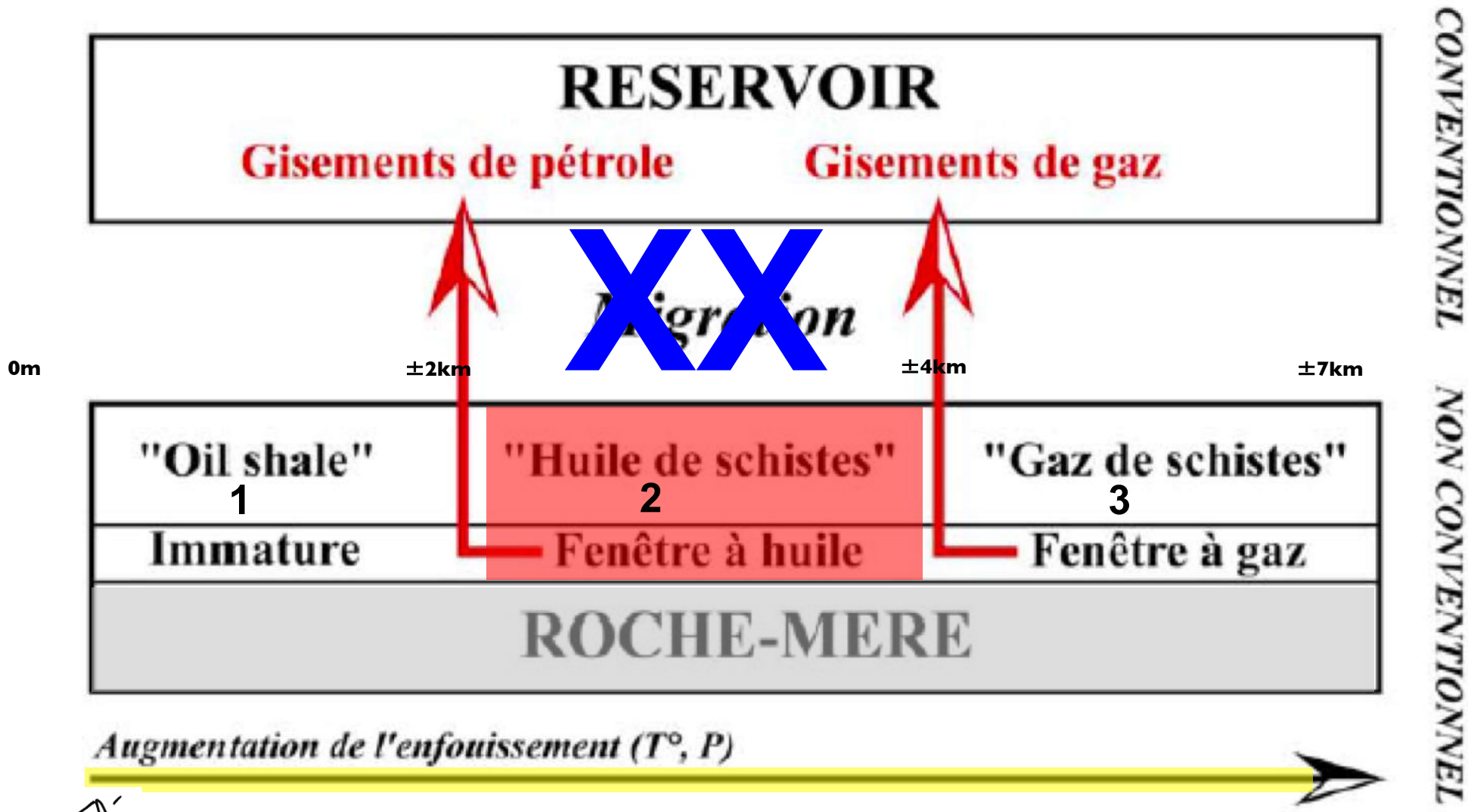
A. Préat-ULB cepulb 30 janvier 2018



+ OIL SHOW =DYSMIGRATION



Brooks et al 1987



oil shale (bituminous)
= KEROGEN (nc)

2. shale oil
= MATURE (nc)

3. shale gas
= gas window (nc)

OIL SHALE □SHALE OIL

'shallower/immature'
= 'schistes bitumineux'
= uniquement kérogène (>20%)

'deeper/oil-window'
= 'huile de schiste'/LTO

SARAH LEEN / NATIONA

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

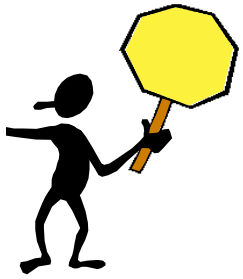
- *les schistes bitumineux ou 'oil shales, bituminous shales' [Wyoming, Colorado -USA, Orénoque -Brésil]*
  [= pétrole 'jeune' -il n'y a pas de bitume!, ni tjrs de schiste!!]

- *les sables asphaltiques ou huiles extra-lourdes [Venezuela] et les sables bitumineux ou 'tar sands' [rivière Athabasca, Canada]*
  [= oxydation bactérienne] et consistance 'Nutella!'…

RESERVES = ??

liées 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

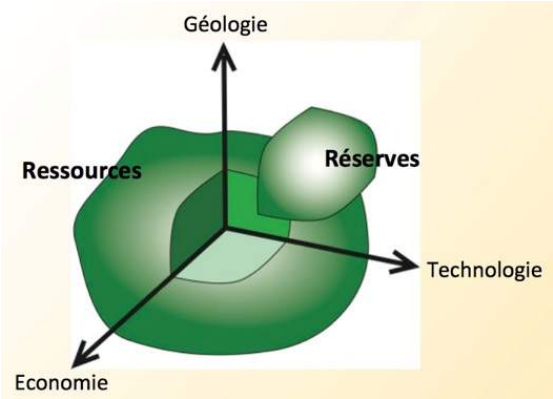
une baisse des prix peut induire une augmentation de la consommation

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 … certains gisements connus ne sont pas encore exploités
3. EVALUATION du pétrole à découvrir

Estimations sont pondérées d'une facteur de probabilité ± grand selon que l'on est optimiste ou pessimiste + 'distortions 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**

Les RESERVES COURANTES

Volumes extractibles selon les conditions techniques et économiques du moment et contenus dans les seuls gisements en production et en cours de développement

Les RESSOURCES

- Tous les autres volumes encore contenus dans la Nature. Pour qu'ils deviennent des réserves, il faut qu'ils soient équipés ou en cours d'équipement pour être produits
- On distingue plusieurs types de ressources qui sont toujours estimées suivant les conditions techniques et économiques du moment sauf, pour les ressources initiales en place qui englobent tout ce que la Nature a préservé en son sein

= **ressources contingentes** (connues, mais pas de plan de développement (car pas de permis d'exploration/exploitation…. –géo-politique ou autre raison)

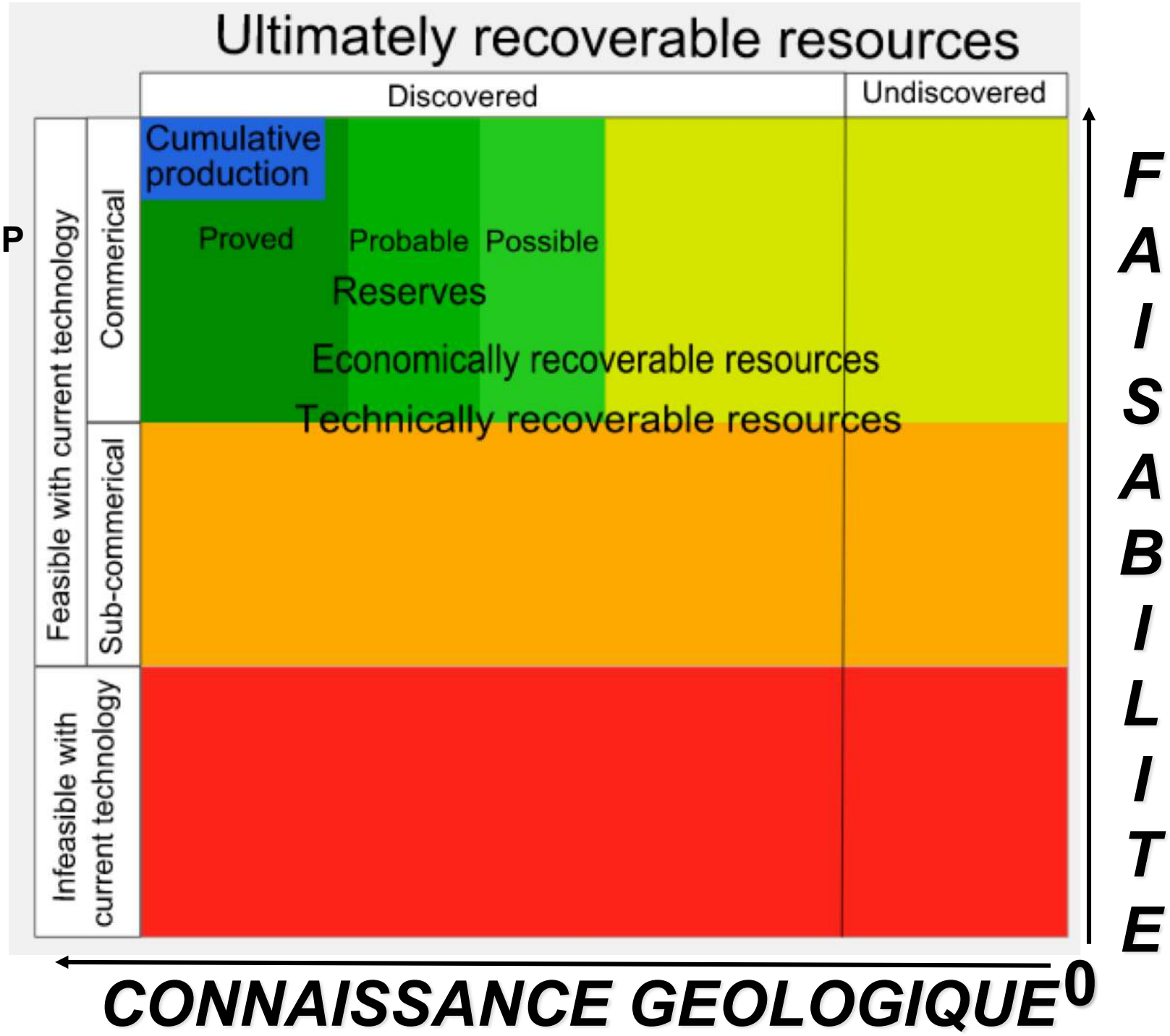
= **ressources potentielles ou prospectives** (à découvrir, ex. sismique)

= **ressources non productibles** (technique, économique, environnement)

+ **réserves additionnelles** (exemple EOR)

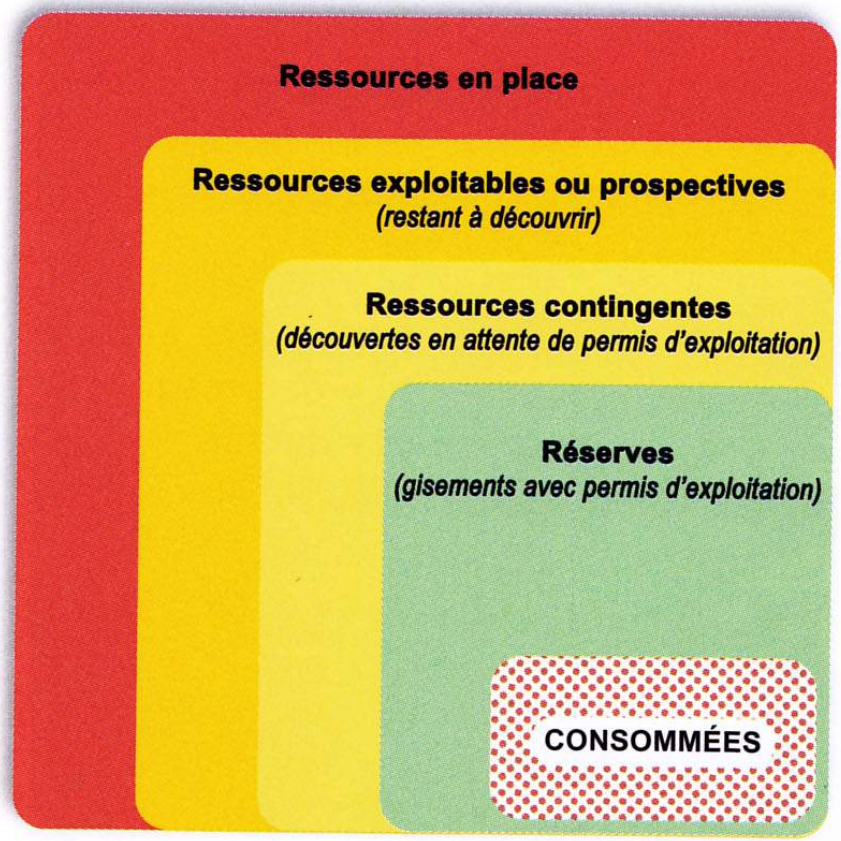
Exemple : réserves contingentes 'record' = roche-mère du Bazhenov en Russie : un million de km^2 (2X la France, 100X Ghawar) = 75 Gb pétrole de schiste = 'shale oil/LTO', Jurassique Supérieur de Sibérie (10-44m ép. À 2500-3000m de profondeur).

REGLES DES 3P



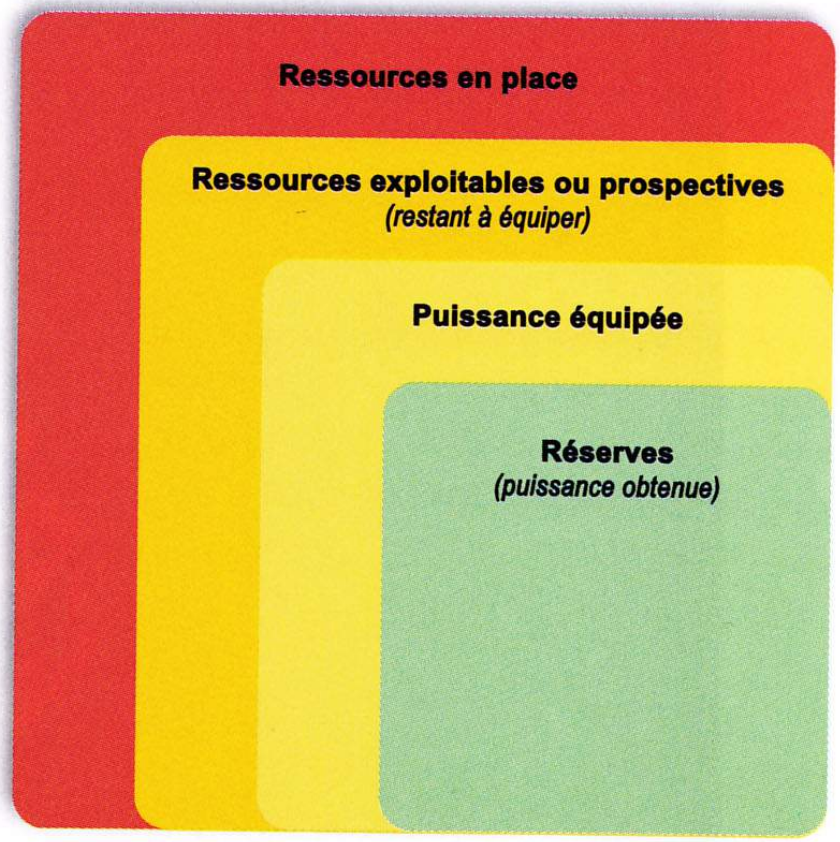
NON RENOUVELABLES

Pétrole, Gaz naturel, Charbons, Uranium, etc.



RENOUVELABLES

Solaire, Éolien, Hydraulique, etc.



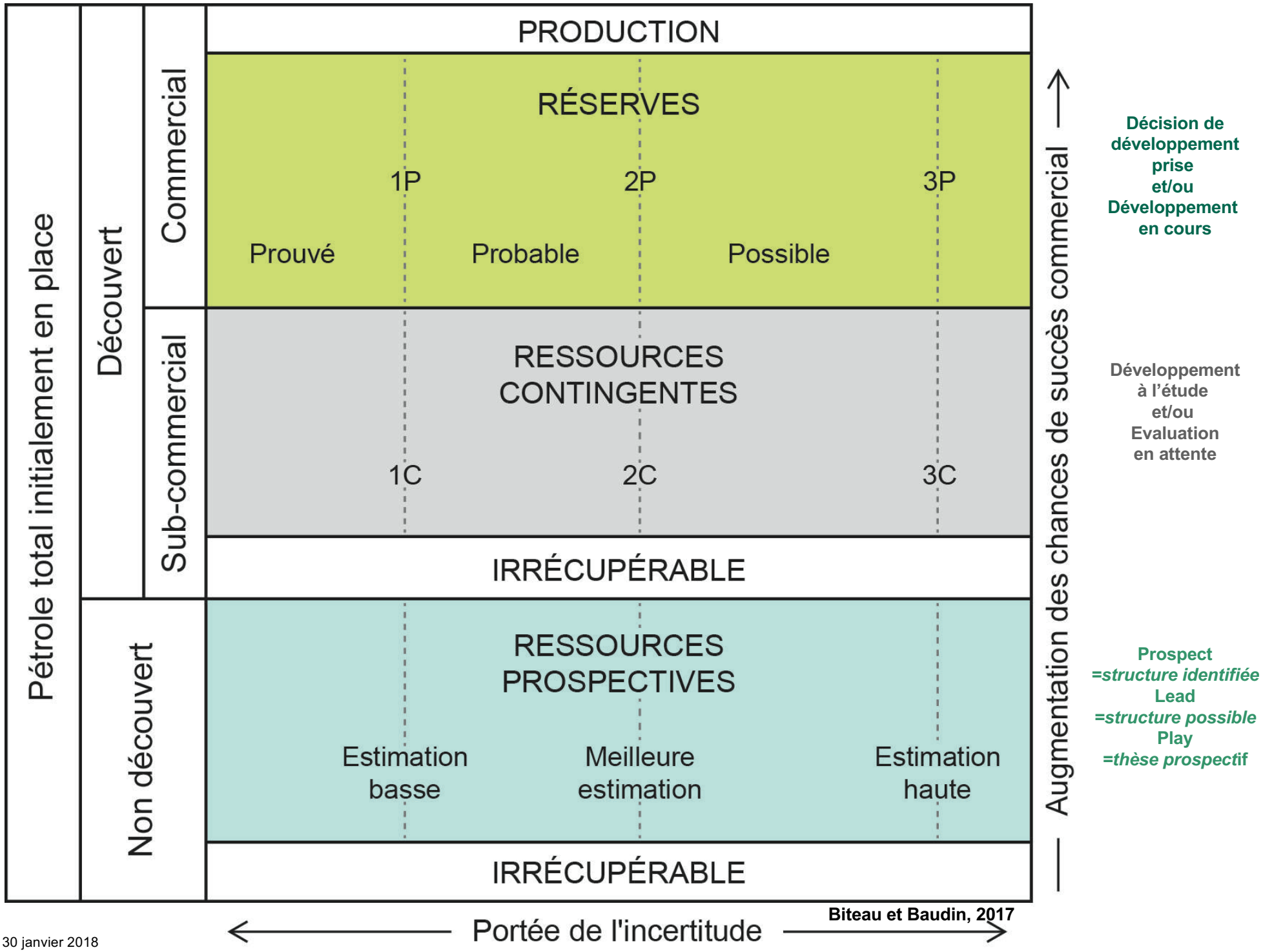
La dimension des carrés est indépendante des volumes concernés

Non renouvelables

- Restantes
- Exploitables
- Inexploitables
- Consommées

Renouvelables

- Effectives
- Exploitables
- Totales


Pétrole total initialement en place
Découvert
Non découvert
Commercial
Sub-commercial
PRODUCTION
RÉSERVES
1P
2P
3P
Prouvé
Probable
Possible
RESSOURCES CONTINGENTES
1C
2C
3C
IRRÉCUPÉRABLE
RESSOURCES PROSPECTIVES
Estimation basse
Meilleure estimation
Estimation haute
IRRÉCUPÉRABLE
Augmentation des chances de succès commercial
Décision de développement prise et/ou Développement en cours
Développement à l'étude et/ou Evaluation en attente
Prospect =structure identifiée
Lead =structure possible
Play =thèse prospectif
Portée de l'incertitude
Biteau et Baudin, 2017

LA REGLE DES 3 ‘P’ [prouvées-probables-potentielles]

Les réserves prouvées ‘1P’ 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

RESSOURCES

Bouilard JN, IFP 2002

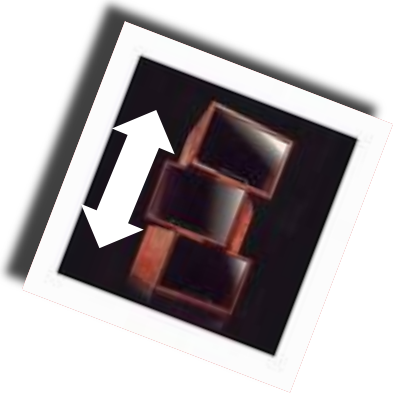
- Accessibles à l'exploration
- Non accessibles à l'exploration

- Identifiées
- Non identifiées

- Techniquement productibles
- Techniquement non productibles

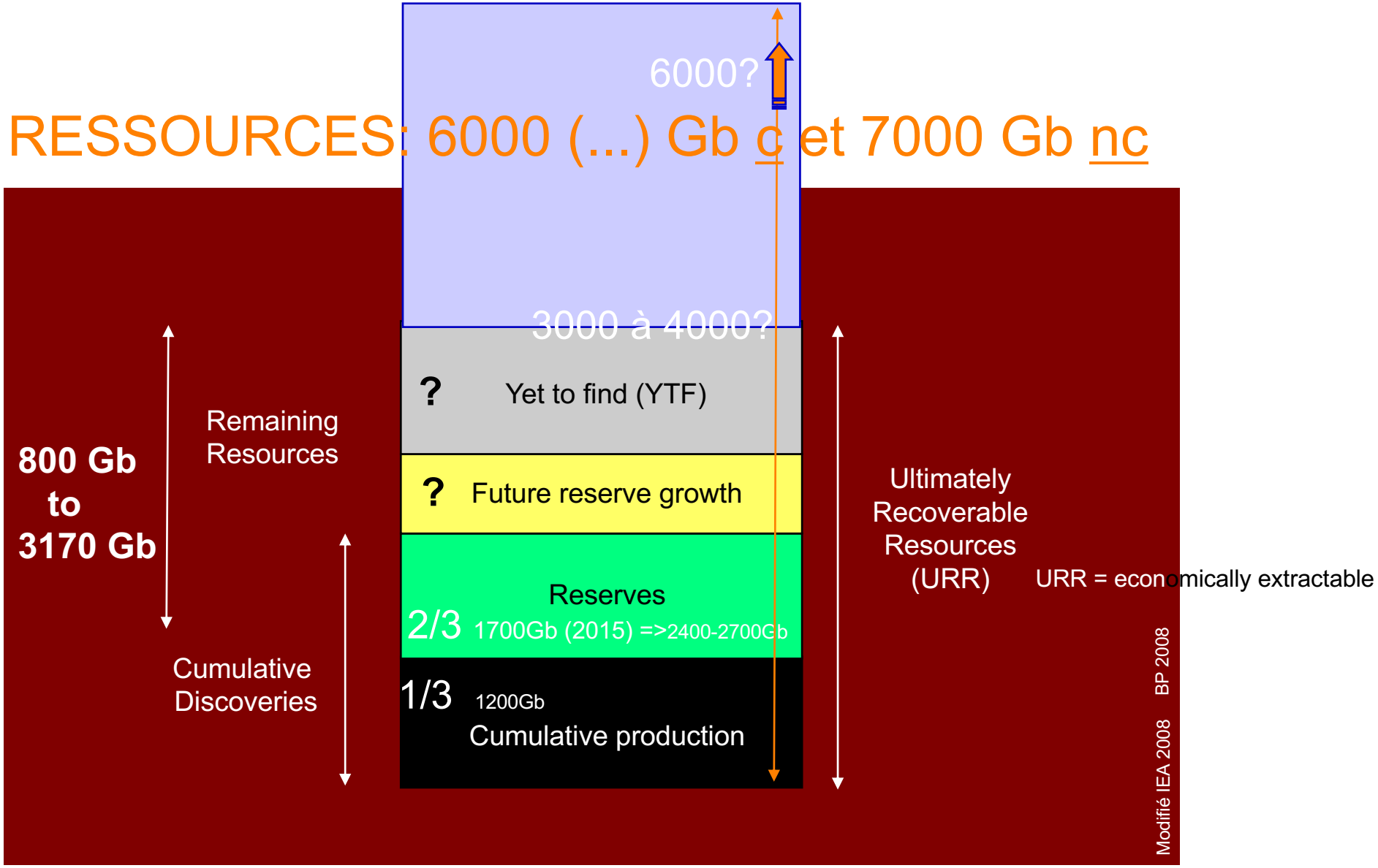
- Economiquement rentables
  - 1260 Gb déjà produits = consommés 2016
- Economiquement non rentables

RESERVES 1P2P3P



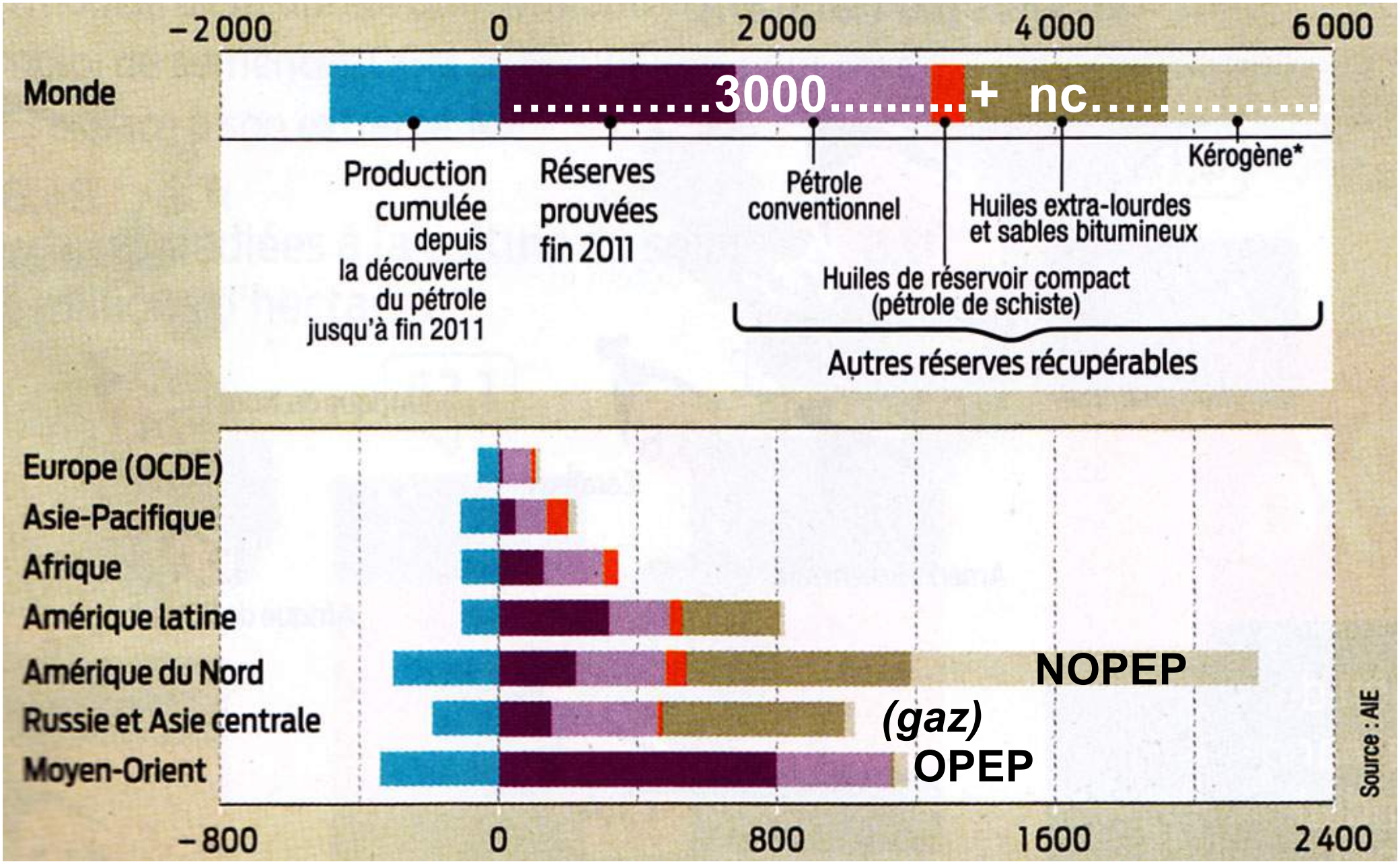
Ressources: quantités en place dans la croûte terrestre (identifiées ou non)
Réserves: HC récupérables, commerciables dans les conditions actuelles du marché

RESSOURCES: 6000 (...) Gb c et 7000 Gb nc

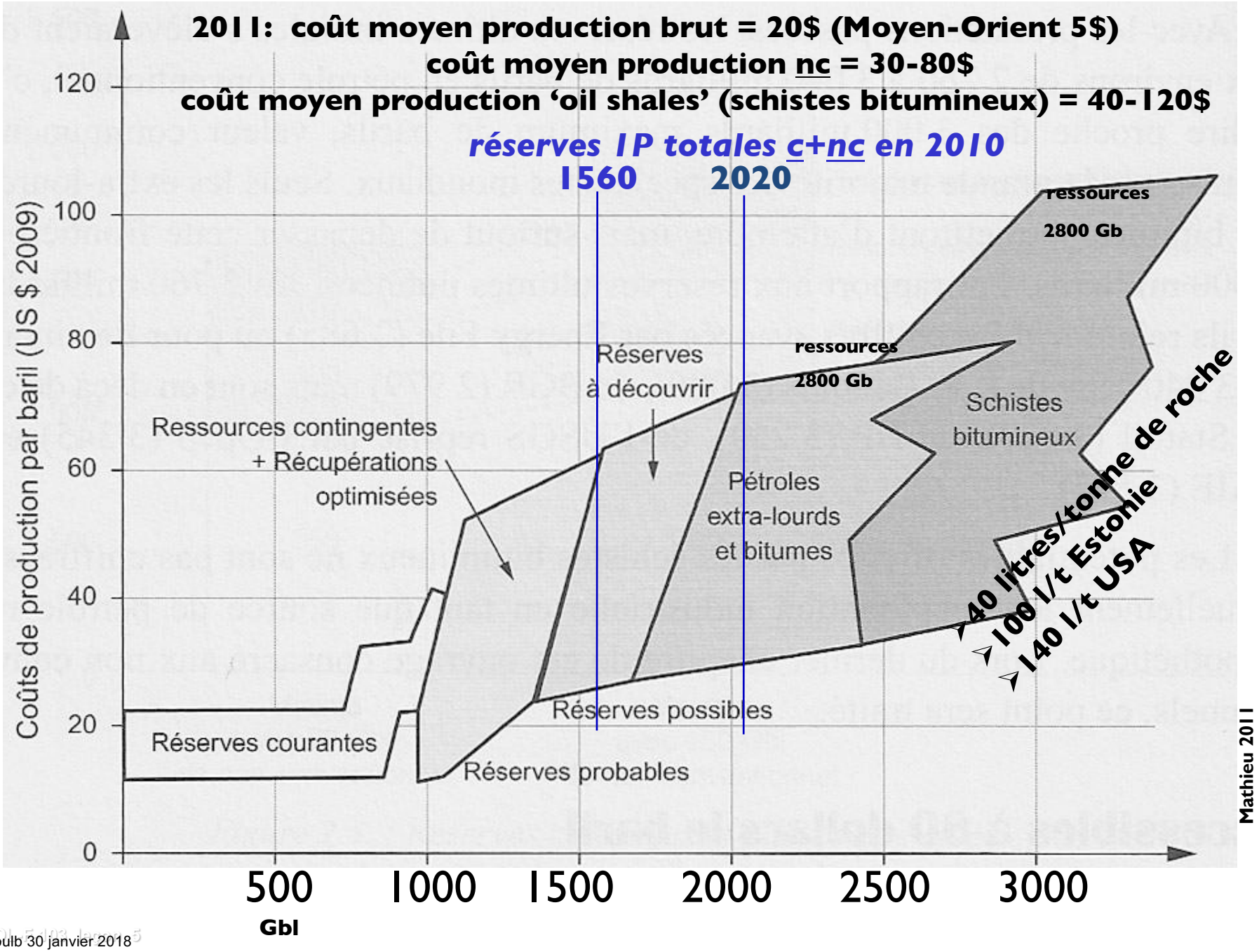


Remaining recoverable resources oil c : 870-3170 Gb (2015 AIE: 2700Gb et 5000Gb$_{min}$ c+nc AIE2016)
(Max = 4Xmin ou 6Xmin avec nc)
nc :1P 1526 Gb (BP, 2010), 1P 1532 Gb (CIA, Factbook, 2012), 1P2P3P 3300 Gb (BP2014)

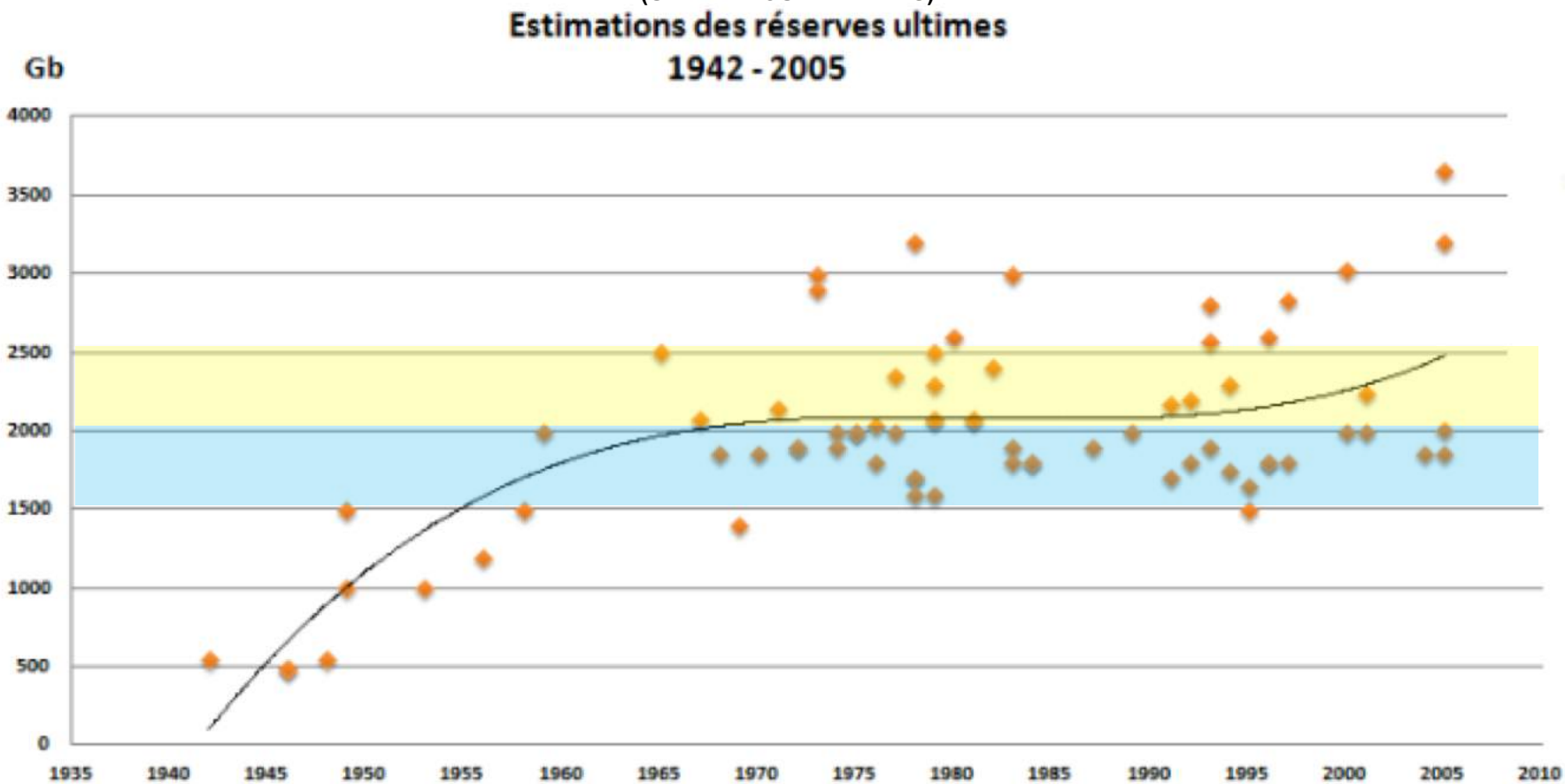
Ressources pétrolières *récupérables* en 2011, Gb

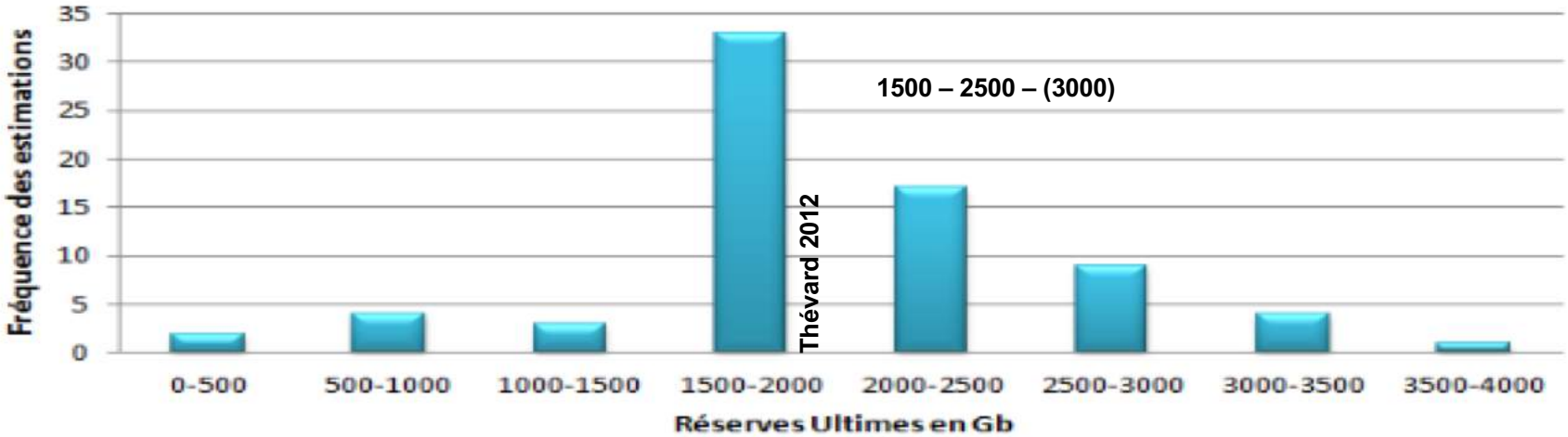


Coûts de production des futures réserves attendues



(URR = RECUPERABLES)





FINALEMENT

< 100 $ ...>100$

concept fluctuant
(technique, économie)

volume
difficile à évaluer

RESERVES PROUVEES

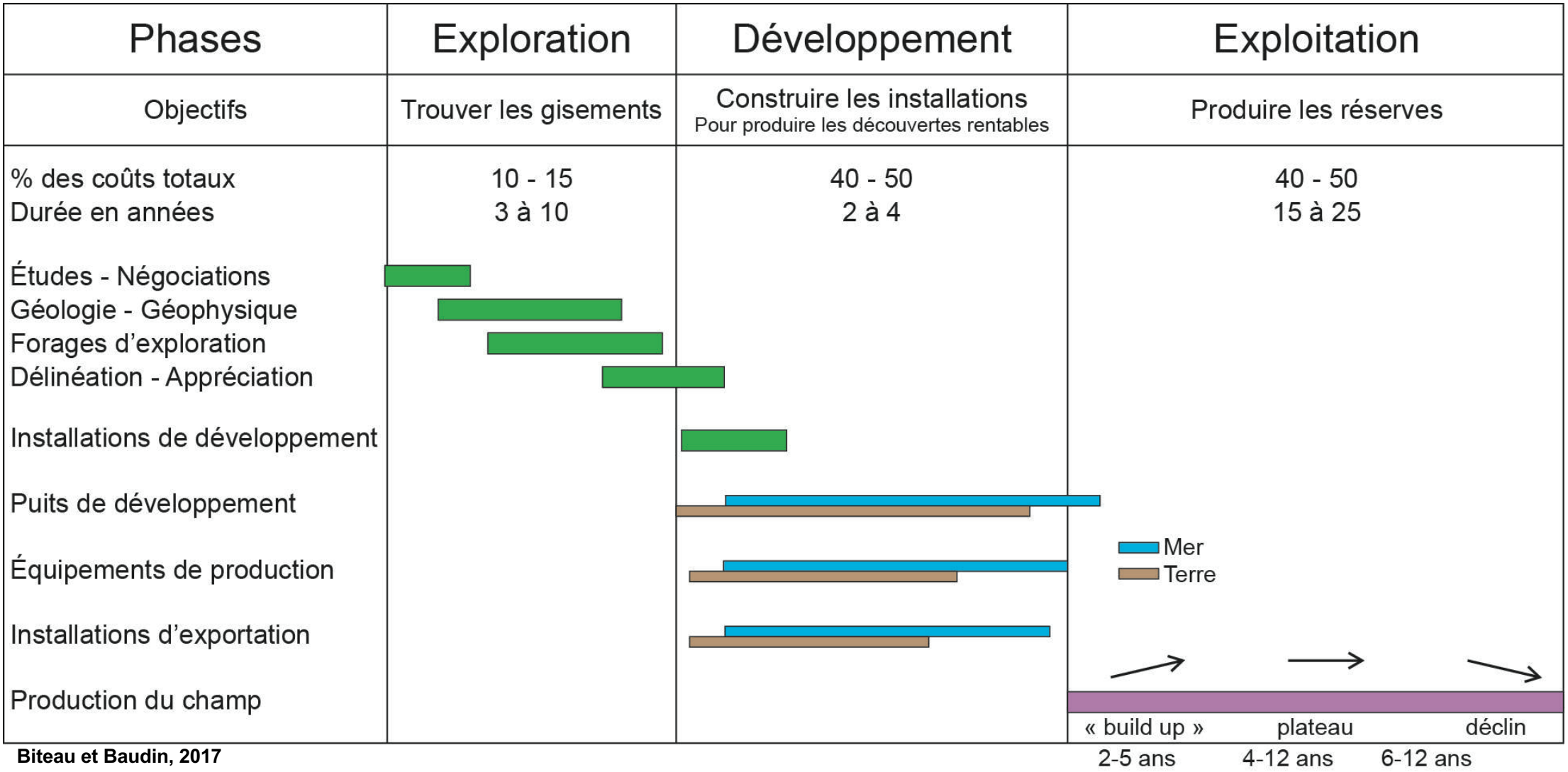
RESERVES ULTIMES

on passe de l'un à l'autre
dans les deux sens

RESSOURCES

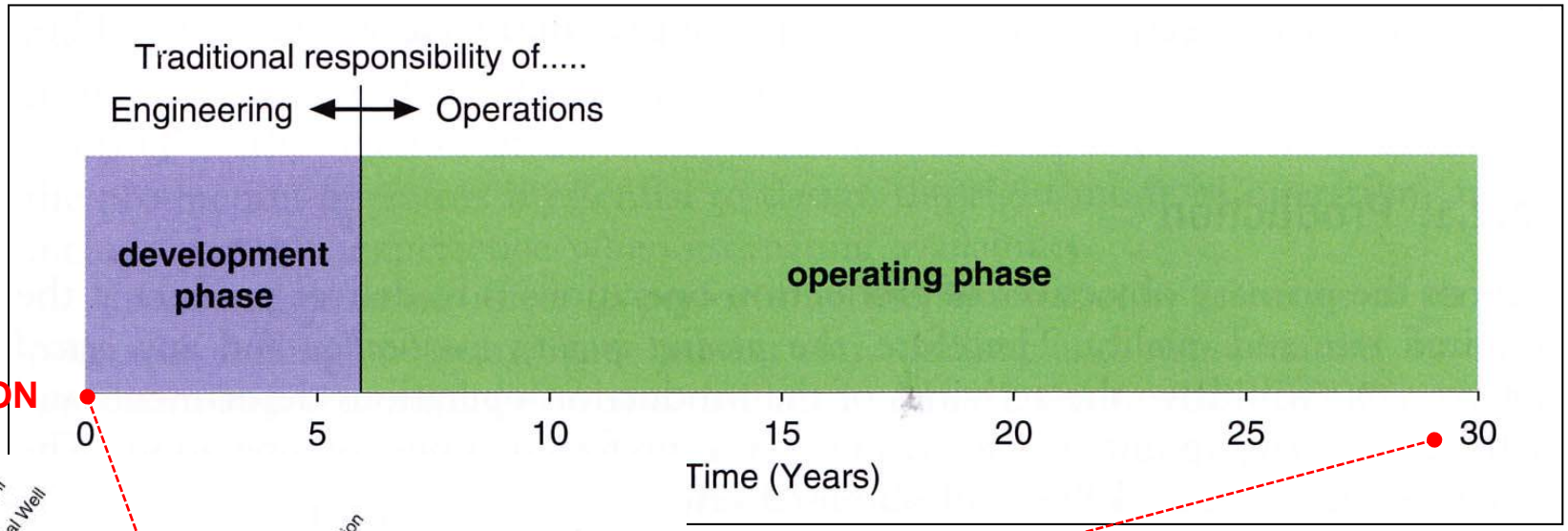
Les réserves développées prouvées: le poisson est dans votre barque, vous l'avez pesé. Vous pouvez le sentir et vous allez le manger. **Les réserves non développées prouvées**: le poisson a mordu à l'hameçon et vous êtes prêt à le sortir de l'eau. Vous pouvez même en évaluer la grosseur (il a toujours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

In Legault A 2007

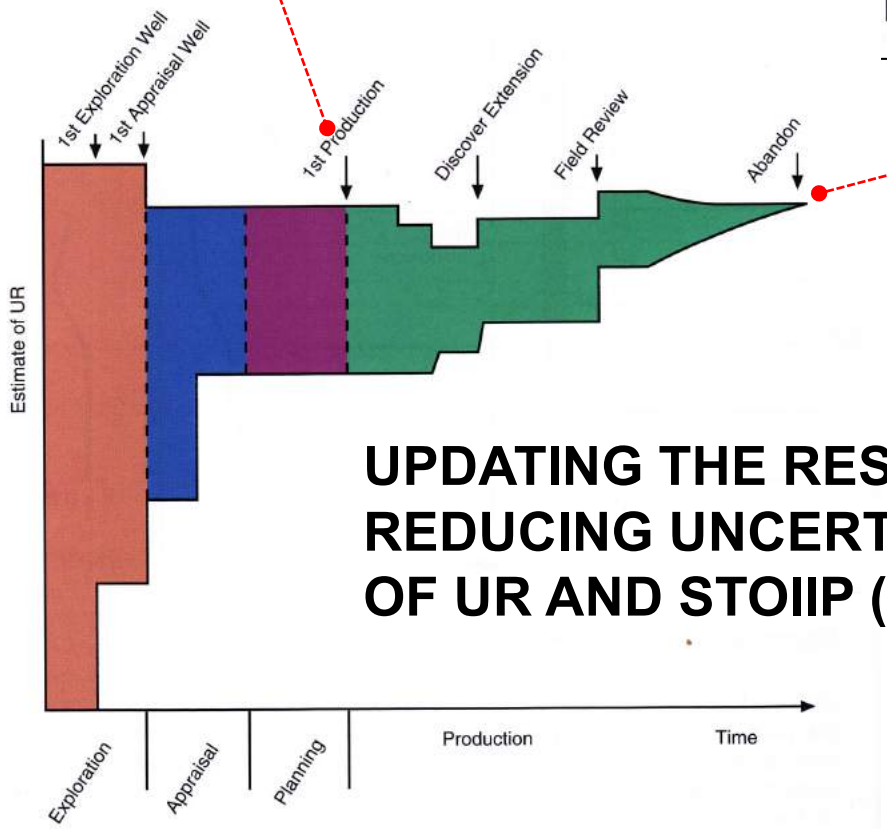


Biteau et Baudin, 2017

PRODUCTION OPERATIONS AND MAINTENANCE



EXPLORATION phase



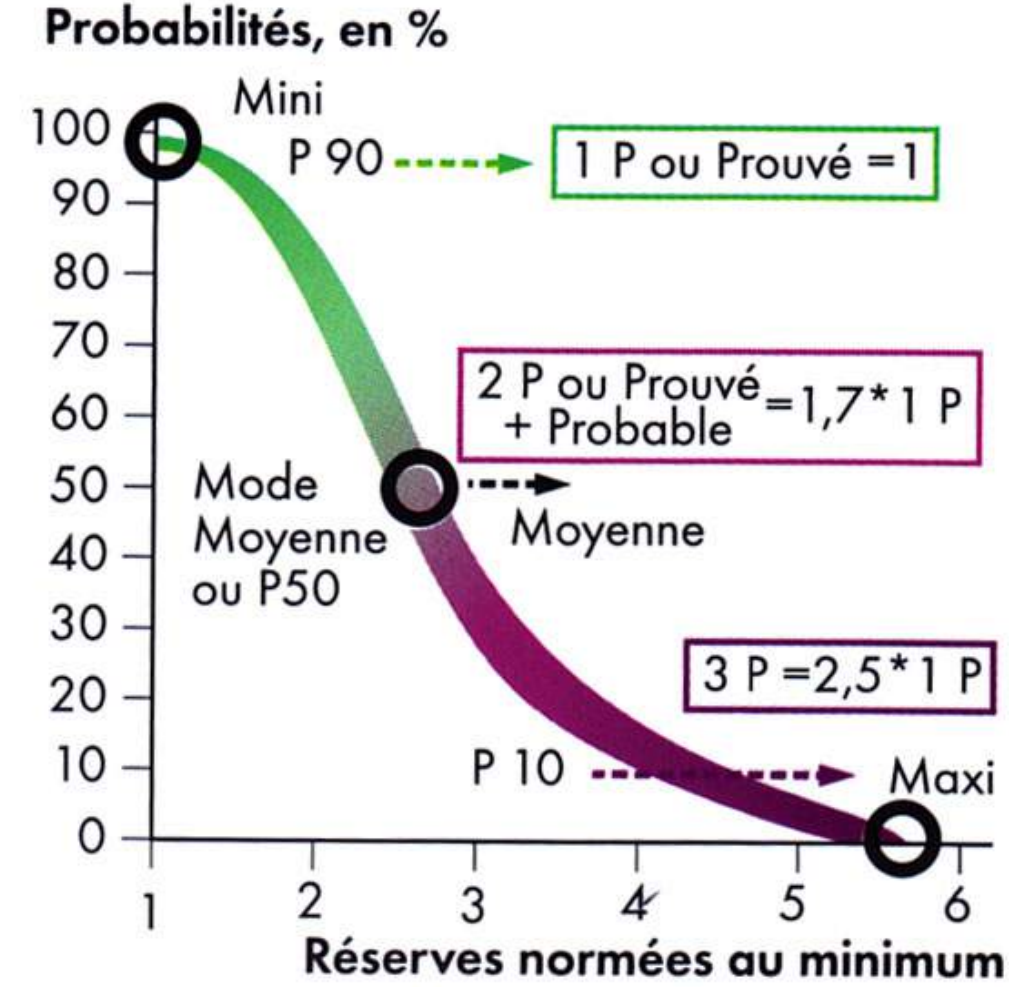
UPDATING THE RESERVOIR MODEL REDUCING UNCERTAINTIES IN THE ESTIMATE OF UR AND STOIIP (here UR was reduced)

UR ultimately recovery
STOIIP stock tank initally in place
Jahn et al. 2009

LE CALCUL DES RÉSERVES SUR LES GISEMENTS

LA REGLE DES '3P' : prouvé-probable-possible

Ressources DECOUVERTES : courantes et contingentes



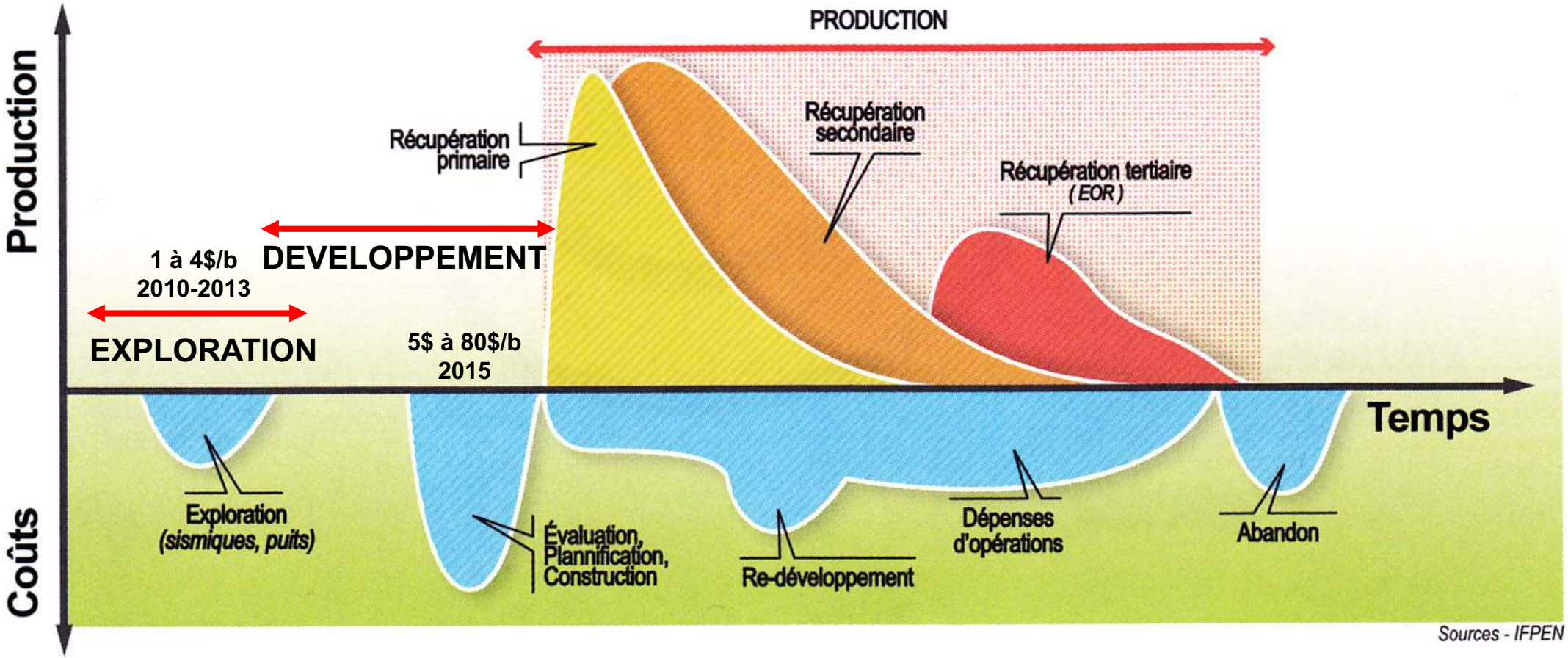
Source : Y. Mathieu, IFPEN.

1 Gb
conditions les plus défavorables

1,7 Gb
conditions le plus souvent rencontrées (*in fine*)
Nb 1,7Tb x 1,7 = 2,9Tb

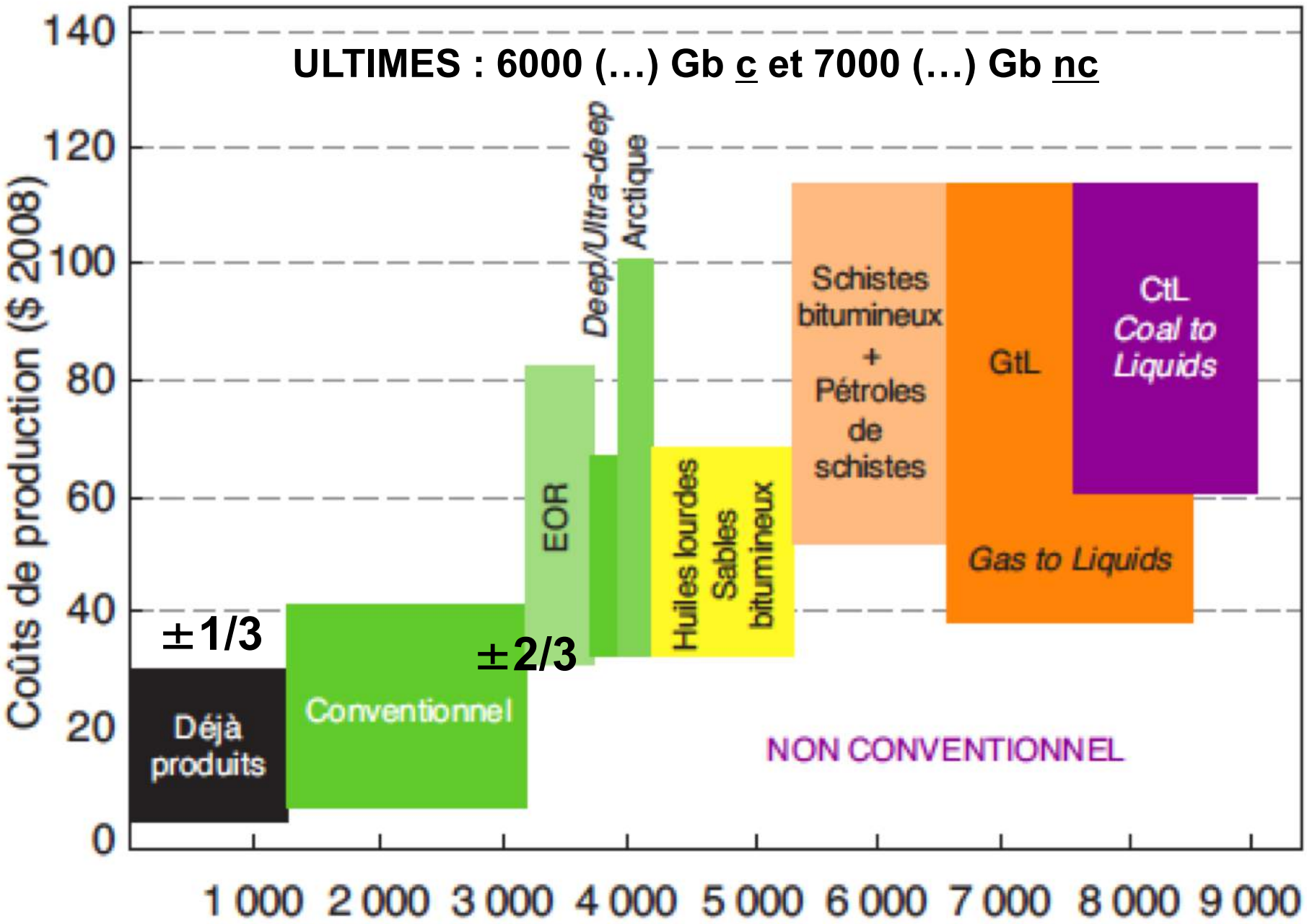
4,2 Gb
conditions optimales

RECETTES ET DEPENSES CHAMP PETROLIER (20 à 30 ANS)



Coûts techniques (amont.....aval) > < Recettes production

Ex: Irak 2$ = 0,2-0,8-1,0 en 2011, Arabie 2-3$ en 2011, offshore Brésil 15-20$ en 2011



Source : AIE, 2008 modifié

différent de ressources
Ici = ± ultimate recoverable resources

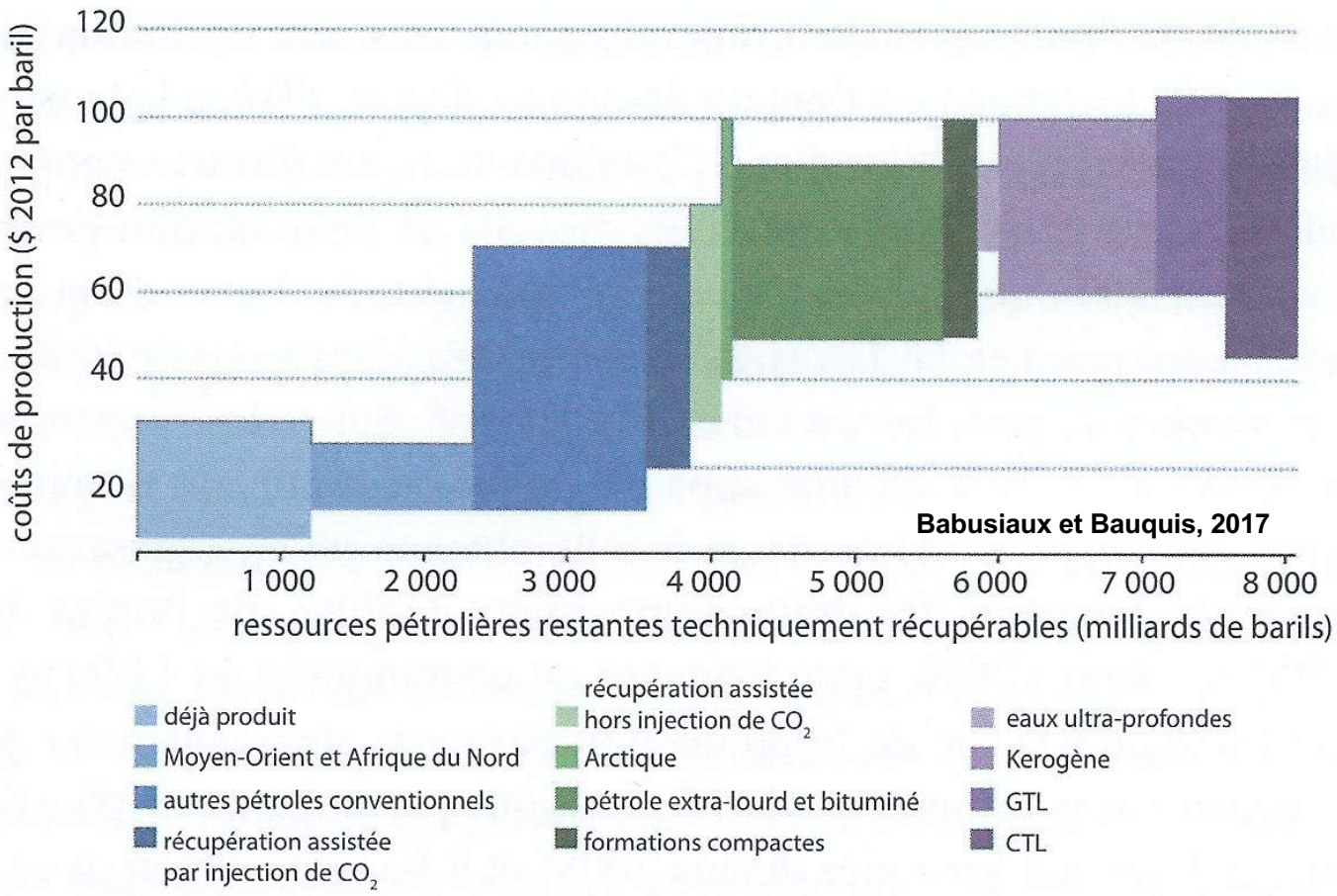


Figure 6.2 – Coûts de production de différentes ressources en hydrocarbures. (Source : AIE [2013].)

FORMATIONS COMPACTES nc - TIGHT

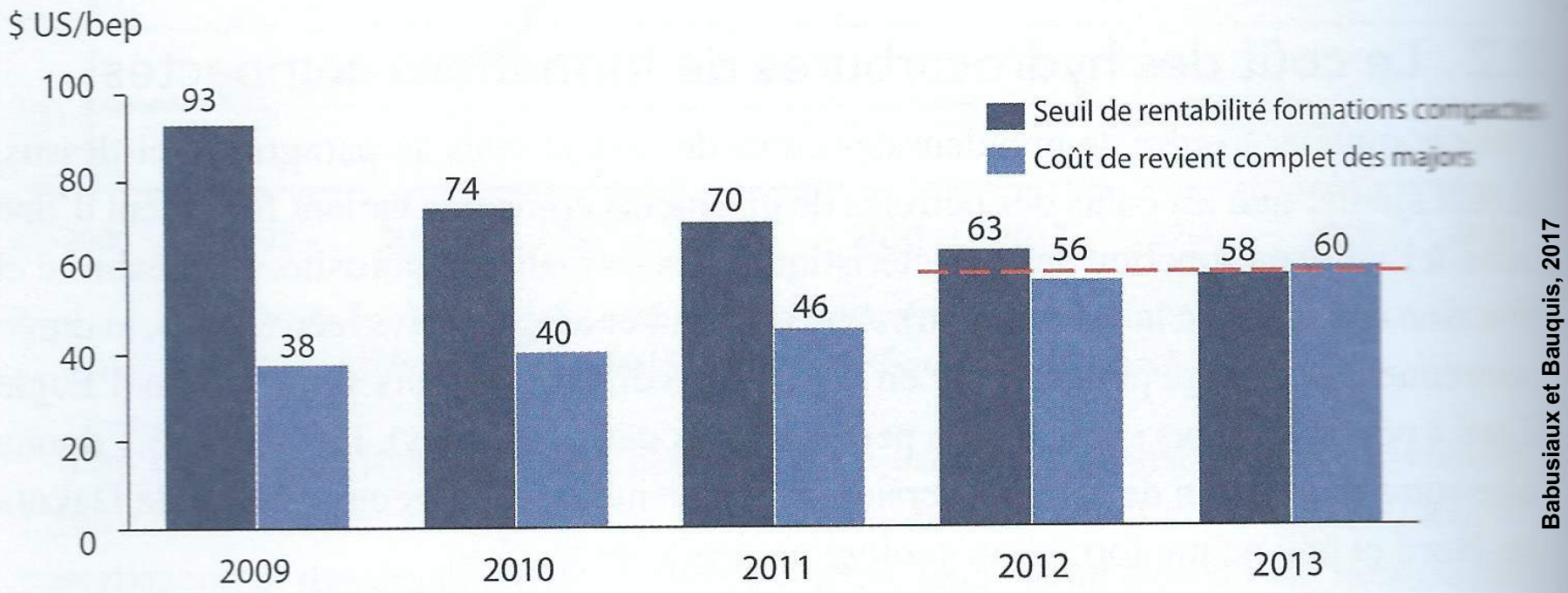


Figure 6.3 – Évolution du seuil de rentabilité de la production de pétroles de formations compactes et des coûts moyens techniques complets des « majors ».
(Source : A. Rostand [2014].)

Babusiaux et Bauquis, 2017

PUITS DAKOTA NORD
In Fattouh, 2015

	Seuil de rentabilité	Nombre d'appareils de forage
McKenzie	$28	66
Dunn	$29	28
Stark	$36	2
Williams	$37	43
Mountrail	$42	31
Bottineau-Renville	$51	4
Billings	$53	4
McClean	$73	1
Bowman-Slope	$75	0
Golden Valley	$77	0
Burke	$81	3
Divide	$85	8
Moyenne/total	**$56**	190

Babusiaux et Bauquis, 2017

FORTE VARIABILITE (= géologie)

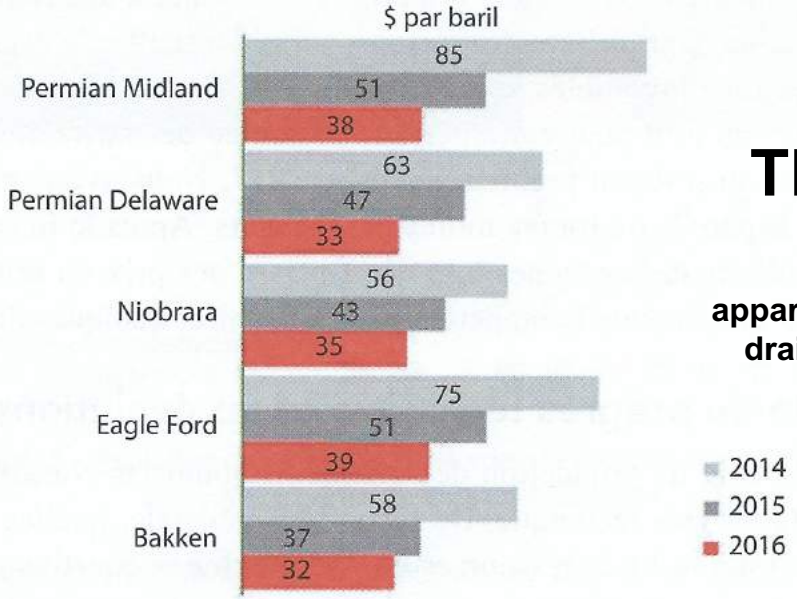
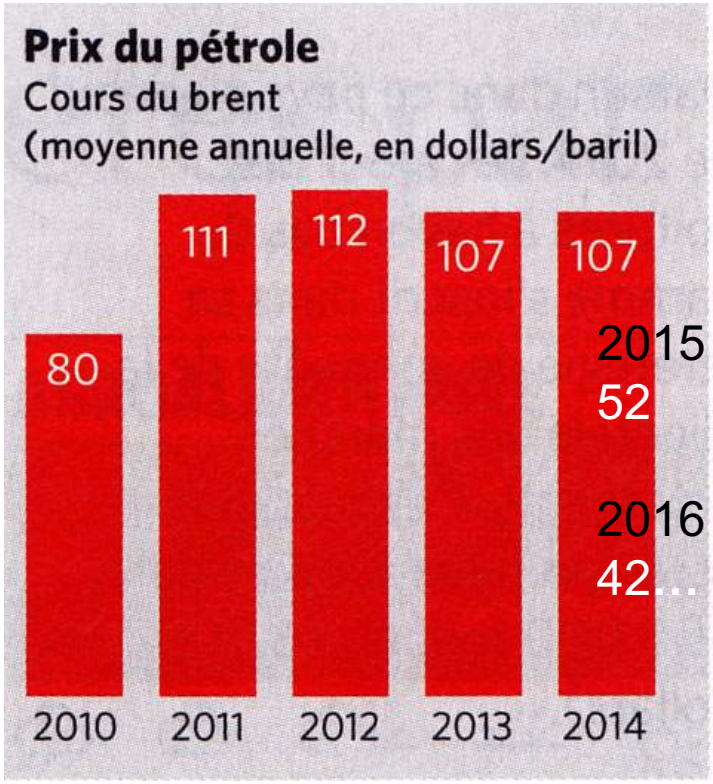


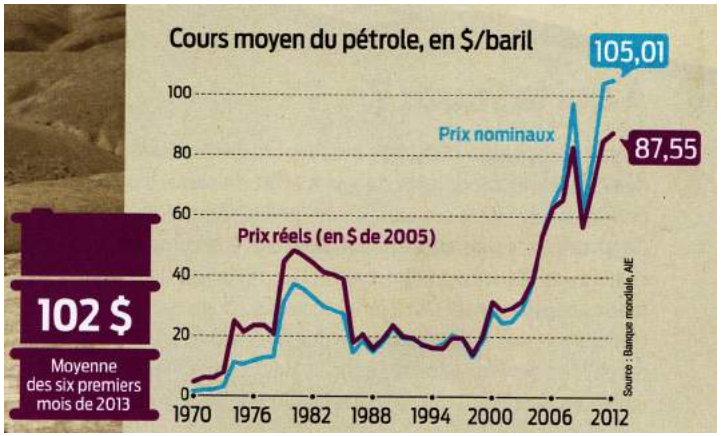
Figure 6.4 – Seuils moyens de rentabilité par zones de production de gisements (tête de puits) compacts. (Source : Rystad Energy.)

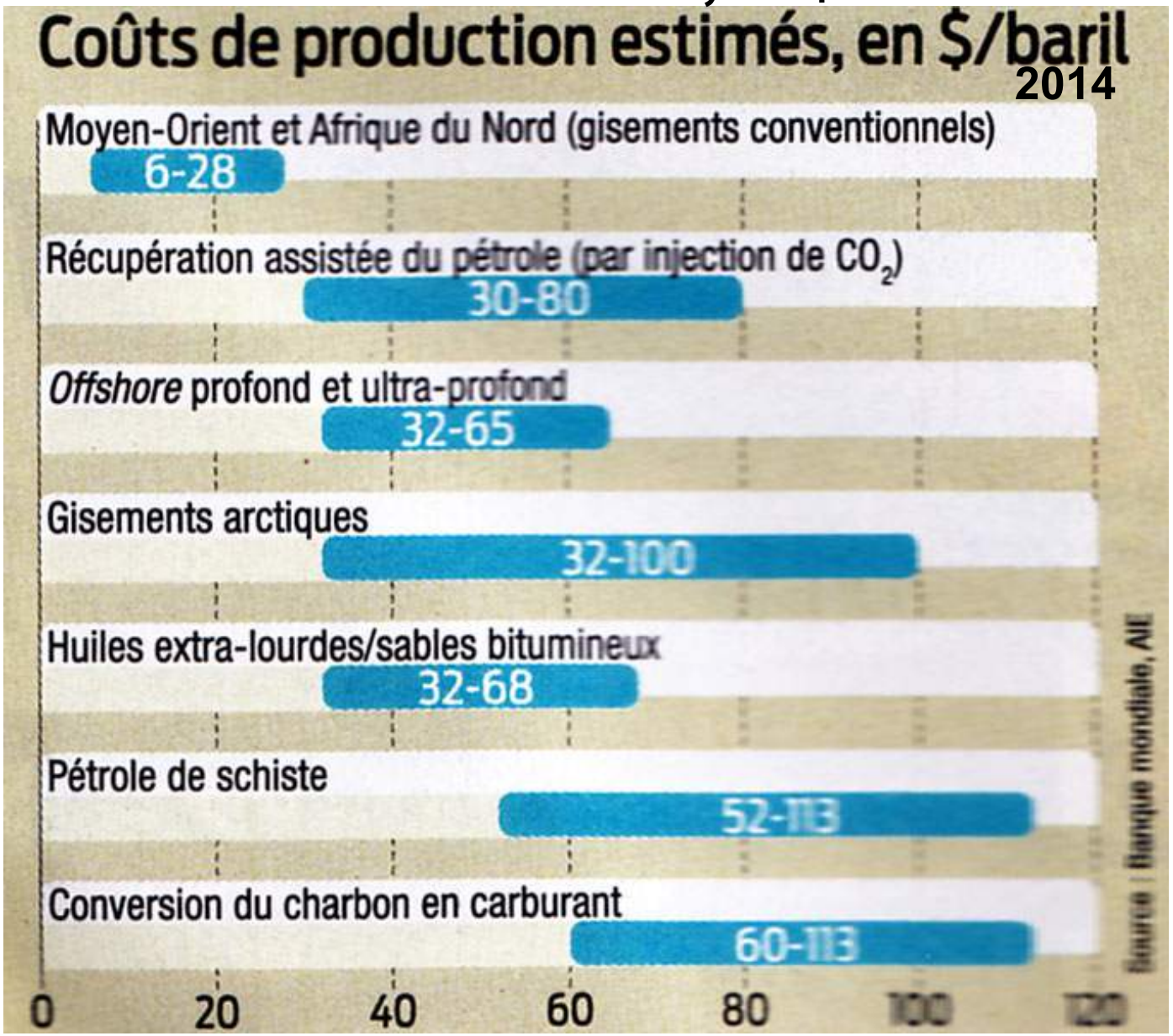
EVOLUTION TECHNOLOGIQUE (court terme)

appareils forage x2 => nombre de puits x5
drains horizontaux 1000 m => 3000 m
…

AUJOURD'HUI : 45,54$/b



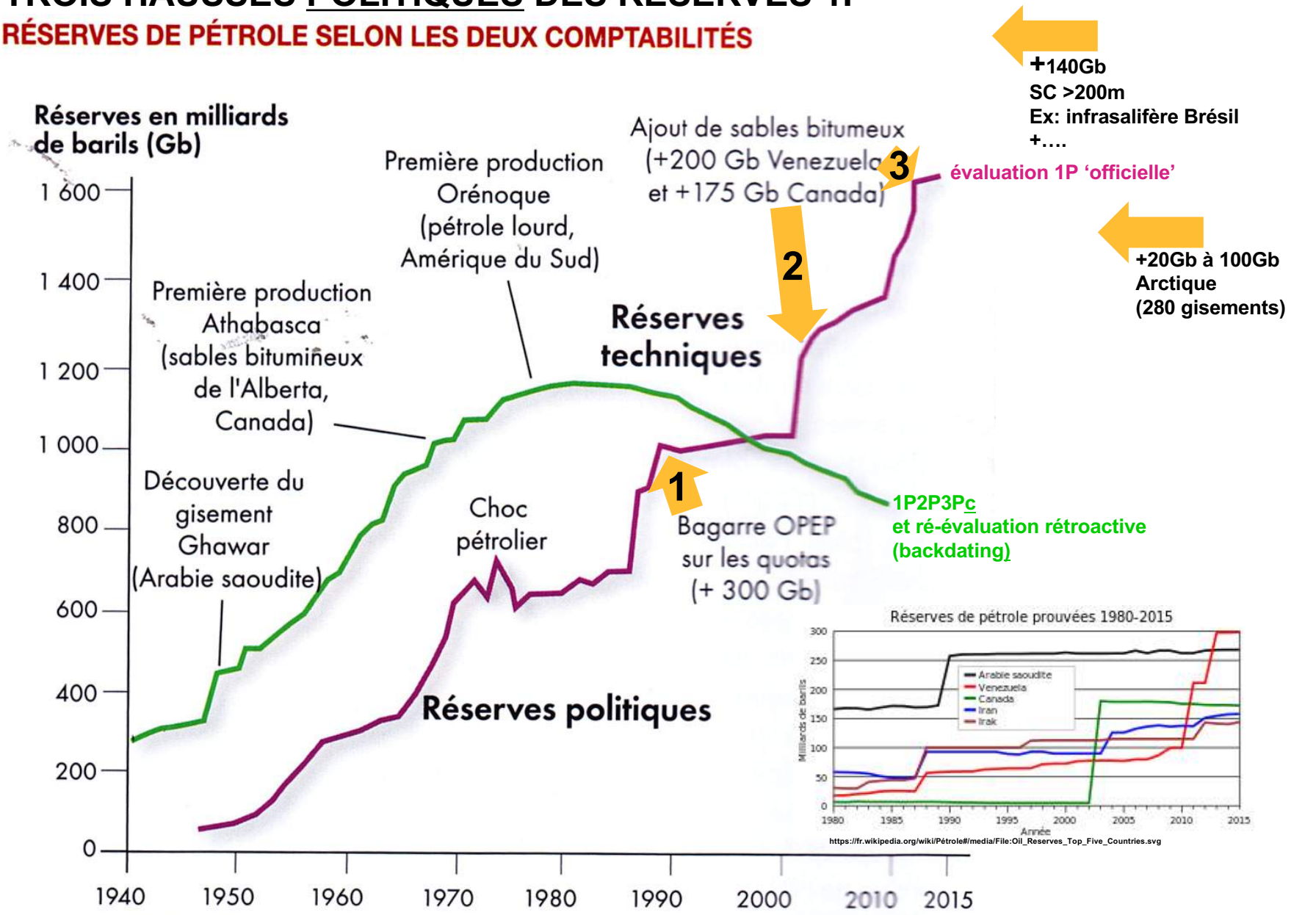




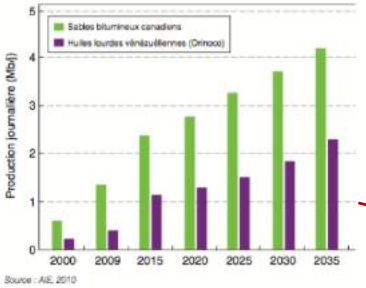
TROIS HAUSSES POLITIQUES DES RESERVES 1P

RÉSERVES DE PÉTROLE SELON LES DEUX COMPTABILITÉS

+DEUX HAUSSES TECHNOLOGIQUES

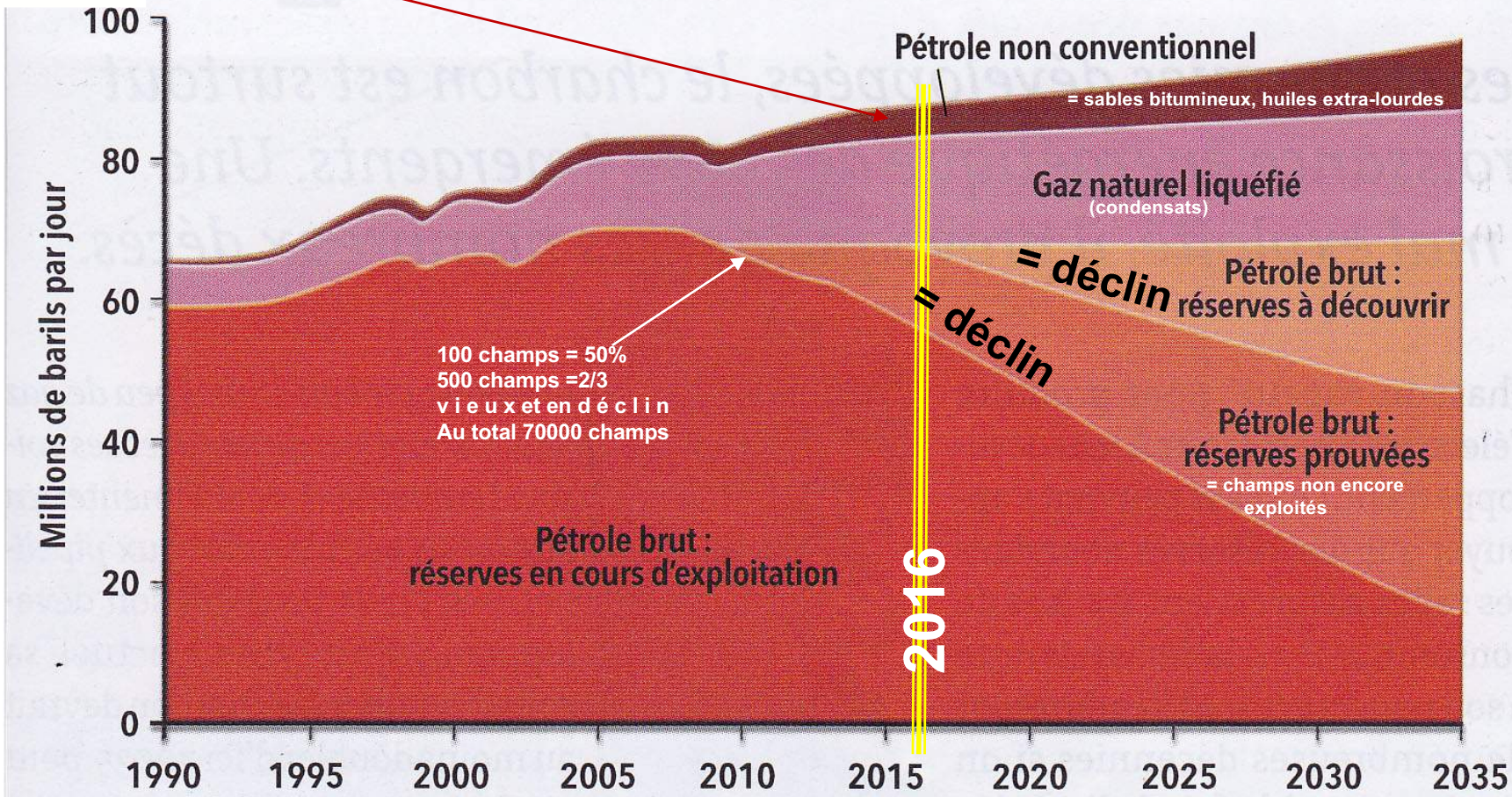


Source : J. LAHERRERE, « *Fiabilité des données énergétiques ?* », Club de Nice, XIIIe Forum annuel, novembre 2014.



Évolution de la production mondiale de pétrole

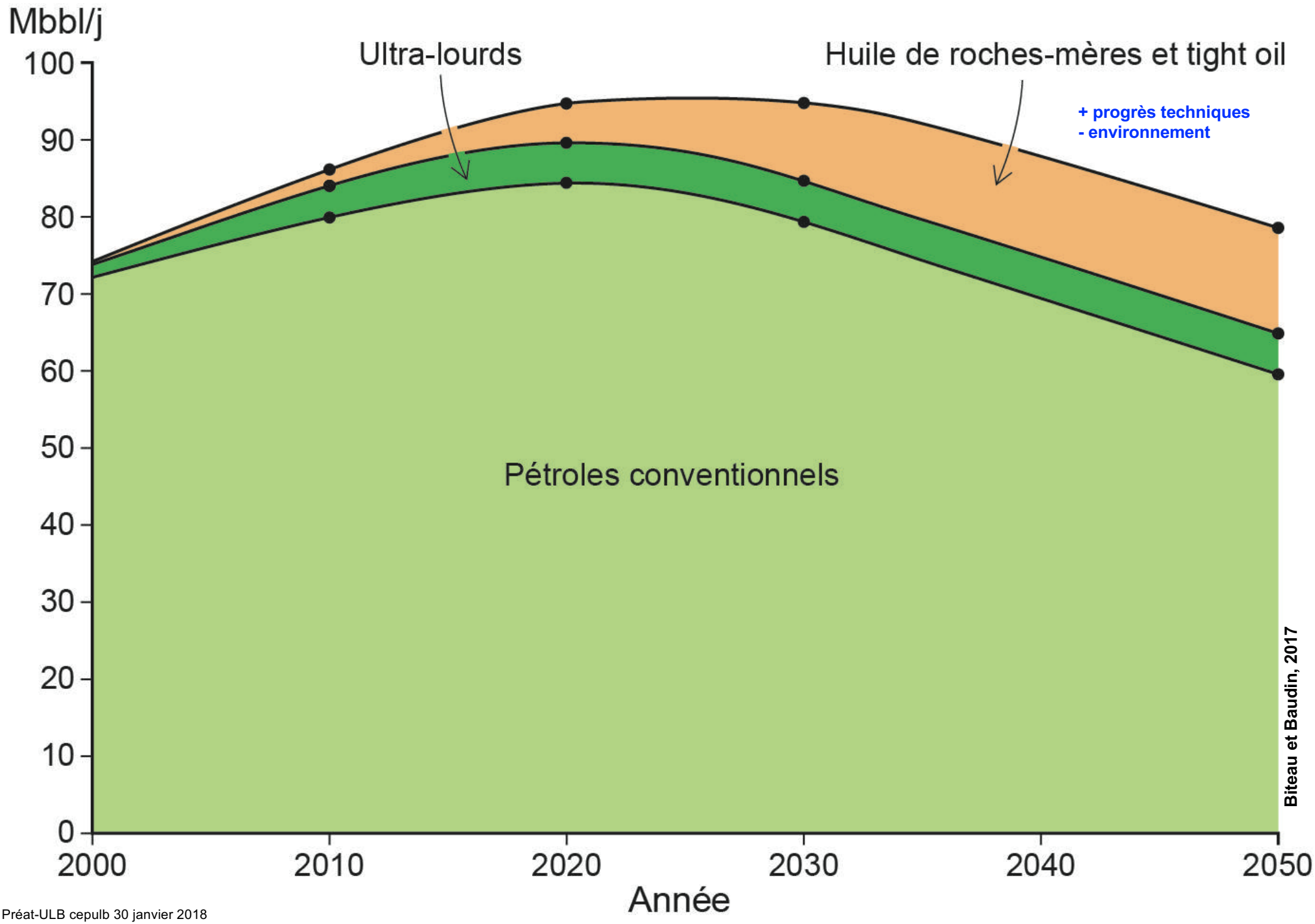
Ex : huiles lourdes Venezulea + sables Canada : 7 MMb:j 2035



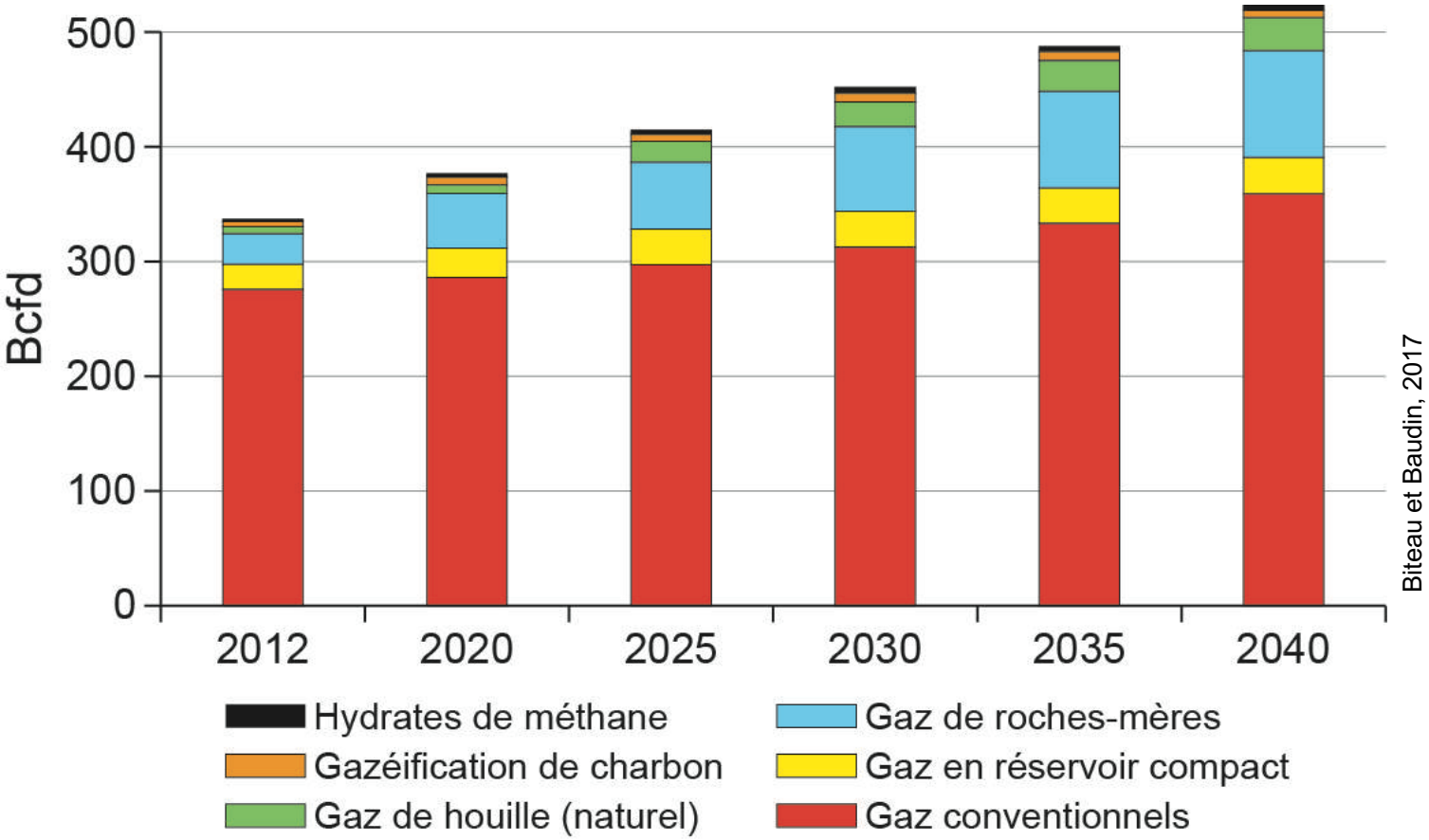
+EOR

LA PRODUCTION MONDIALE DE PÉTROLE provenant des réserves exploitées aujourd'hui baisse fortement à partir de 2010, selon l'AIE. Pour satisfaire à la demande, la production globale devra atteindre 96 millions de barils par jour en 2035. D'où le recours au pétrole non conventionnel et à des réserves à découvrir.

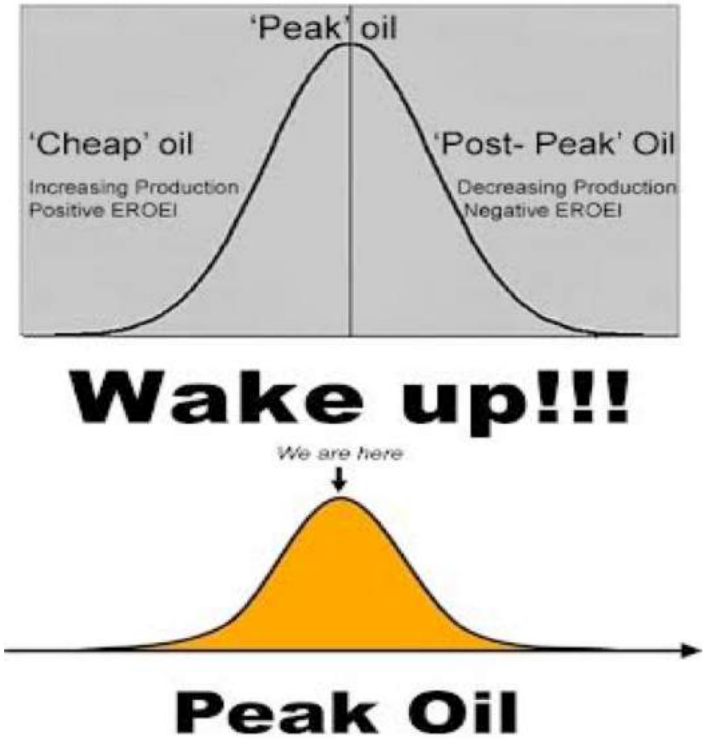
La Recherche 2012
IEA 2008



A. Préat-ULB cepulb 30 janvier 2018


500
400
300
200
100
0
Bcfd
2012
2020
2025
2030
2035
2040
Hydrates de méthane
Gazéification de charbon
Gaz de houille (naturel)
Gaz de roches-mères
Gaz en réservoir compact
Gaz conventionnels
Biteau et Baudin, 2017

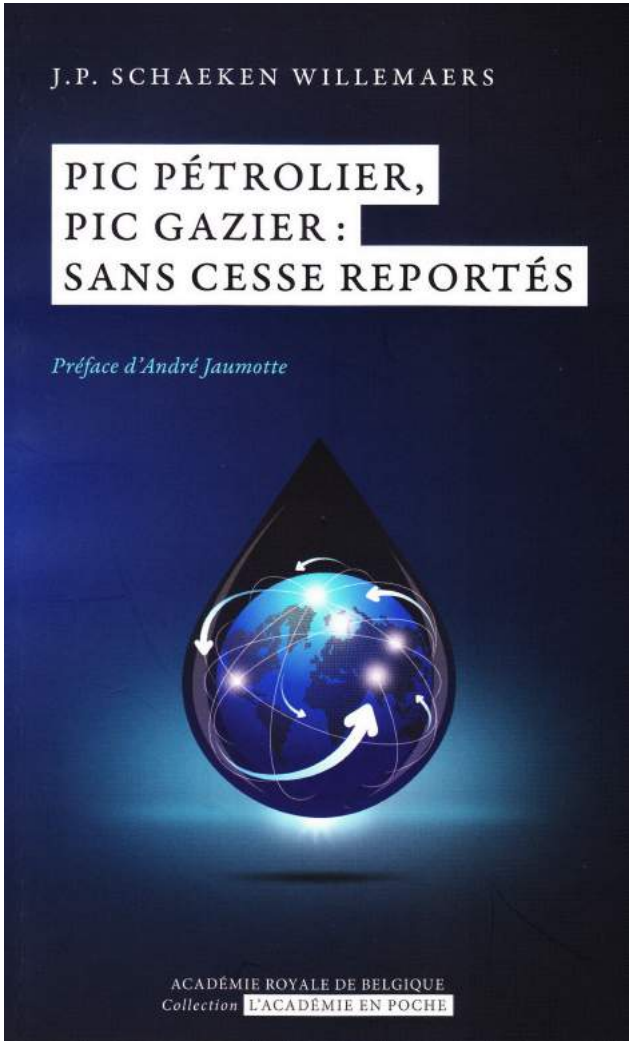
Le Pic pétrolier sans cesse reporté …..?



2005 => >2007 => 2011 = <2020 [Centre de Recherche Britannique sur l'Energie]

Sans parler du Club de Rome …. etc …. et de Marion King Hubbert (pic de Hubbert 1995-2000)

En 2005 l'AIE envisageait qu'à l'échéance 2025, l'Amérique importerait chaque année 20 millions de barils/jour
En 2012 : 10,6Mb/j, en 2013: 9,8Mb/j, en 2014 : 7,4Mb/j, en 2015 : 6,9Mb/j
En 2016 : 7,2 Mb/j



« *Le recours dans la durée au pétrole et au gaz est moins une question de pic ou de plateau de production que d'**adéquation entre l'offre et la demande**, d'une part, et d'**énergies de substitution**, d'autre part* ».

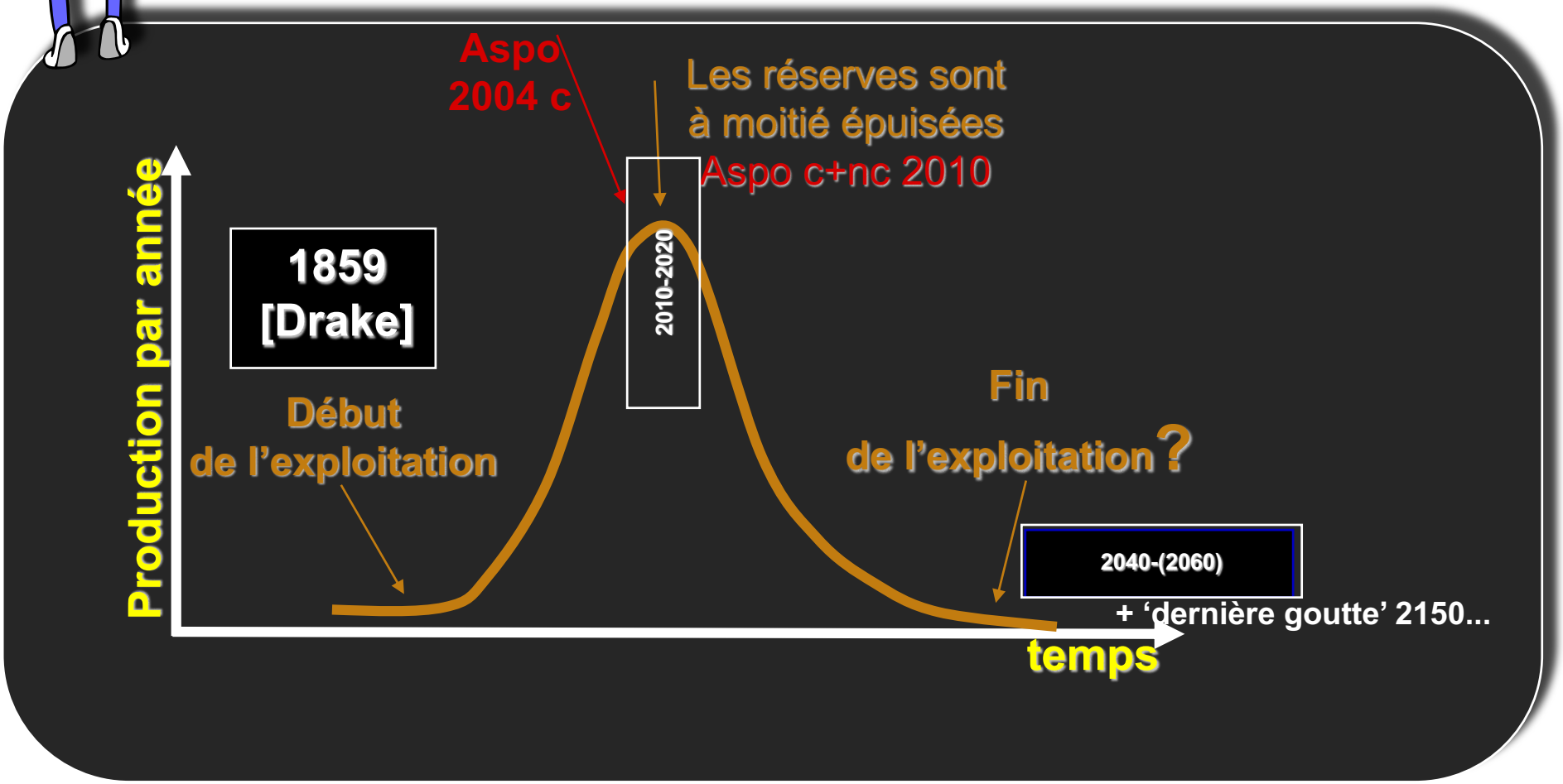
Jean-Pierre Schaeken Willemaers, Inst. Th. Moore, 2015

En attendant, un chiffre: 11,8%
hausse production mondiale pétrole entre 2003 et 2013

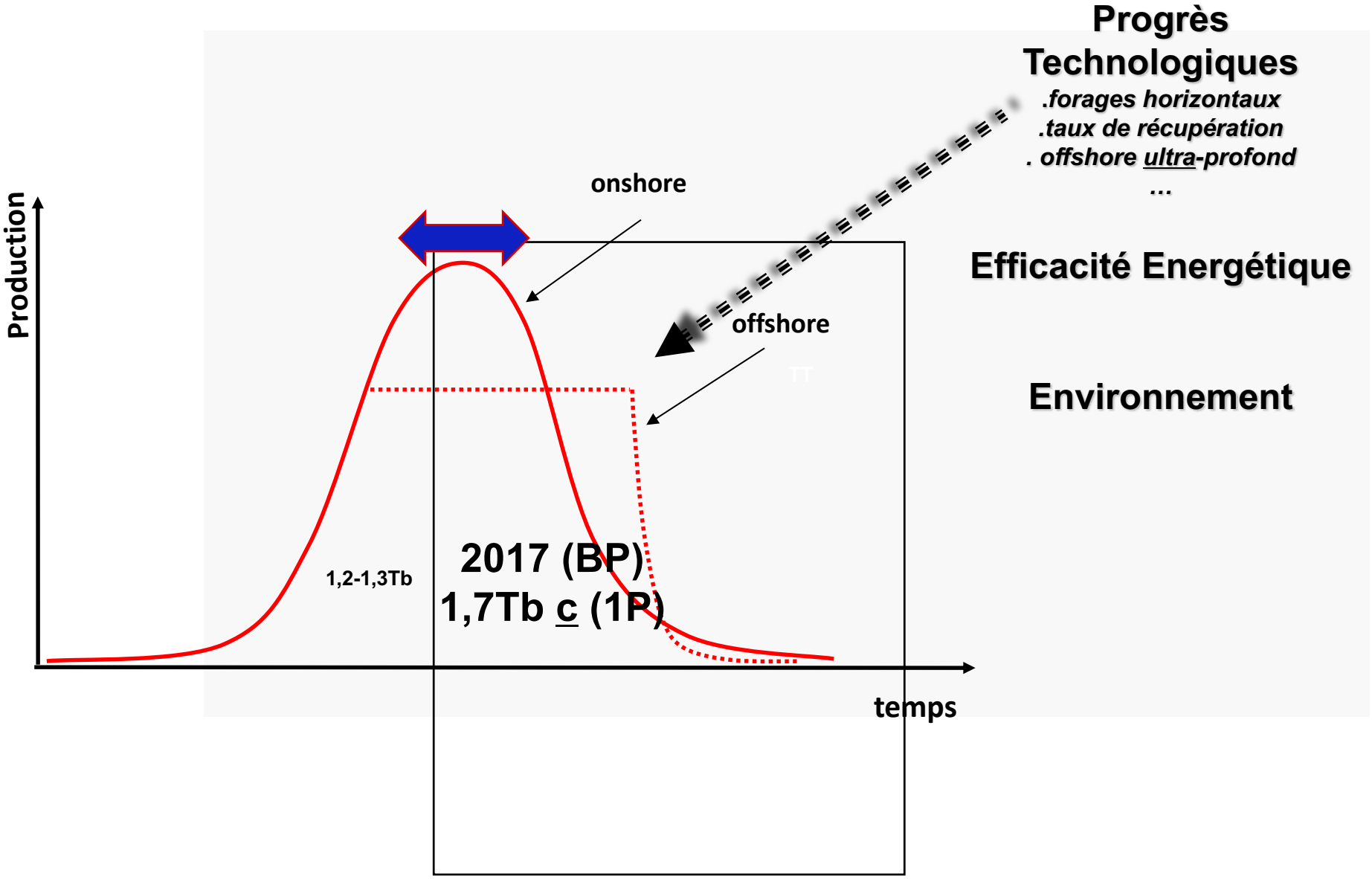
En attendant, un deuxième chiffre: 29,1%
hausse production mondiale gaz naturel entre 2003 et 2013

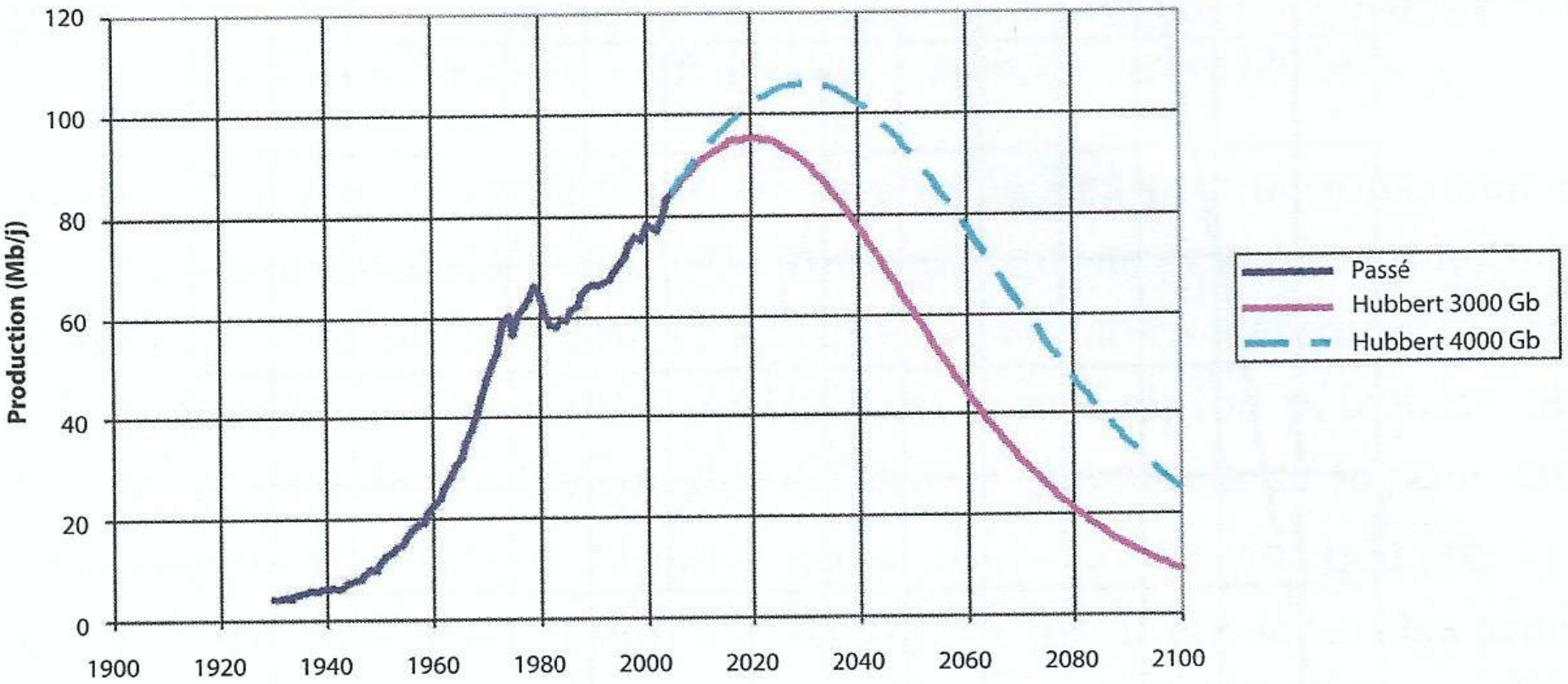
En attendant, un troisième chiffre: 50,9%
hausse production mondiale charbon entre 2003 et 2013

RESSOURCE: 6000Gb c et 7000Gb nc (≠ RESERVES)



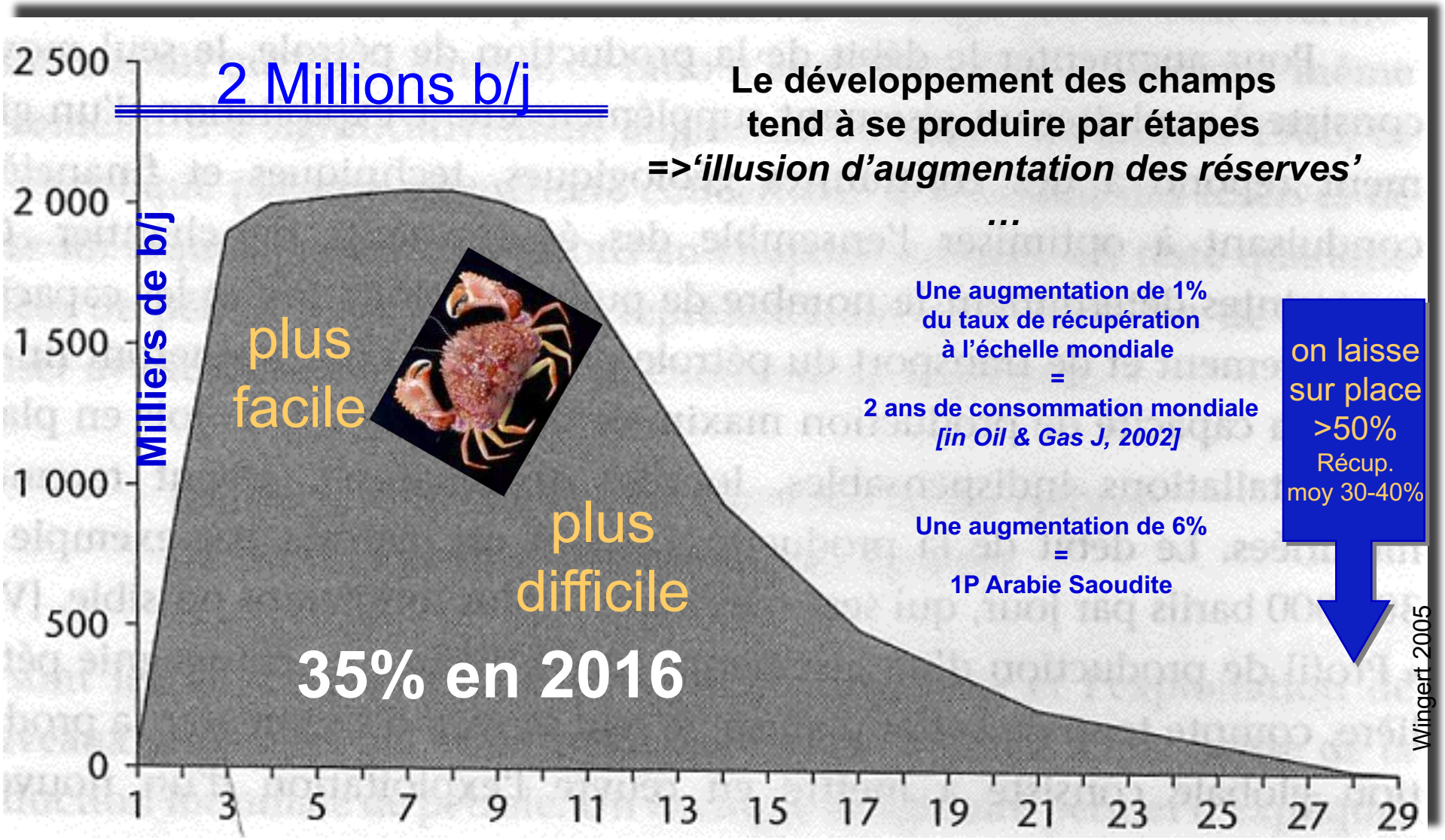
Production d'huile: la courbe en cloche





Courbes de Hubbert IFPEN, in Babusiaux et Bauquis, 2017

PROFIL TYPE DE PRODUCTION D'UN GISEMENT



Oil c
20%
15-35
5-10
∑40-(65)

Oil nc
15%

Gas
75%

Ex. d'un champ géant de 10 Gb étalé sur 30 ans avec un maximum de 2 Mb/jour.

La courbe n'est pas symétrique…

La diminution de la pression est de 12,5% (moy)/an en Mer du Nord (analyse de 77 champs).

Le taux global de déclin 'mondial' est de 5 à 6%...

LES SOURCES D'ENERGIES PRIMAIRE

- **ENERGIES FOSSILES = énergies concentrées mais non renouvelables** [*E solaire stockée au cours des temps géologiques*]

  ◊ Charbon ◊◊ Pétrole ◊◊◊ Gaz naturel

- **ENERGIES NUCLEAIRES = énergies très concentrées**

  un gramme U^{235} = autant d'E qu'une tonne de pétrole!, 1cm^3 =19g U^{235} =47,5 T charbon!

  ◊ Fission [*Centrales nucléaires actuelles*] ◊◊ Fusion [...]

- **ENERGIES RENOUVELABLES = énergies diluées ou diffuses mais renouvelables**

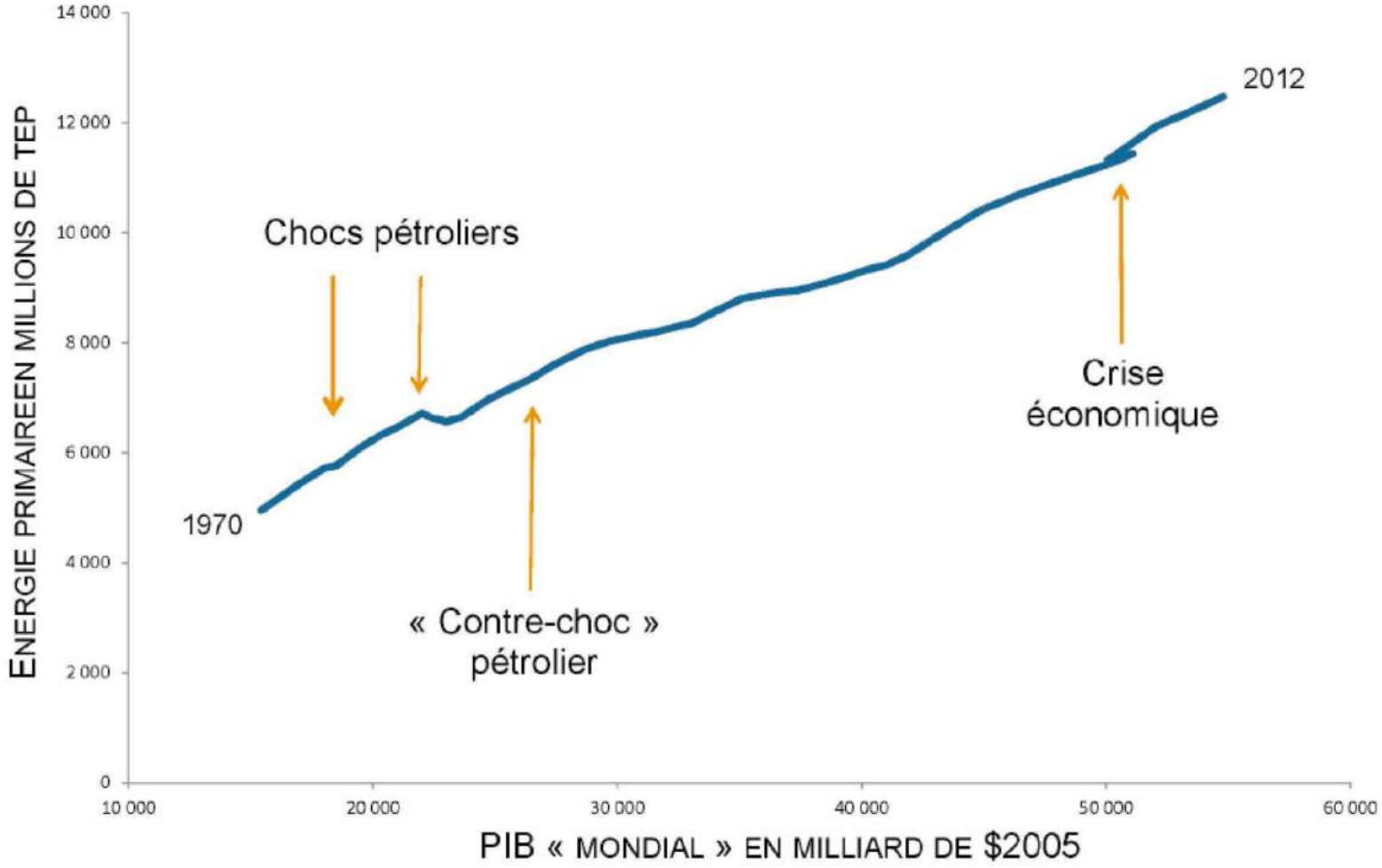
  ◊ Hydraulique ◊◊ Solaire ◊◊◊ Eolienne

  ◊◊◊◊ Biomasse ◊◊◊◊◊ Géothermie

en 1h le Soleil déverse 'notre' Energie mondiale de 365 jours
ou il déverse 15000X notre consommation mondiale à chaque instant

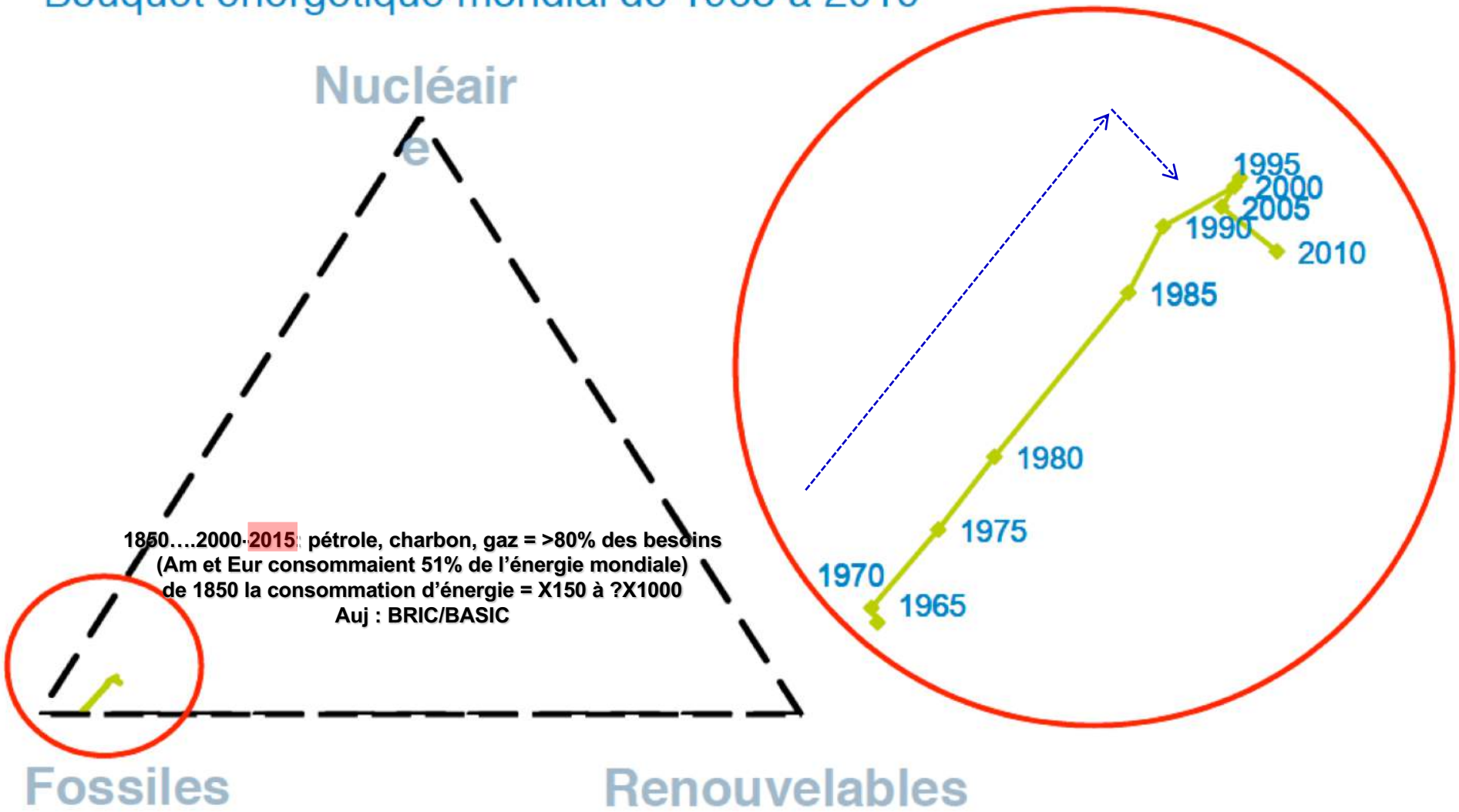
Le temps de l'énergie est un temps long

Lien Énergie - PIB



Le temps de l'énergie est un temps long

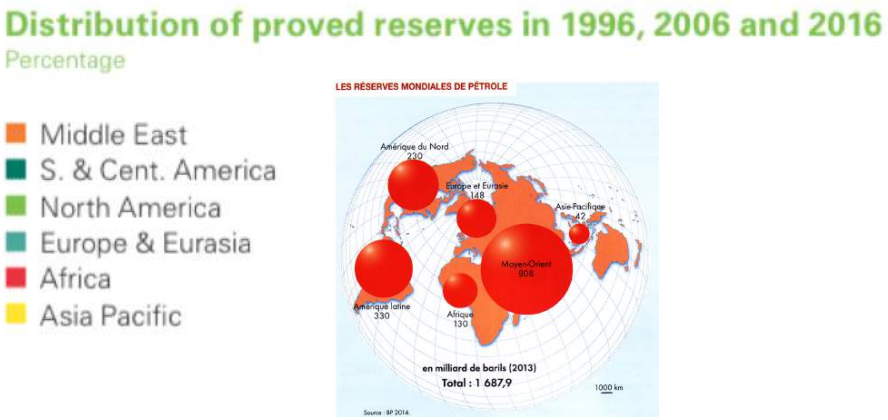
Bouquet énergétique mondial de 1965 à 2010

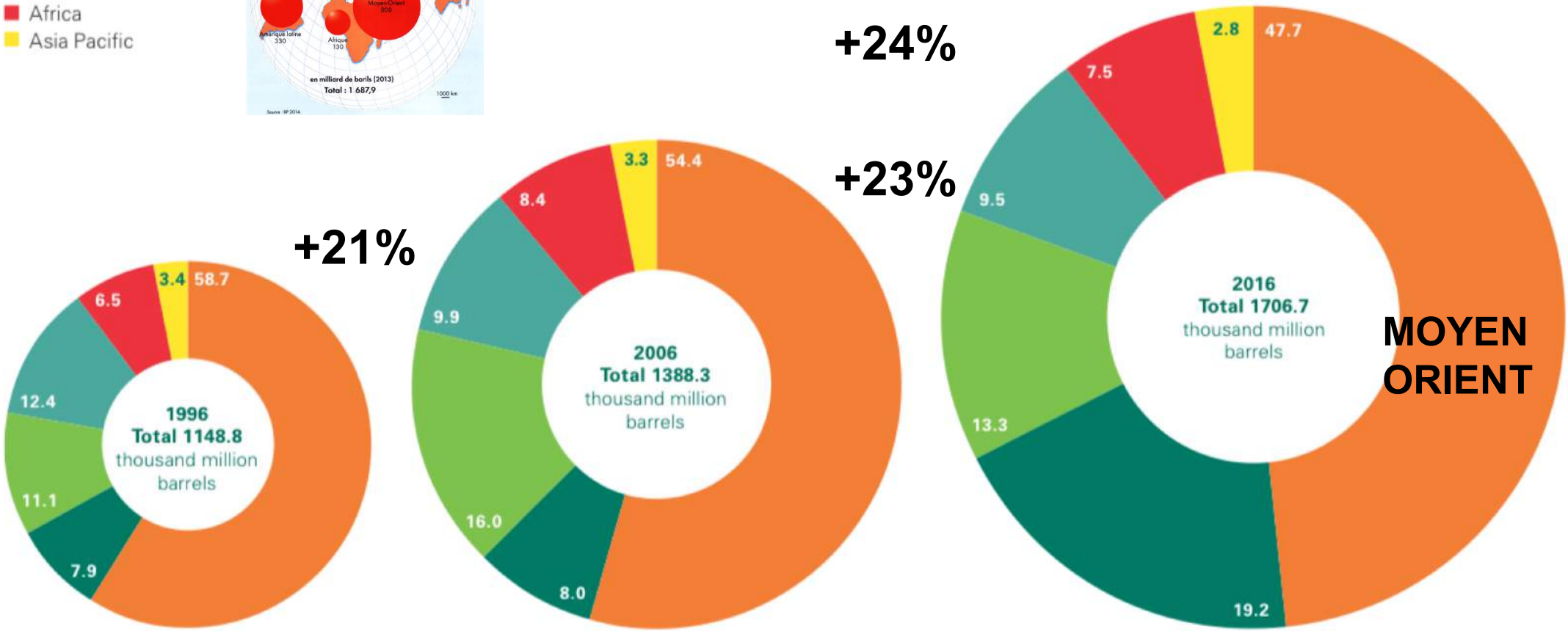


1P OIL

En 2015, les ressources <u>récupérables</u> de pétrole <u>non-conventionnel</u> sont évaluées par l'AIE à 3300-5000 milliards de barils y compris les sables bitumineux

En 2015, les <u>réserves prouvées</u> (1P) de pétrole conventionnel sont estimées à 1700 milliards de barils et de 2700 à 3300 milliards de barils <u>récupérables</u> (BP, AIE… 2016)





1707 Gb ou 1,7 trillions de barils

BP2017

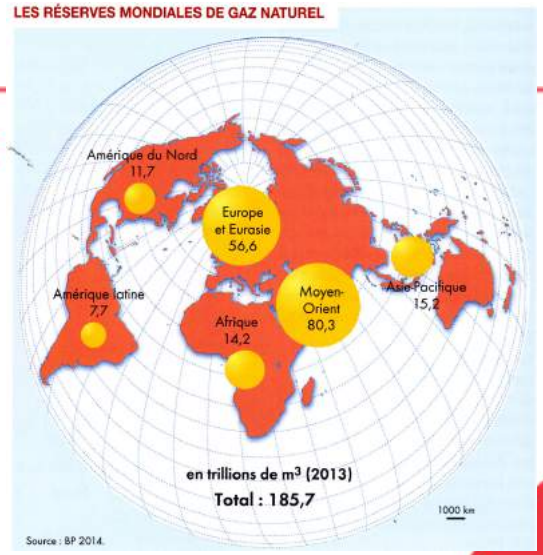
PETROLE c

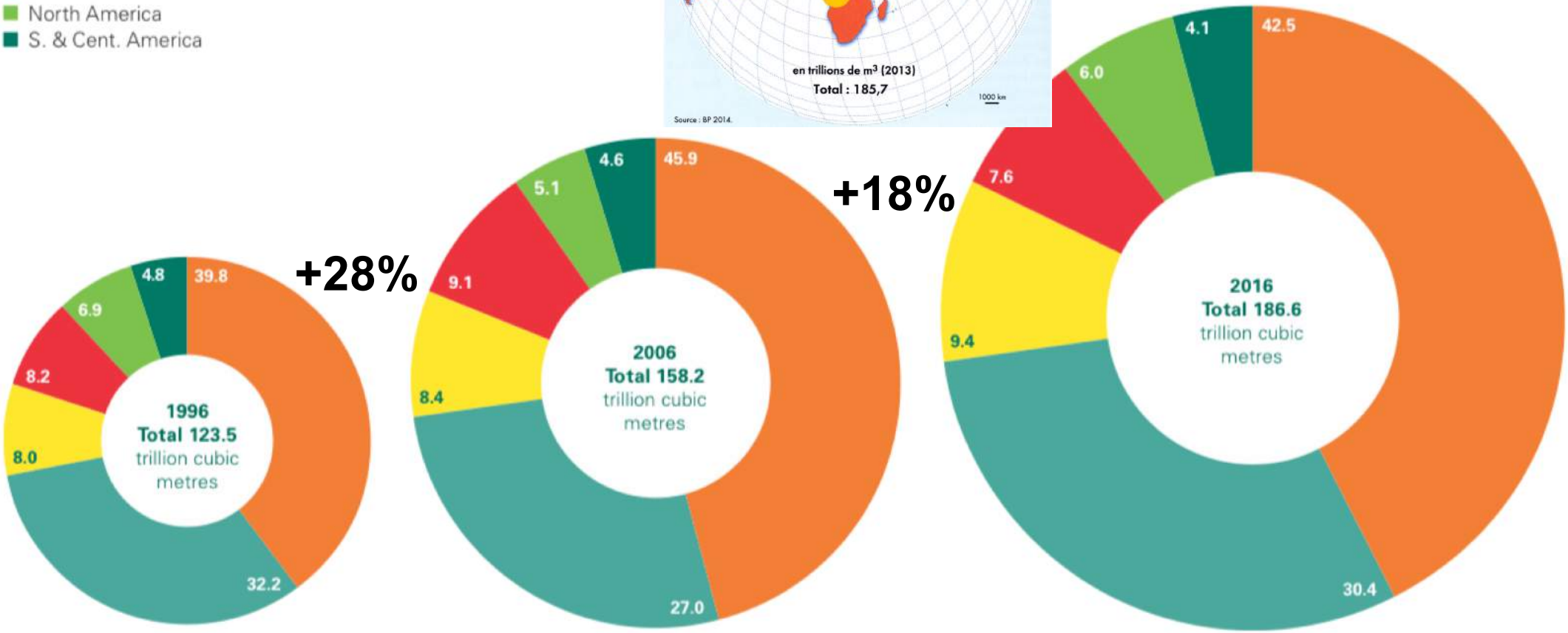
Réserves Prouvées end of 2016 (BP) [±5%?]

Rés Prouvées	Oil Gbl	%	Gas %
Arabie Saoudite	266,5	15,6	4,5
Canada	171,5	10,0	1,2
Iran	158,4	9,3	18,0
Irak	153,0	9,0	2,0
Koweit	101,5	5,9	1,0
Emirats Ar Unis	97,8	5,7	3,3
Venezuela	300,9*	17,6	3,1
Russie	109,5	6,4	17,3
Libye	48,4	2,8	0,8
Nigeria	37,1	2,2	2,8
USA	48,0	2,8	4,7
Chine	25,7	1,5	2,9
Mexique	8,0	0,5	**0,1**
Norvège	7,6	0,4	0,9
Algérie	12,2	0,7	2,4
Qatar	25,27	1,5	13,0
Australie	4,0	0,2	1,9
India	3,6	0,2	0,7

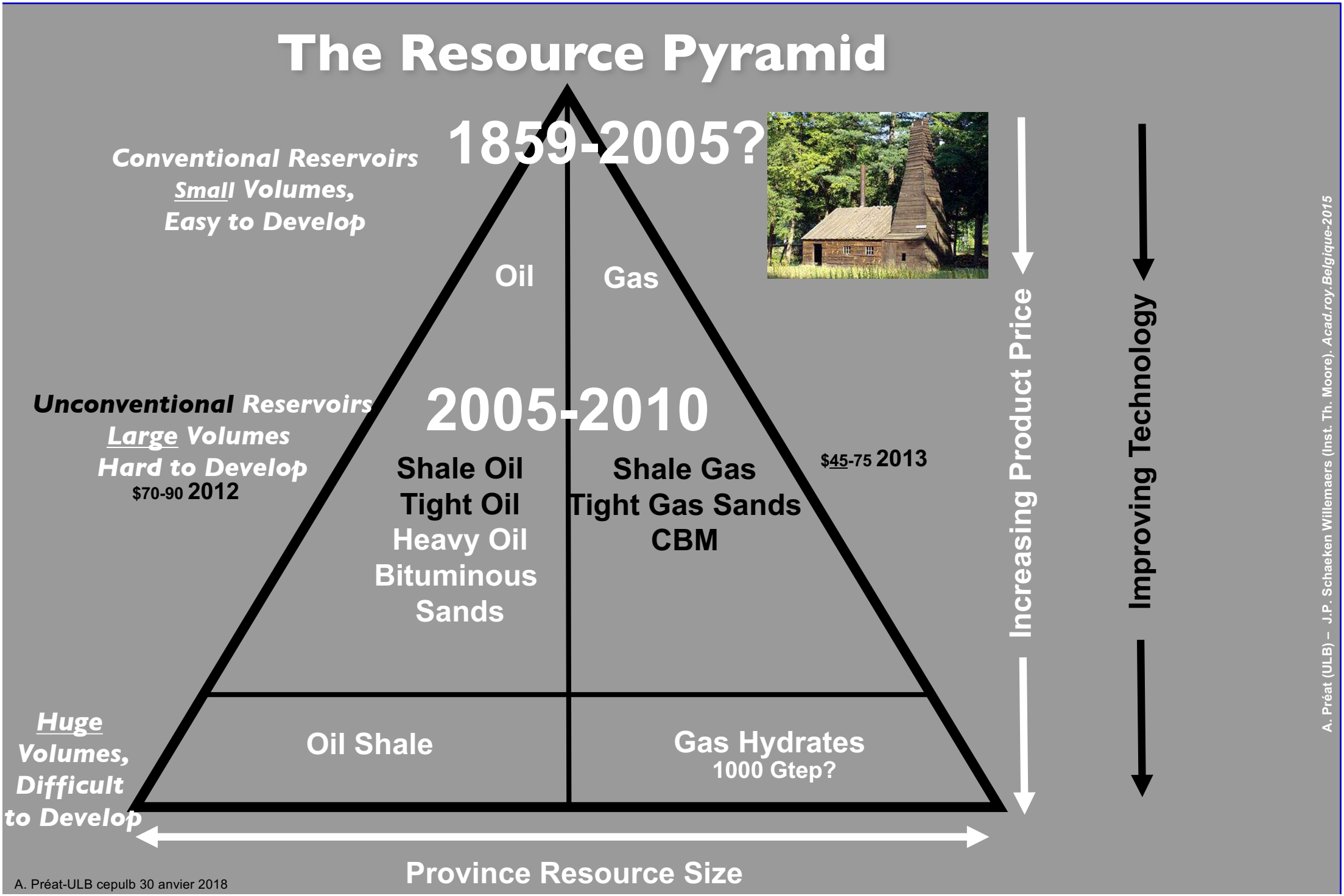
http://www.bp.com

1P GAZ c

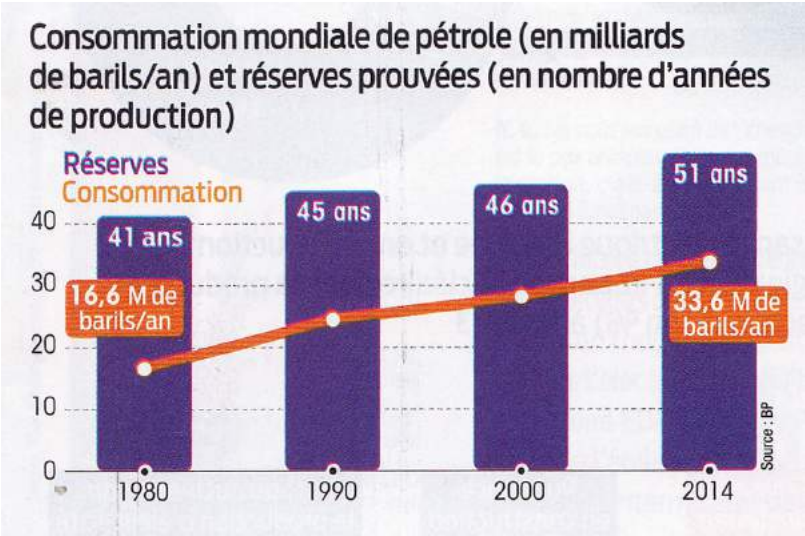

LES RÉSERVES MONDIALES DE GAZ NATUREL
Amérique du Nord
11,7
Europe
et Eurasie
56,6
Amérique latine
7,7
Moyen-
Orient
80,3
Afrique
14,2
Asie-Pacifique
15,2
en trillions de m³ (2013)
Total : 185,7
1000 km
Source : BP 2014.


Distribution of proved reserves in 1996, 2006 and 2016
Percentage
Middle East
Europe & Eurasia
Asia Pacific
Africa
North America
S. & Cent. America
1996
Total 123.5
trillion cubic
metres
39.8
32.2
8.0
8.2
6.9
4.8
+28%
2006
Total 158.2
trillion cubic
metres
45.9
27.0
8.4
9.1
5.1
4.6
+18%
2016
Total 186.6
trillion cubic
metres
42.5
30.4
9.4
7.6
6.0
4.1

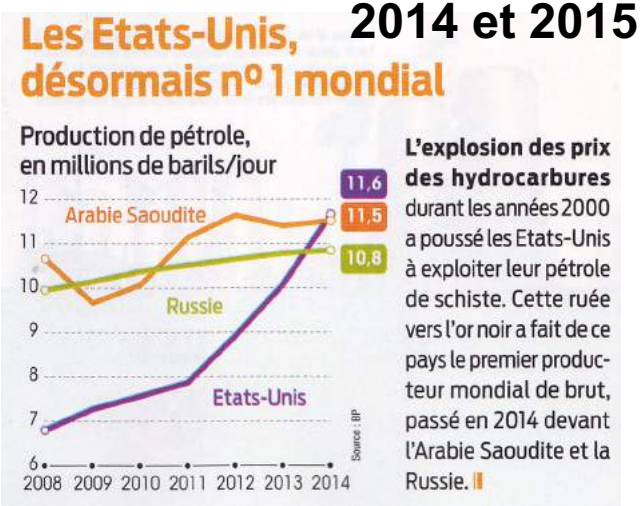
The Resource Pyramid



A. Préat-ULB cepulb 30 anvier 2018



2014 et 2015



-0.02%

Oil Production (10^6b/d), BP 2016	2005	2006	2007	2008	*2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
Total World	81896	82487	82277	82818	81182	83283	84097	86218	86591	88834	91670	3.2%	100.0%
of which: OECD	19894	19458	19141	18434	18443	18535	18571	19474	20623	22541	**23534**	4.4%	24.9%
Non-OECD	62003	63029	63136	64384	62739	64748	65525	66744	65968	66293	**68136**	2.7%	75.1%
OPEC	35104	35570	35241	36269	33998	35149	36061	37536	36621	36652	**38226**	4.2%	41.4%
Non-OPEC	46792	46918	47036	46549	47184	48134	48035	48682	49970	52182	**53445**	2.4%	58.6%
European Union	2711	2471	2425	2264	2127	1987	1724	1528	1436	1414	**1507**	6.6%	1.6%
CIS	11793	12278	12758	12780	13213	13494	13543	13592	13799	13807	**13914**	0.7%	15.6%

Oil Consumption (10^6b/d), BP 2016													
Total World	84726	85728	87087	86578	85700	88765	89790	90663	92049	93109	95008	1.9%	100.0%
of which: OECD	50062	49886	49685	48067	46073	46608	46068	45509	45546	45128	**45643**	1.1%	47.5%
Non-OECD	34664	35842	37402	38511	39627	42157	43722	45154	46503	47982	**49365**	2.6%	52.5%
European Union	15154	15153	14860	14735	14020	13944	13506	12948	12707	12508	**12712**	1.5%	13.9%
CIS	3641	3811	3839	3893	3761	3822	4135	4233	4199	4283	**4091**	-5.1%	4.4%

Note :Differences between these world consumption figures and world production statistics are accounted for by stock changes, consumption of non-petroleum additives and substitute fuels, and unavoidable disparities in the definition, measurement of oil supply and demand data. <u>These differences account for less than 0.5%.</u>

On a déjà consommé 1200 Gb (août 2013)

31 décembre 2016 : 1707 Gb

Il resterait 51 ans de réserves 1P

[=1707 Gbl/33,5Gbl]

BP 2017

Pétrole conventionnel

- *si consommation > de 33,5Gbl/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…)*

2015: 690 Gb 2P3P = encore 20 ans…

31 décembre 2016 : 186,6Tm^3

Il resterait 52,7 ans de réserves 1P

[=186,6Tm^3/3,54Tm^3]

BP 2017

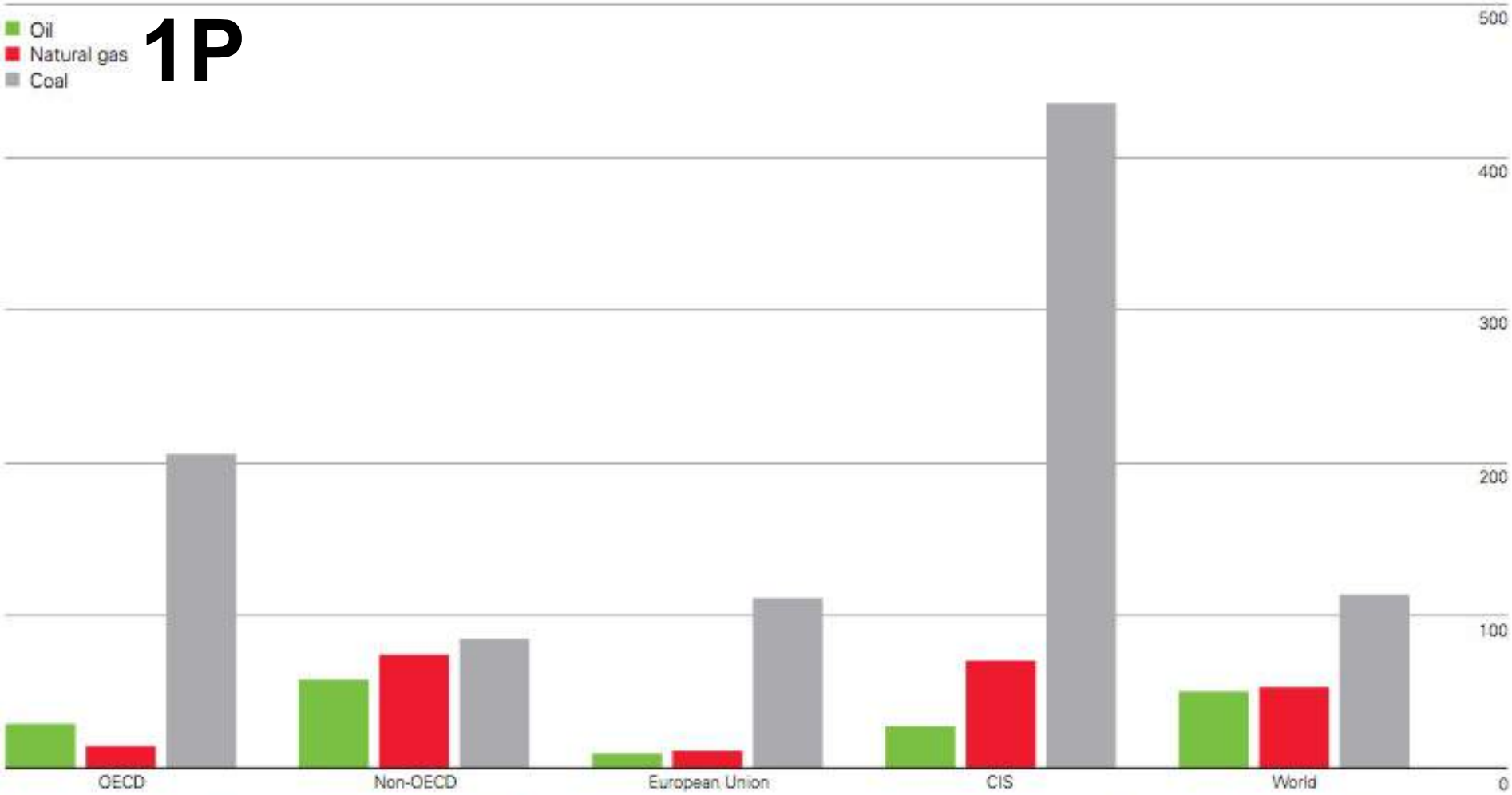
GAZ conventionnel

- *si consommation > de 3,5Tm^3/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…)*

2015: 150,4Tm^3 2P3P = encore 43 ans…

Fossil fuel reserves-to-production (R/P) ratios at end 2015

Years

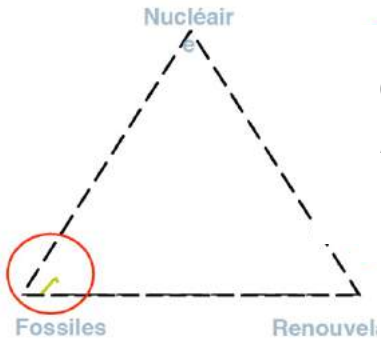


Coal remains – by far – the most abundant fossil fuel by R/P ratio; oil and natural gas reserves have increased over time, although both registered small declines in 2015. Non-OECD countries account for the majority of proved reserves for all fossil fuels. The Middle East holds the largest reserves for oil and natural gas, and the highest R/P ratio for natural gas; South & Central America holds the highest R/P ratio for oil. Europe & Eurasia holds the largest coal reserves and North America has the highest R/P ratio.

“*Comme nous manquons actuellement de gaz et pétrole, nous devons nous préparer rapidement à un troisième changement, à des économies strictes ainsi qu’à une utilisation du charbon et des sources d’énergies renouvelables permanentes telles que l’énergie solaire”*

Jimmy Carter, Allocution télévisée du 18 avril 1977

Conclusion : le temps de l’énergie est bien un temps long
… E solaire 2014: environ 0,7%



OIL PEAK

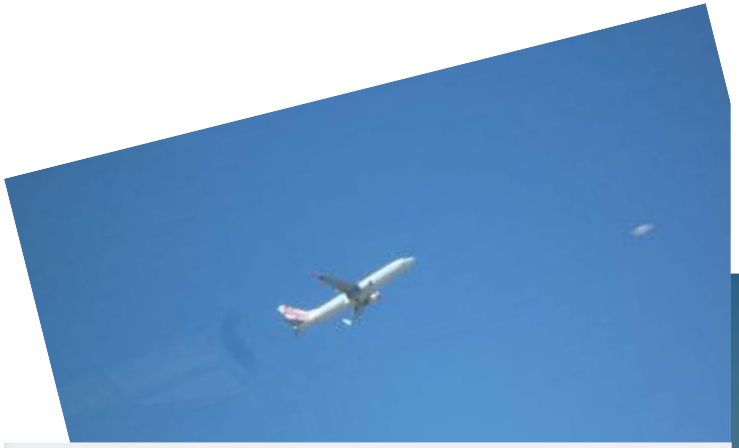
	ASPO	AIE	USGS	'optimistes'	
1990'	2014-2018	<2030	2037	2060	jamais

+10?ans GAS PEAK

+40?ans COAL PEAK

CONCLUSION

LE XXIème SIECLE DEVRAIT VOIR LE PIC PUIS LE DECLIN DE LA PRODUCTION PETROLIERE MONDIALE, MAIS CE DECLIN SERA PROBABLEMENT TRES PROGRESSIF CAR IL S'ACCOMPAGNERA DE HAUSSES DE PRIX QUI PERMETTRONT D'EXTRAIRE NOUVELLES RESERVES A PARTIR DE RESSOURCES DEJA DECOUVERTES



Le nombre de voyageurs transportés par avion a atteint 3,3 milliards en 2014

7 février 2015 | Agence France-Presse | Actualités économiques

Sur le même sujet

TRANSPORT AÉRIEN

Le nombre des passagers va doubler d'ici 2034, à 7 milliards

27 novembre 2015 | Agence France-Presse

Il y a en permanence 500 000 personnes en vol!

le mot de la fin…

‘Toute personne croyant qu’une croissance exponentielle peut durer indéfiniment dans un monde fini est soit un fou, soit un économiste’

Kenneth Boulding

1910-1993

President de l’American Economic Association