

# MASTER MANAGEMENT MARCHÉS DE L'ENERGIE

## - SÉMINAIRE PETROLE

### Fondamentaux, passé et perspectives

Hugo DUTERNE – Economiste, membre d'ASPO France

[hduterne@outlook.fr](mailto:hduterne@outlook.fr)

1<sup>er</sup> avril 2025



# Discours du président Nixon, 1973

As America has grown and prospered in recent years, our energy demands have begun to exceed available supplies. In recent months, we have taken many actions to increase supplies and to reduce consumption. But even with our best efforts, we knew that a period of temporary shortages was inevitable.

THE ENERGY EMERGENCY, The President's Address to the Nation  
November 7, 1973

# Plan du cours

**I. Nature du pétrole**

**II. Traitement et utilisation**

**III. Pétrole et économie**

**IV. Finitude des ressources**

**V. La situation européenne**





CentraleSupélec

- I. Nature du pétrole**
- II. Traitement et utilisation**
- III. Pétrole et économie**
- IV. Finitude des ressources**
- V. La situation européenne**



# Caractéristiques principales

*Heavier* ————— Weight (API Gravity) ————— *Lighter*



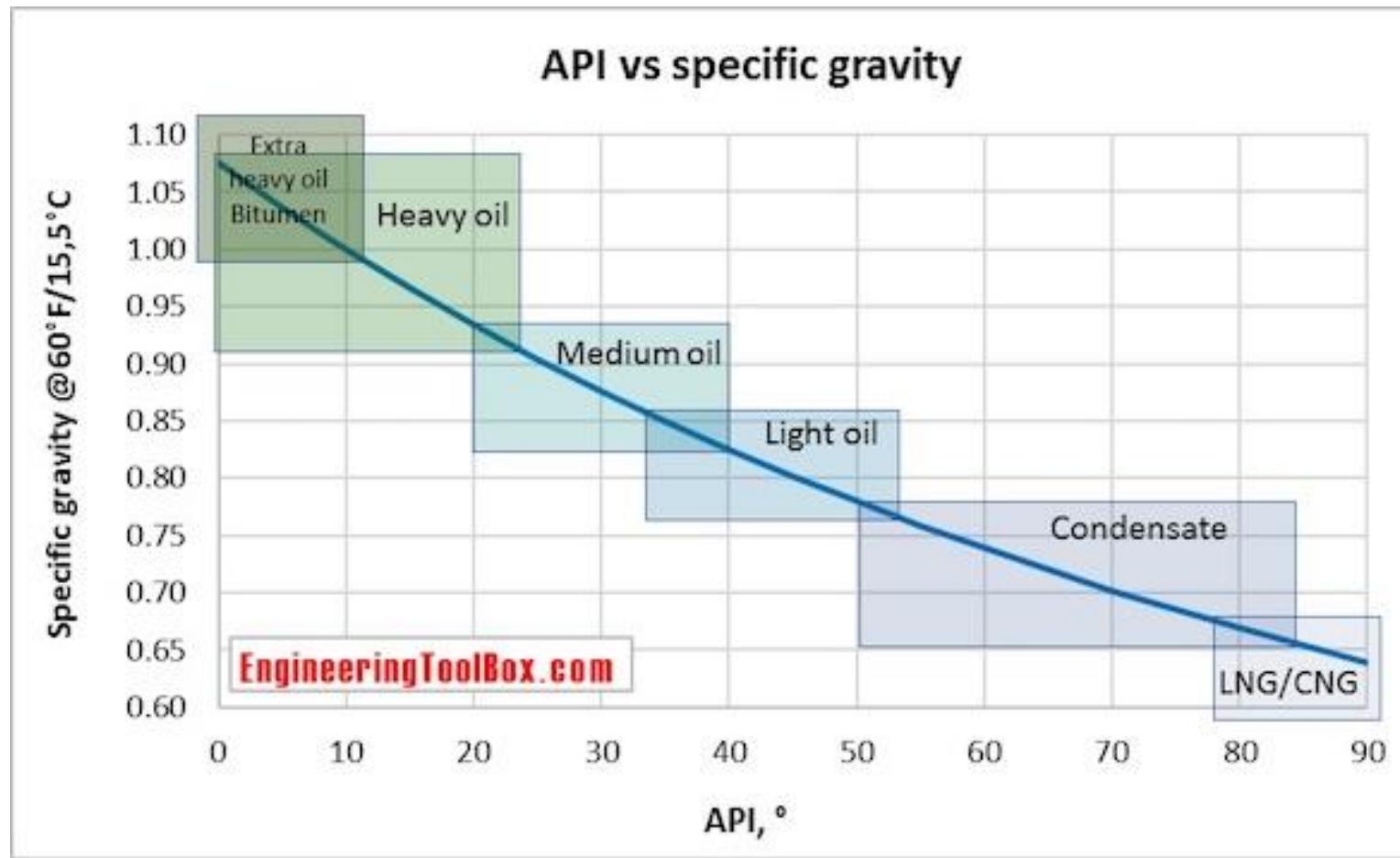
Liquide à température et pression ambiante

Molécules hydrocarbonées ( $C_nH_m$ )

Densité < eau

°API : 10 = densité de l'eau

# Caractéristiques principales



$$\text{API gravity} = \frac{141.5}{\text{SG}} - 131.5$$

# Origine biologique

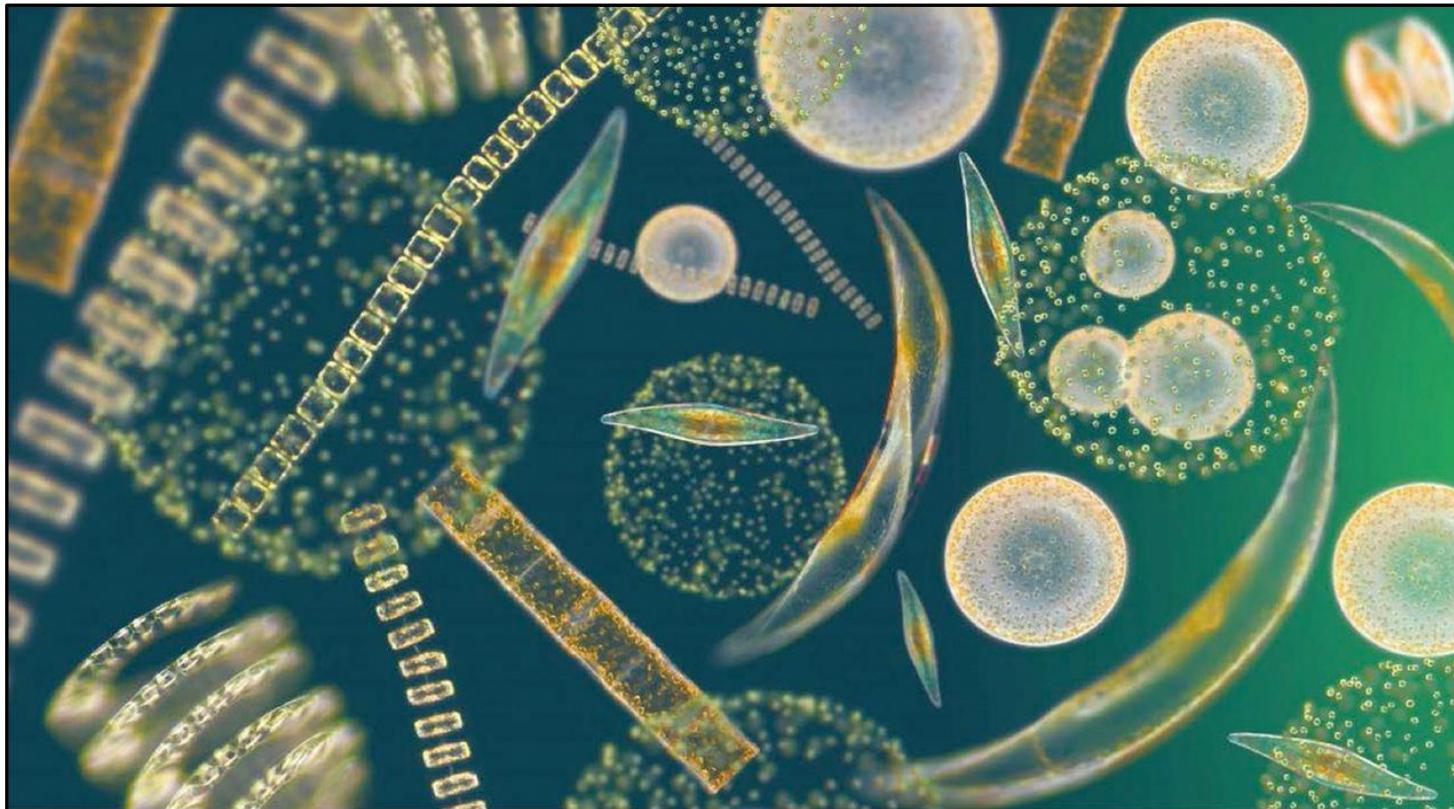


Figure 1 : Phytoplanctons au microscope, photo Richard Kirby

# Milieux de formation

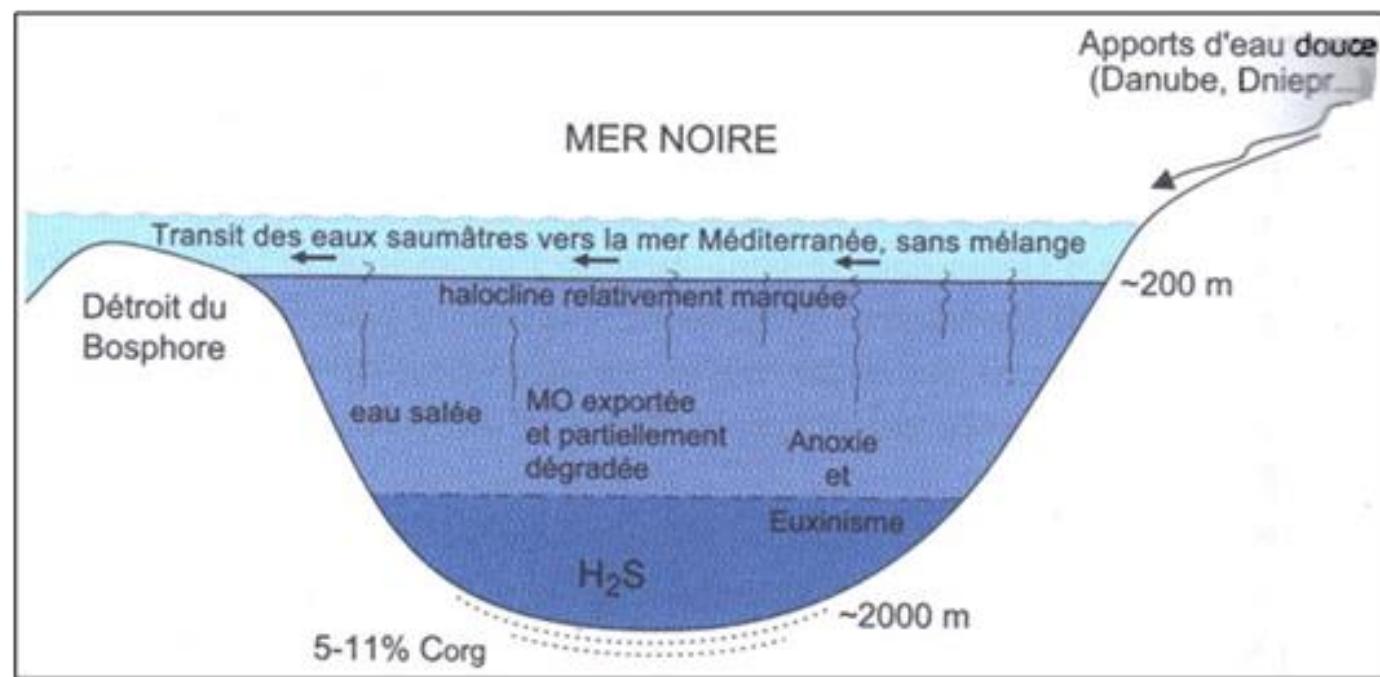
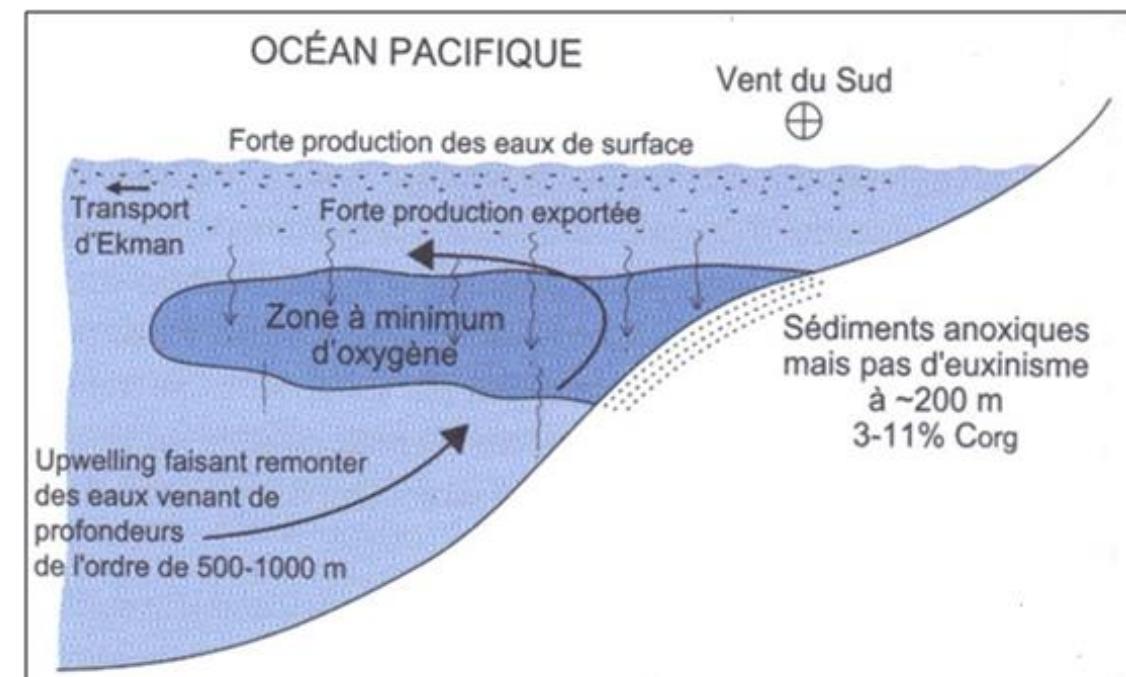


Figure 1 : Milieux propices à la formation de pétrole, cas de l'upwelling côtier (Biteau and Baudin, 2017)

Figure 1 : Milieux propices à la formation de pétrole, cas de la stratification haline des eaux (Biteau and Baudin, 2017)

# Milieux de formation

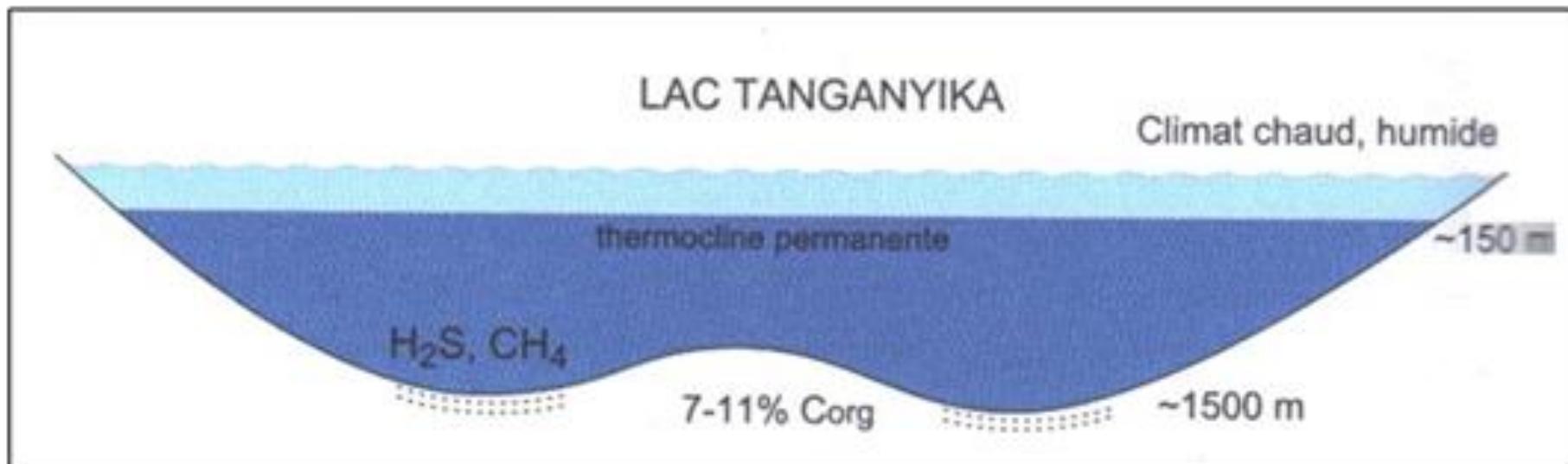
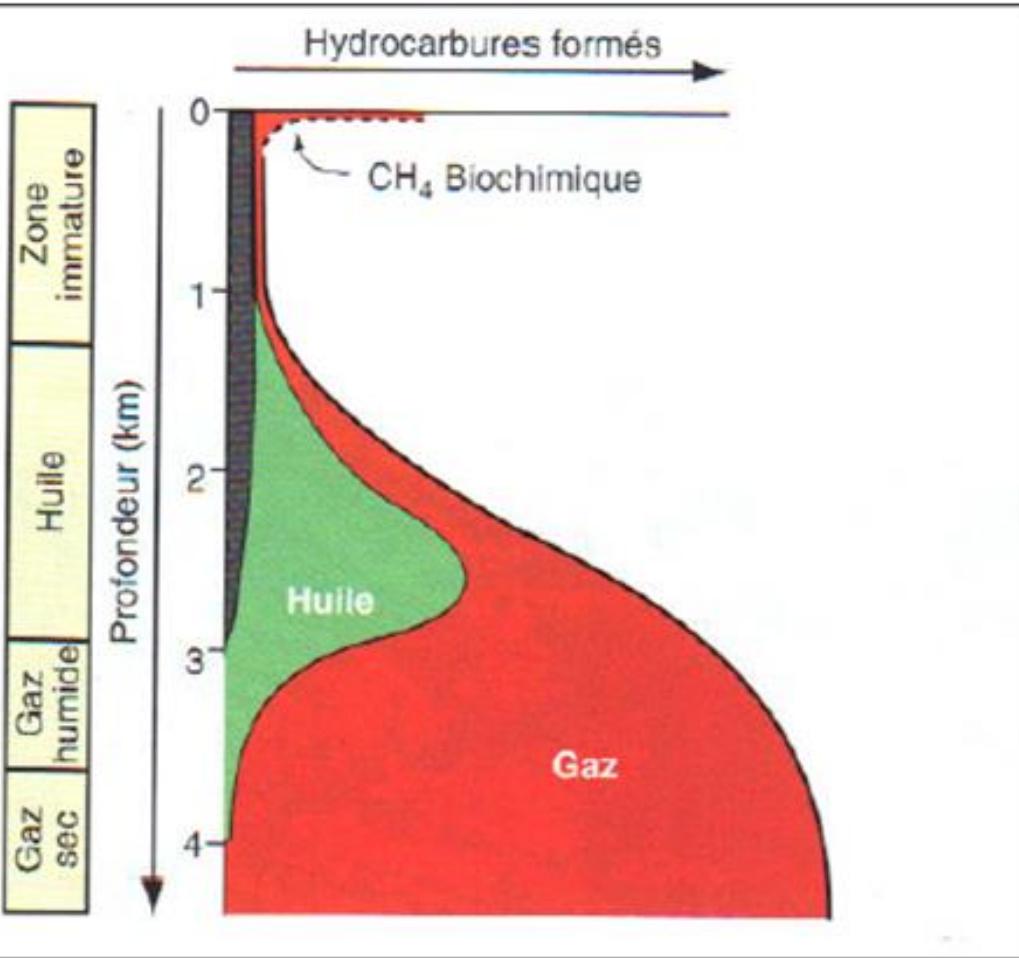


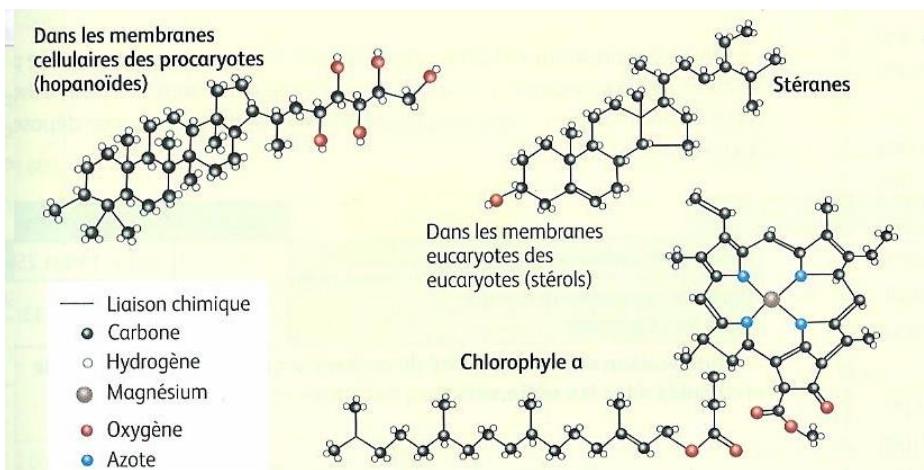
Figure 1 : Milieux propices à la formation de pétrole, cas de la stratification thermique des eaux (Biteau and Baudin, 2017)

# Formation du pétrole

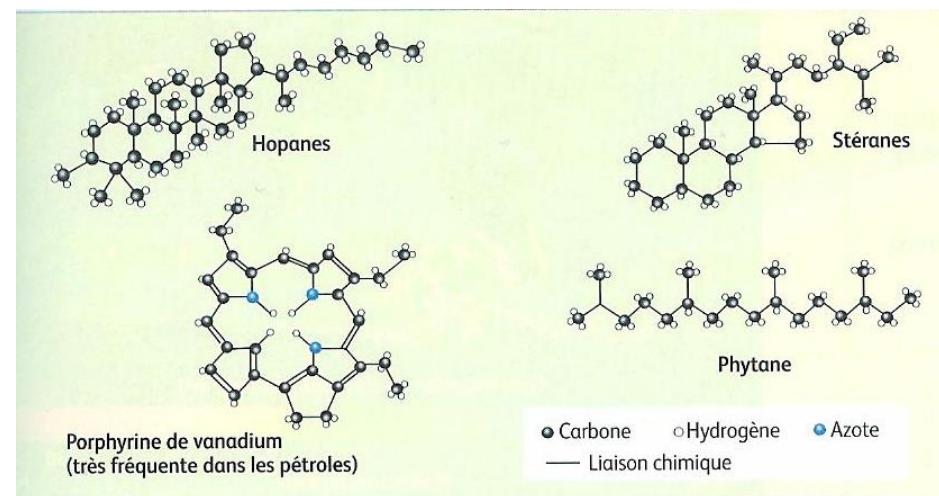


Le kérogène subit un craquage thermique (appelé également « pyrolyse ») sous l'effet de pressions et des températures géothermiques de plus en plus élevées (50 à 120°C), et il se transforme en partie en hydrocarbures.

# Formation du pétrole



Pyrolyse du kérogène



# Naissance d'un champ pétrolier

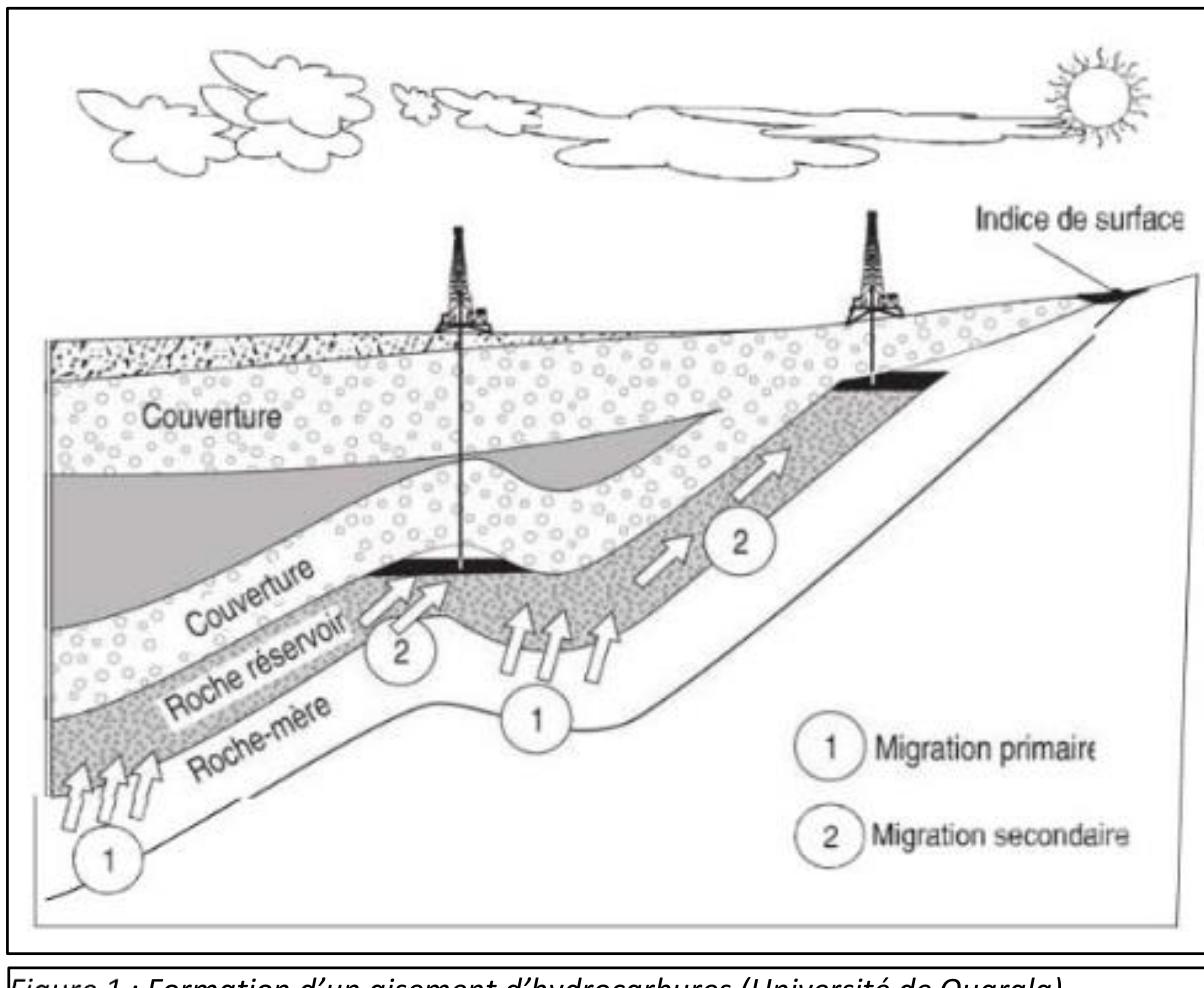


Figure 1 : Formation d'un gisement d'hydrocarbures (Université de Ouargla)

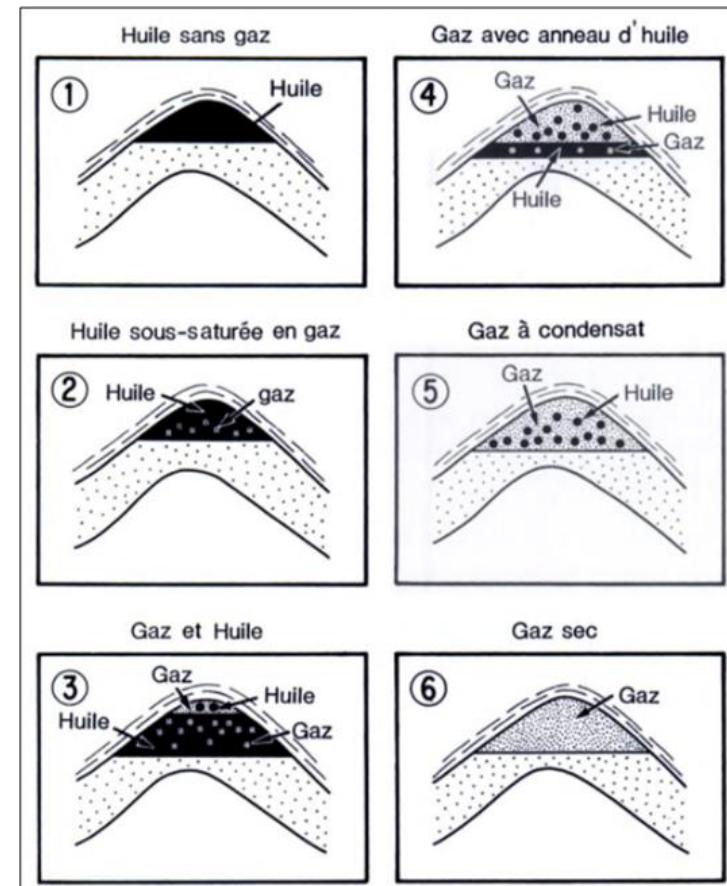
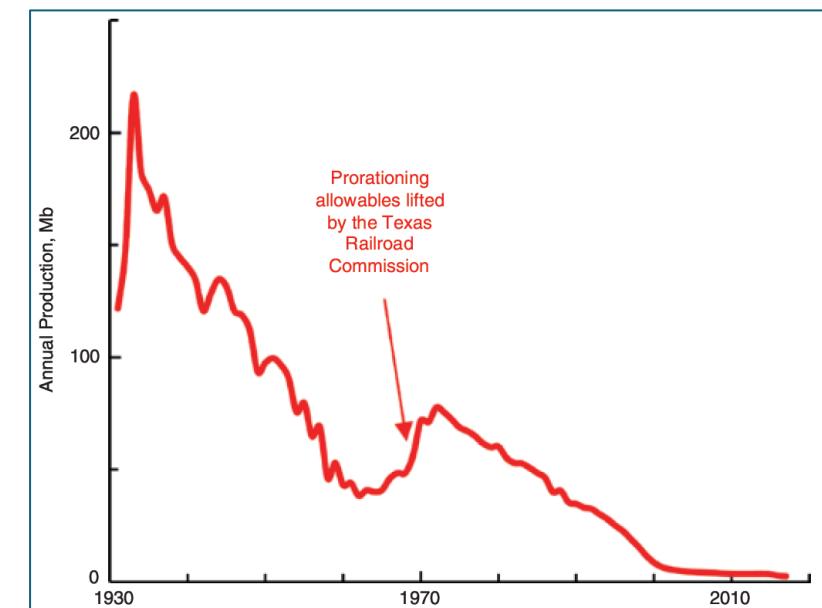
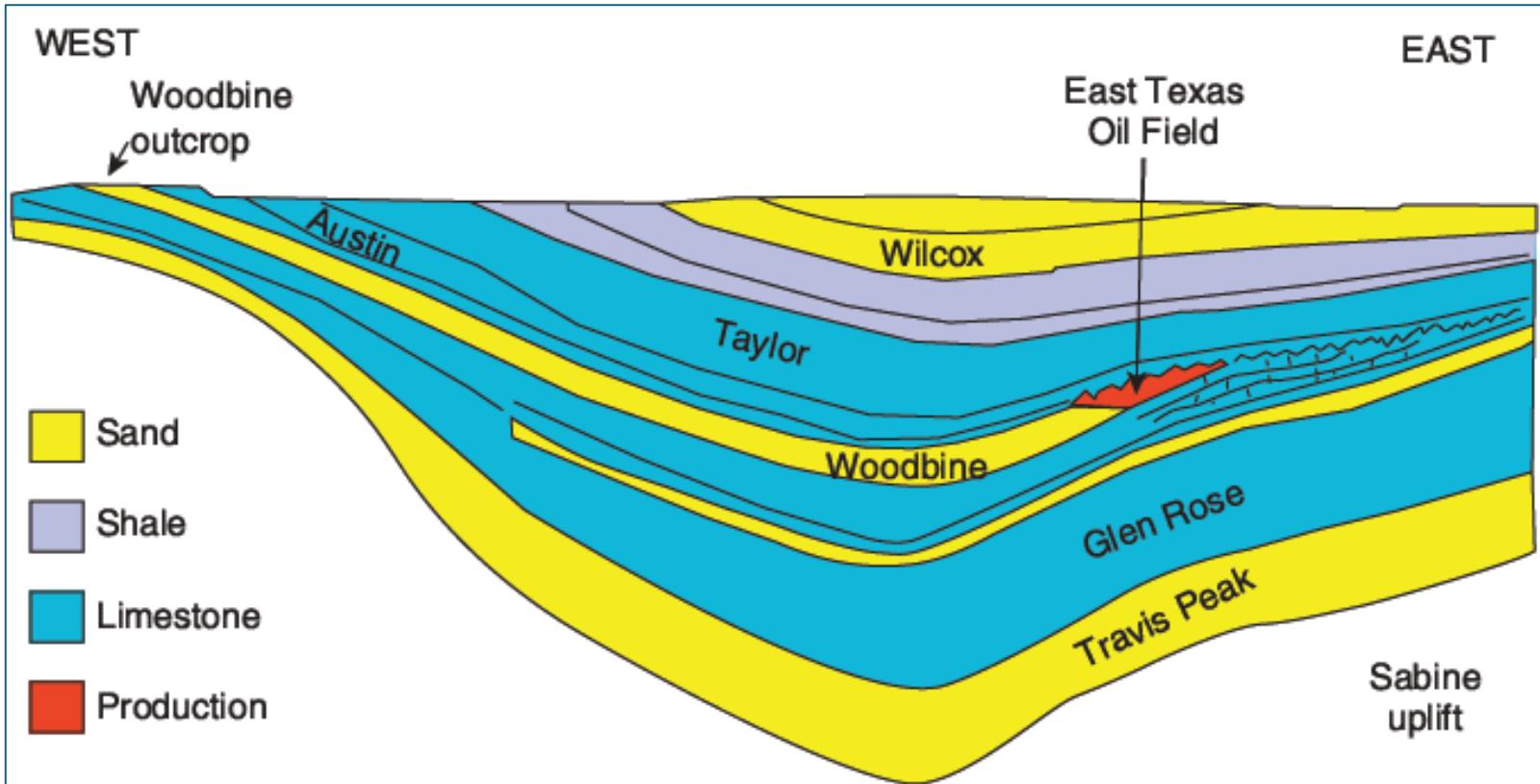
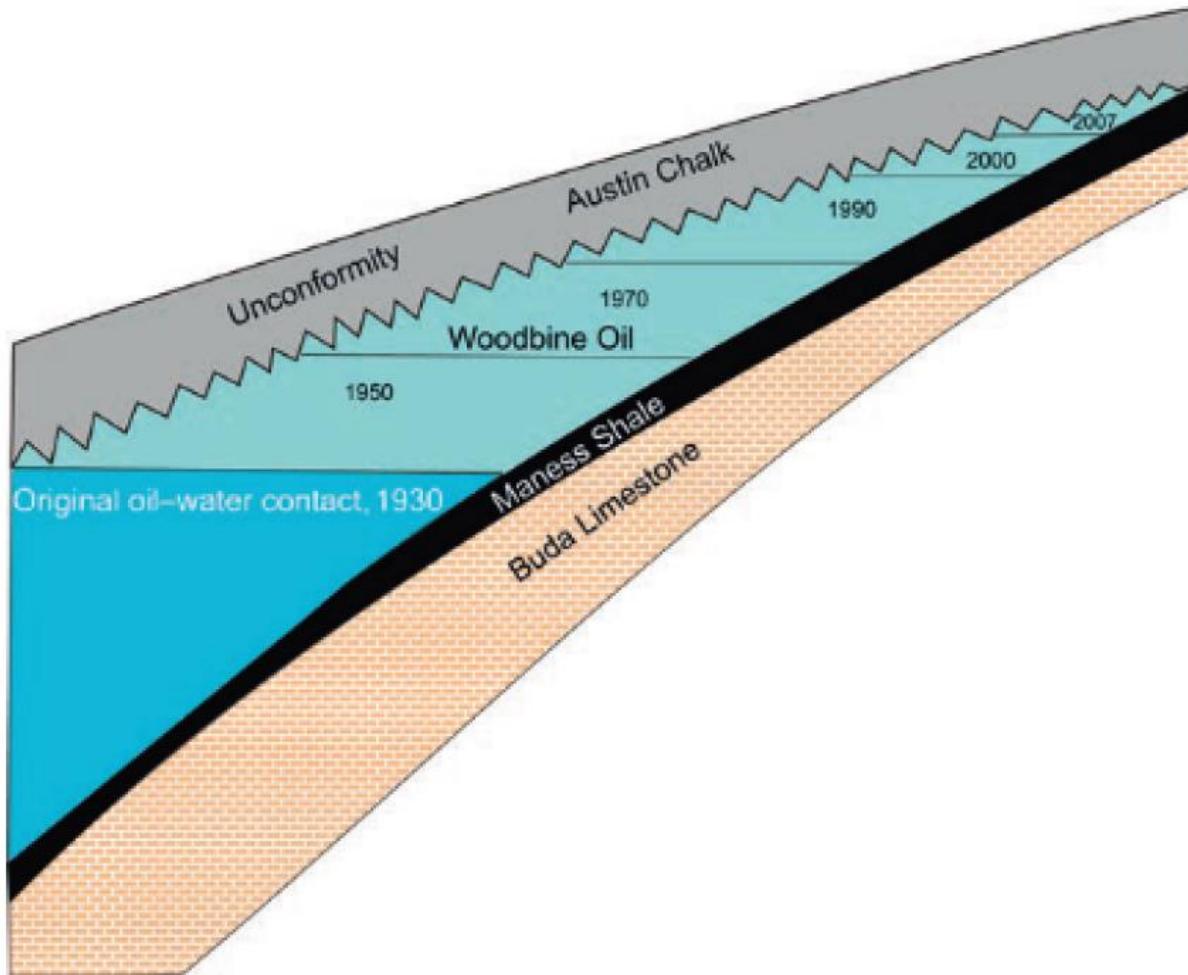


Figure 1 : Différentes relations entre pétrole et gaz dans les gisements d'hydrocarbures (Rohey, 1981)

# Champ d'east texas

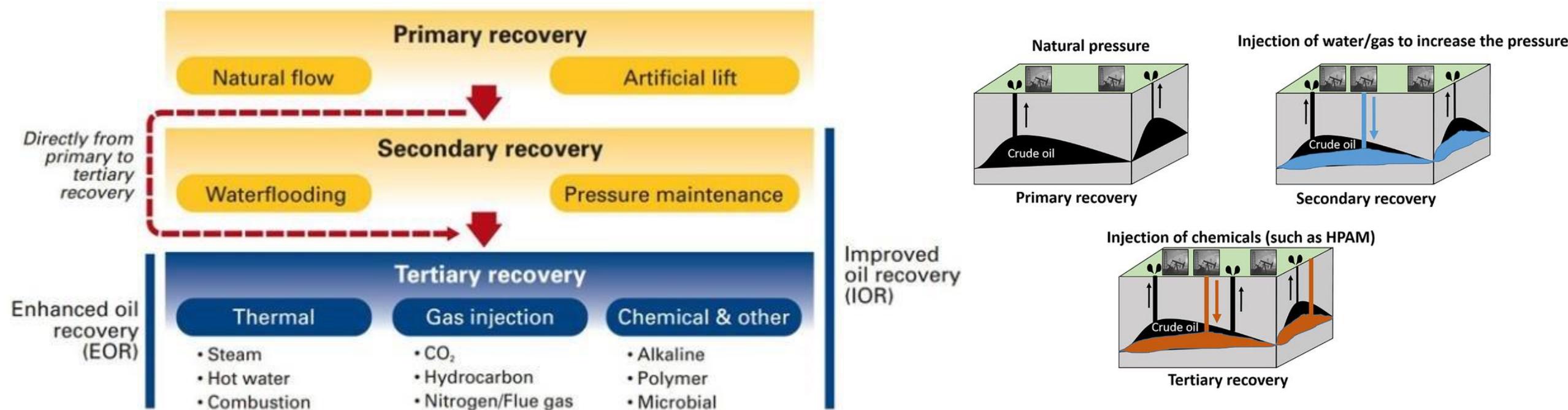


# Exploitation d'east-texas



Lors de l'exploitation du gisement, la roche réservoir se vide. L'élévation du plan de contact eau-huile reflète cette situation

# Les étapes de récupération



# Taux de récupération

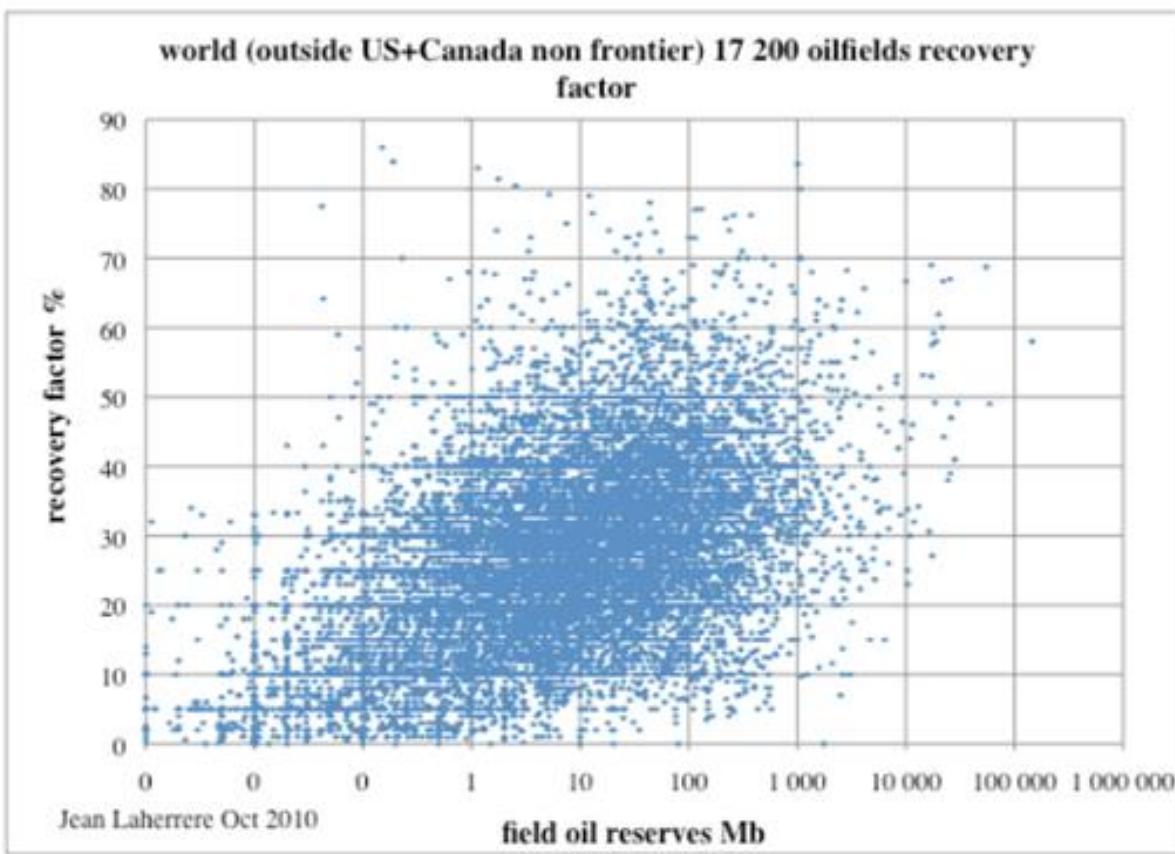


Figure 1 : Taux de récupération en fonction de la taille du champ pétrolier

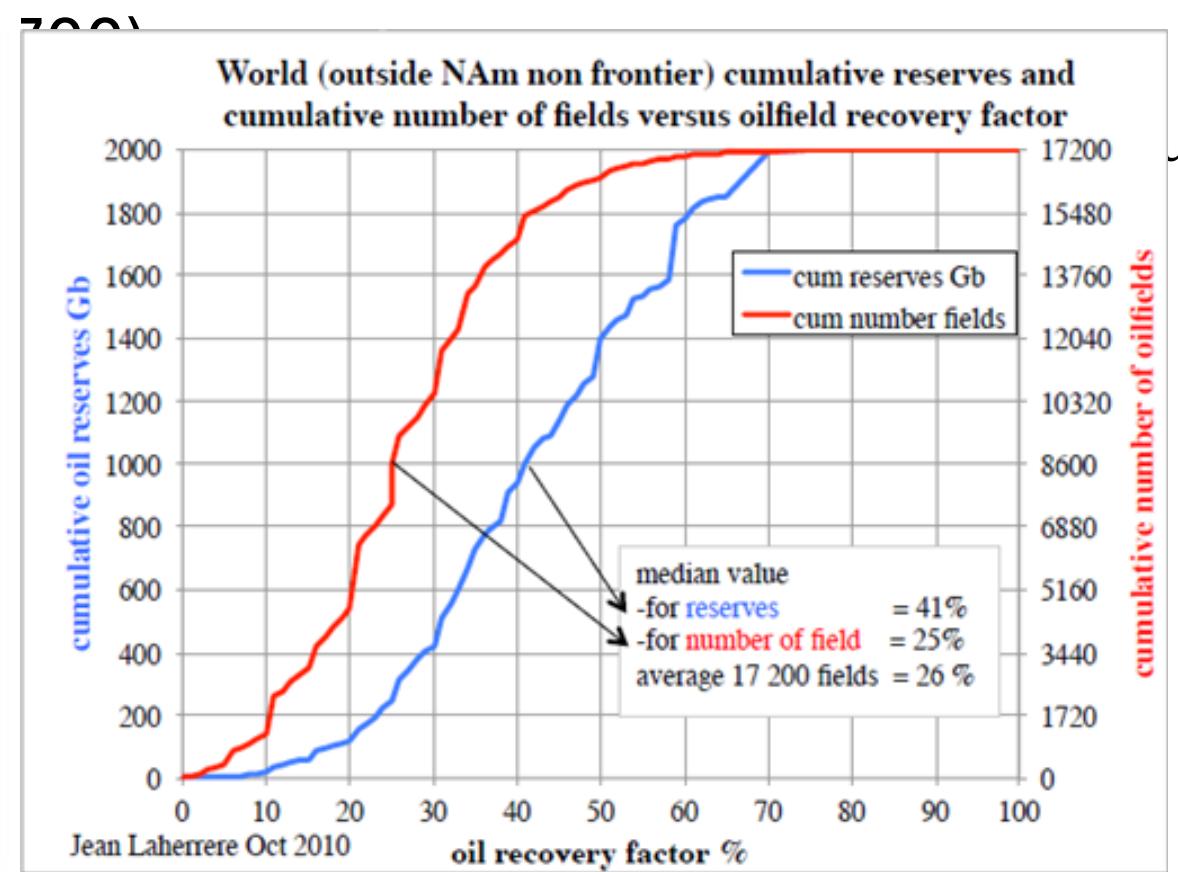
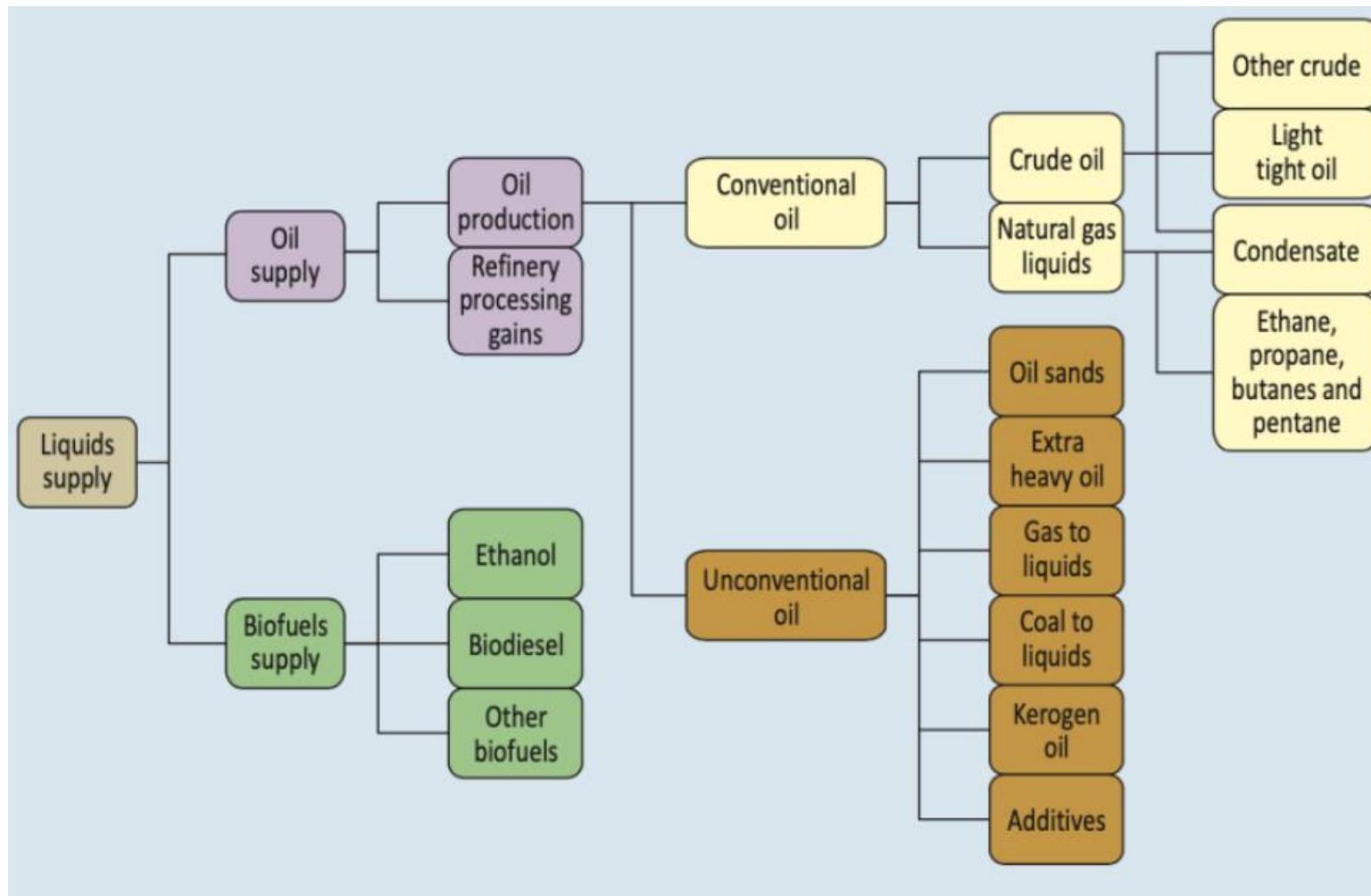


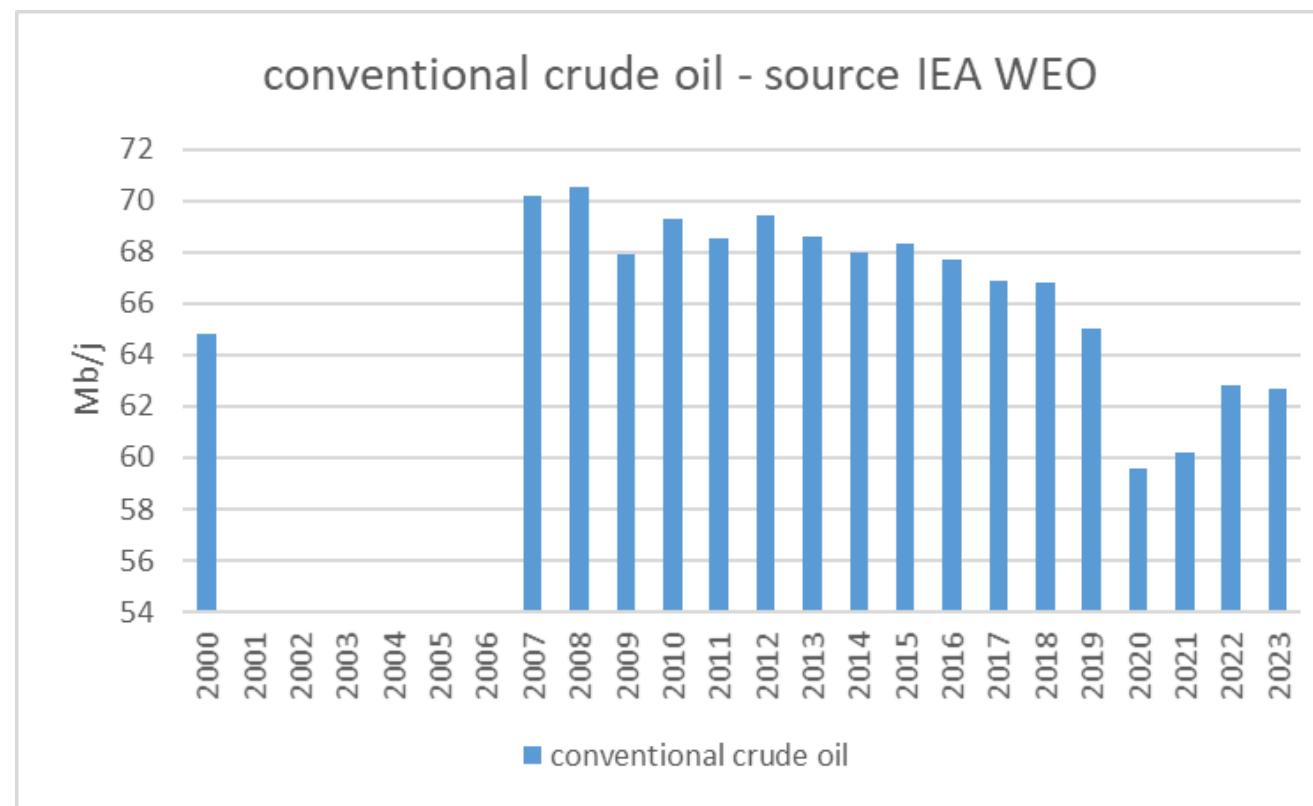
Figure 1 : Taux de récupération moyen et médian dans le monde selon le nombre de champs ou selon les réserves cumulées

# Classification du pétrole



# Pétrole conventionnel

→ 65% de la production mondiale

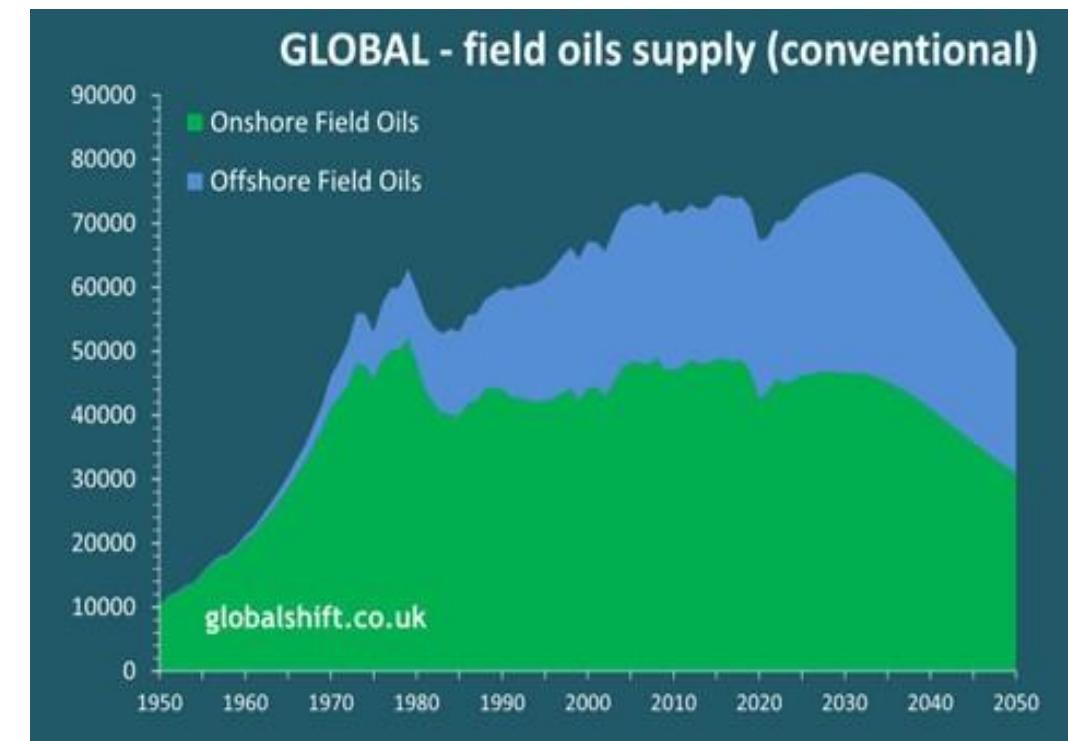
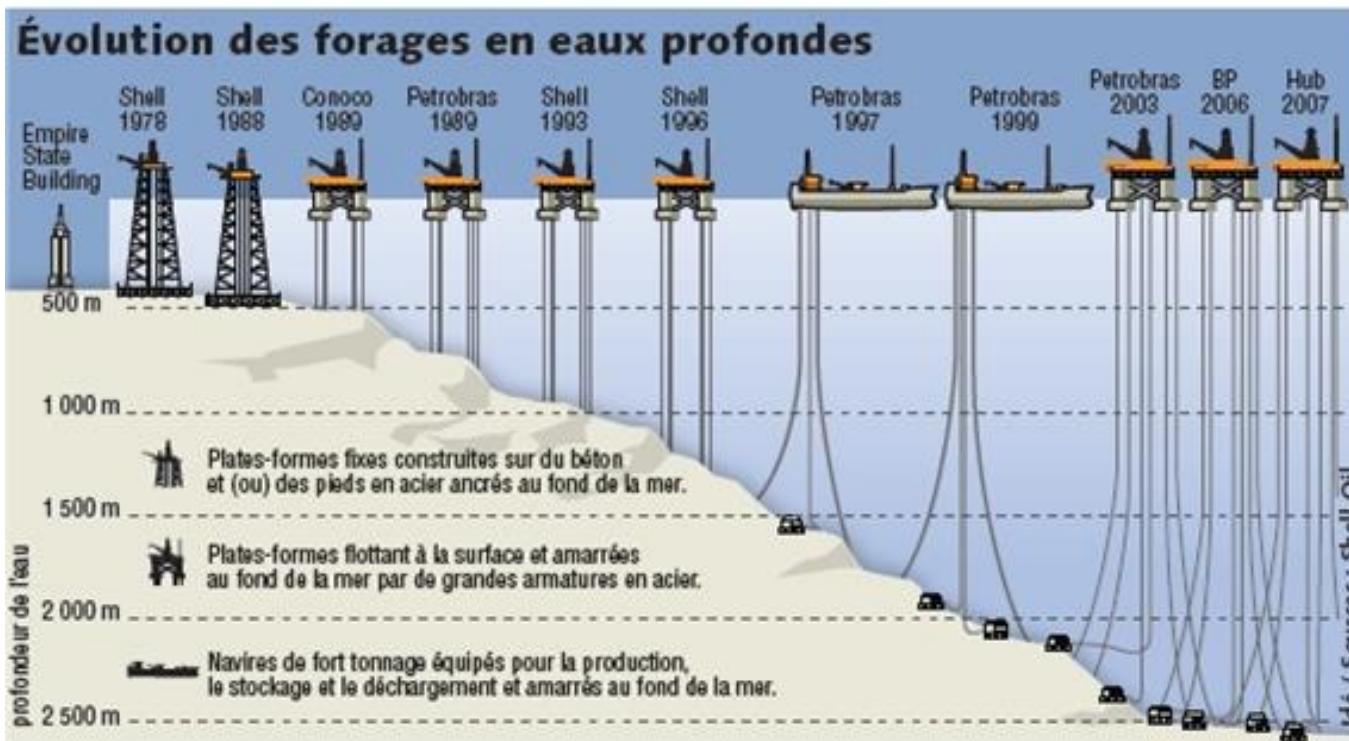


**Table A.8: Oil production (mb/d)**

	Stated Policies					
	2010	2022	2023	2030	2035	2050
World supply	85.1	97.4	99.2	101.7	99.1	93.1
Processing gains	2.1	2.3	2.4	2.5	2.6	2.8
World production	83.2	95.1	96.9	99.2	96.5	90.3
Conventional crude oil	66.8	62.9	62.7	59.4	57.0	54.3
Tight oil	0.7	8.2	9.1	11.2	11.8	10.7
Natural gas liquids	12.7	19.3	20.2	23.1	22.1	19.2
Extra-heavy oil & bitumen	2.6	3.8	3.9	4.6	4.6	5.1

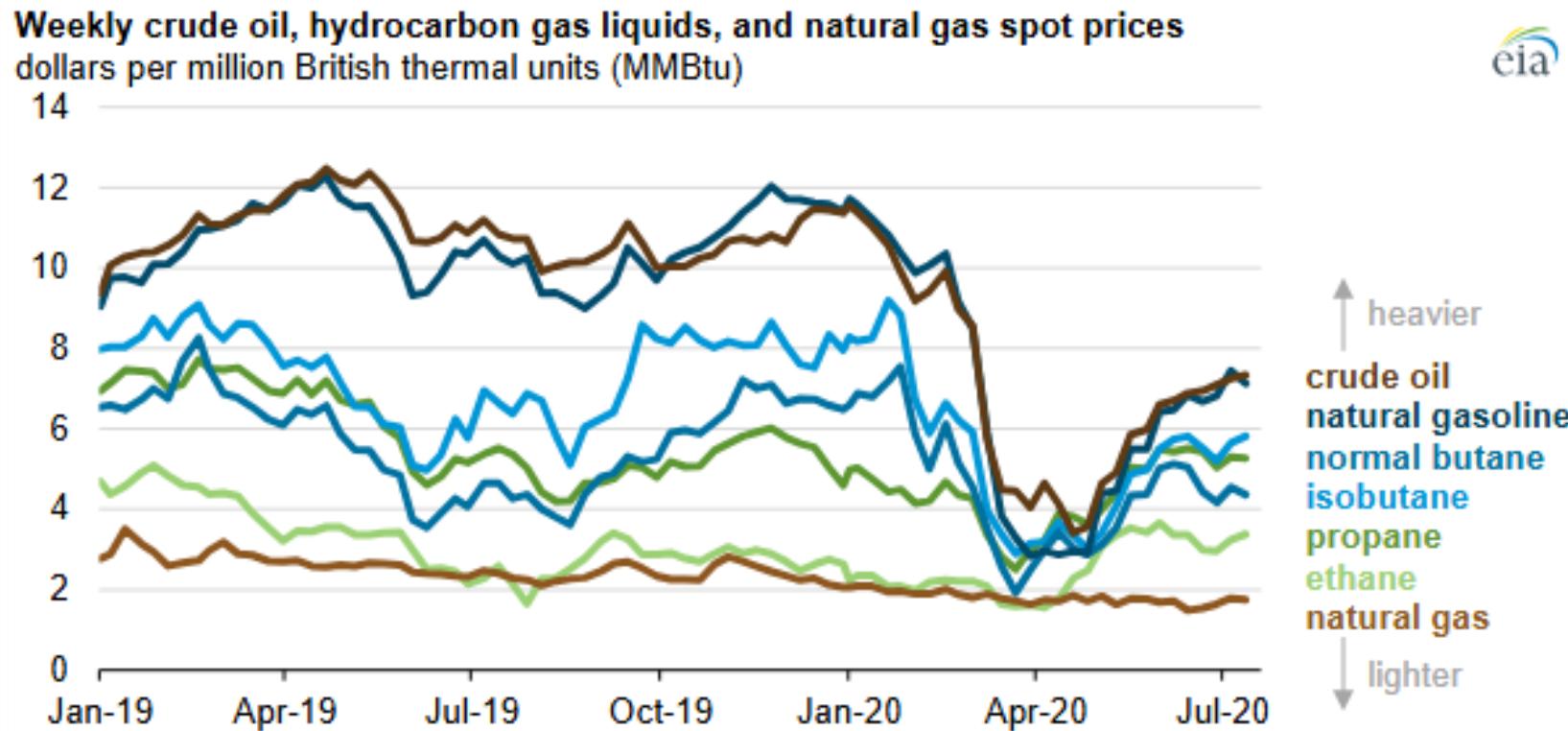
# Pétrole conventionnel

→ Progression de la production offshore : hausse de la profondeur d'extraction



# Liquides de gaz

→ 21 % de la production mondiale



# Pétrole de roche-mère

→ 9 % de la production mondiale

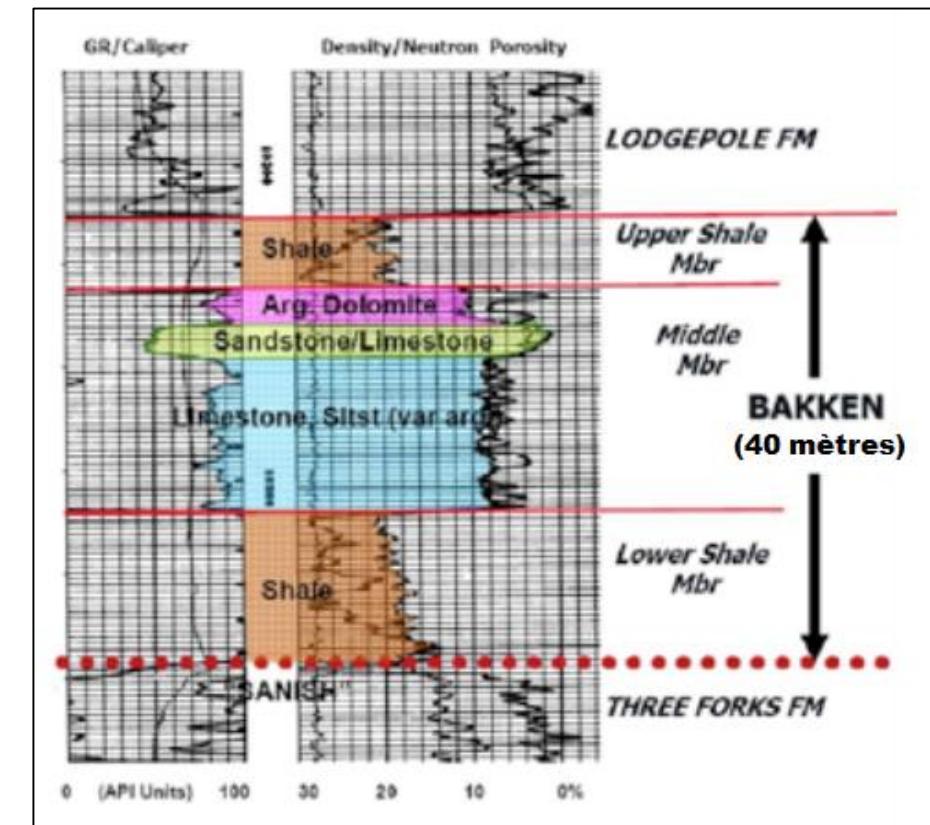
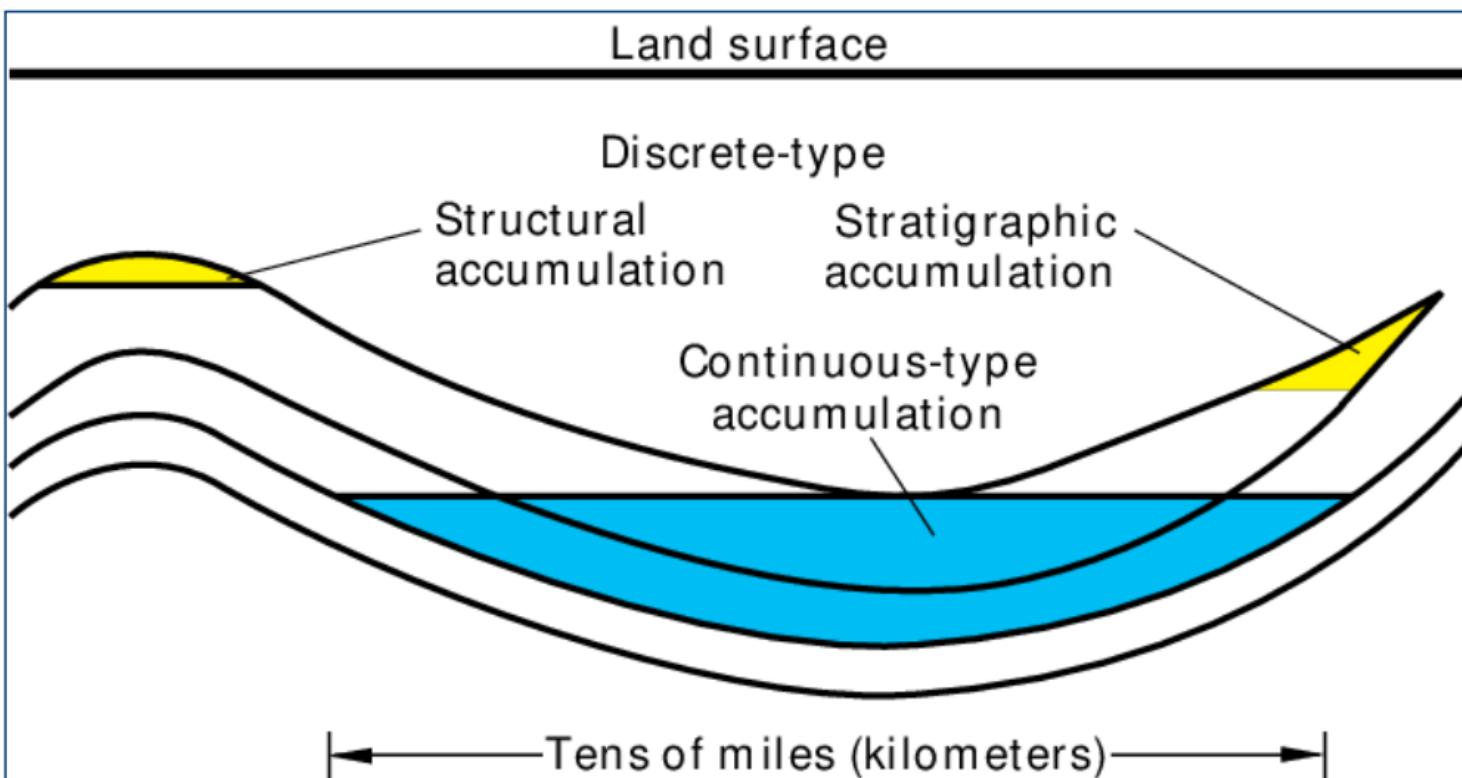
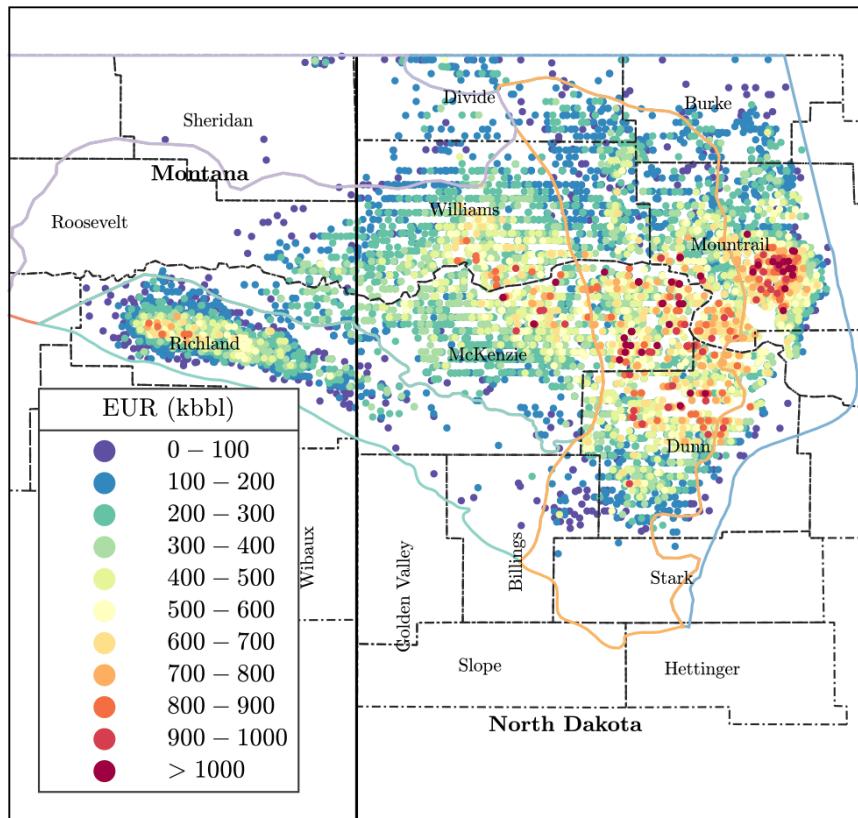


Figure 1: Forage exploratoire réalisé dans la formation du Bakken

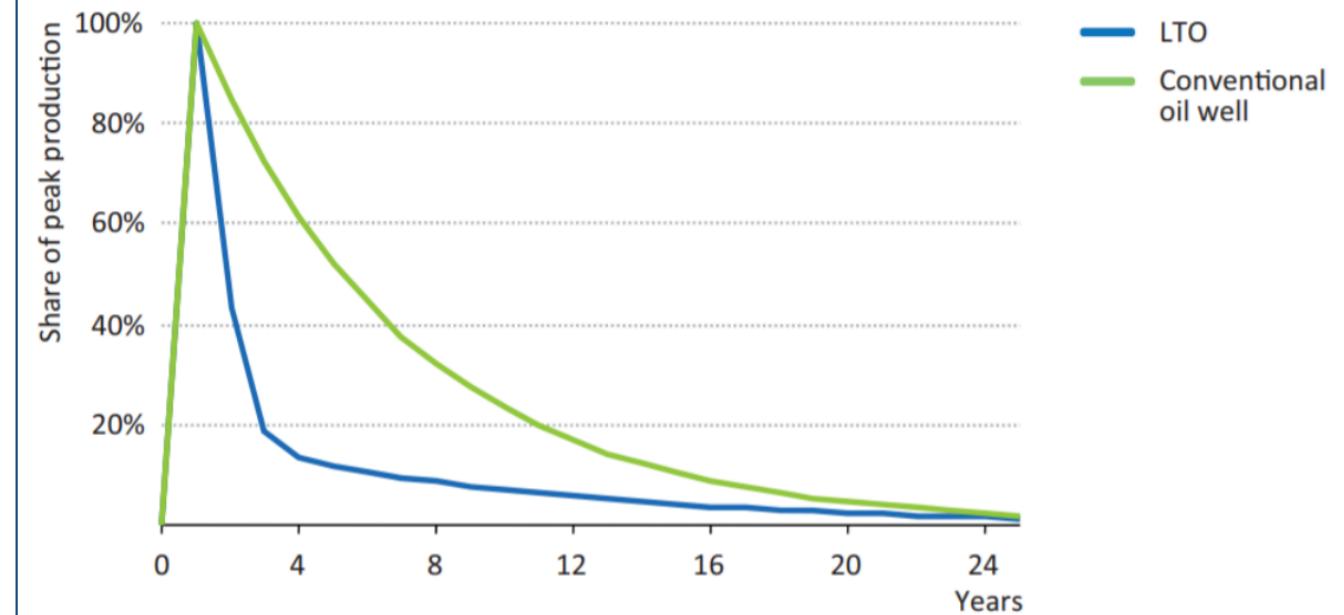
# Pétrole de roche-mère

→ 9 % de la production mondiale

EUR Map

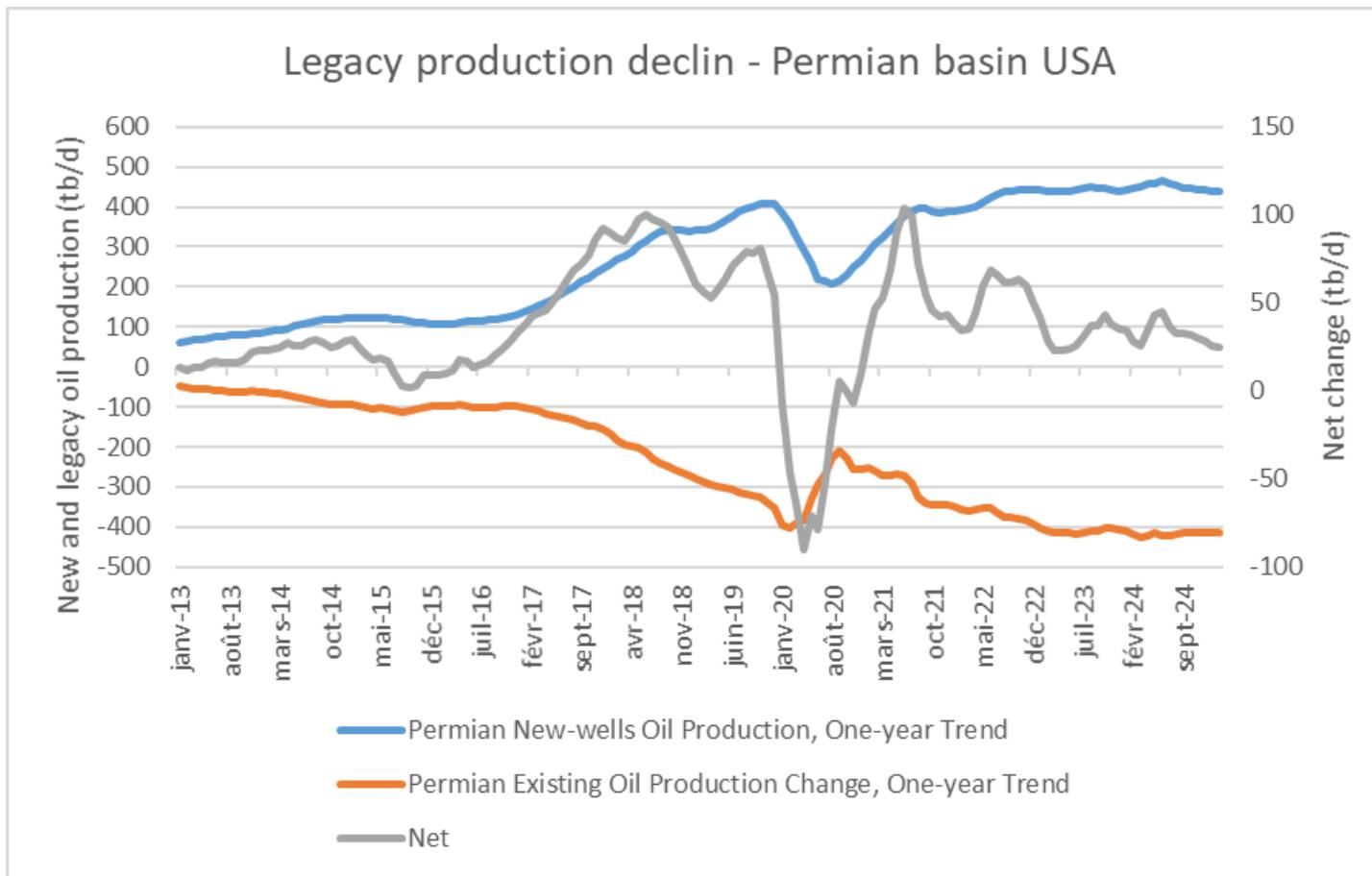


**Figure 14.4** ▷ Typical production curve for a light tight oil well compared with a conventional oil well



# Pétrole de roche-mère

« Legacy production » du bassin permien aux Etats-unis



# Pétrole extra-lourd

→ 4 % de la production mondiale

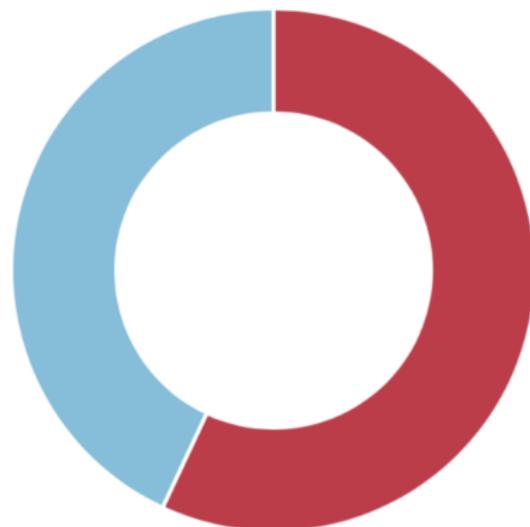


# Pétrole extra-lourd

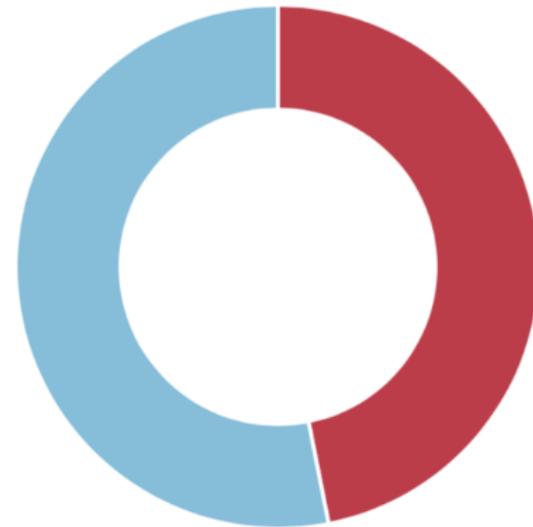
→ Deux techniques d'extraction du pétrole extra-lourd

## BY THE NUMBERS: BITUMEN PRODUCTION FROM THE OIL SANDS

1999: 567 kbb/day

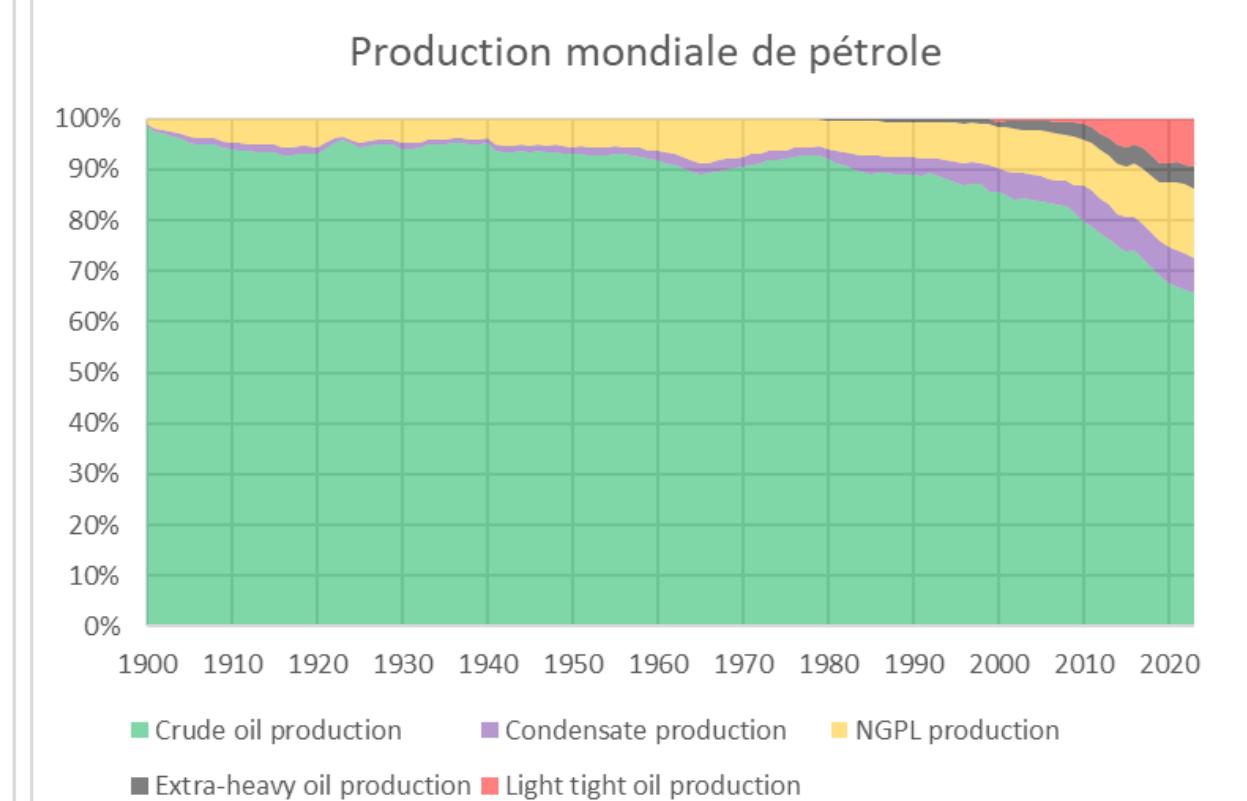
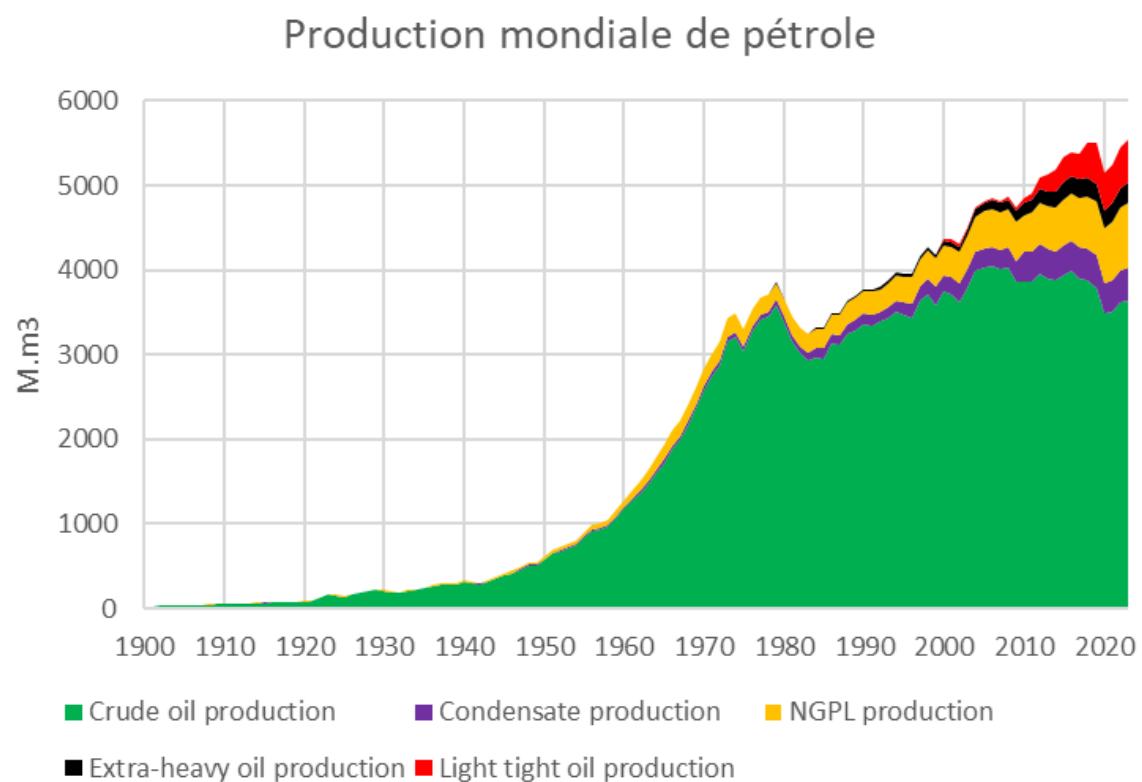


2015: 2,373 kbb/day



Mining  
In-situ

# Production mondiale par type



Source : ASPOdata

# Bilan partie 1

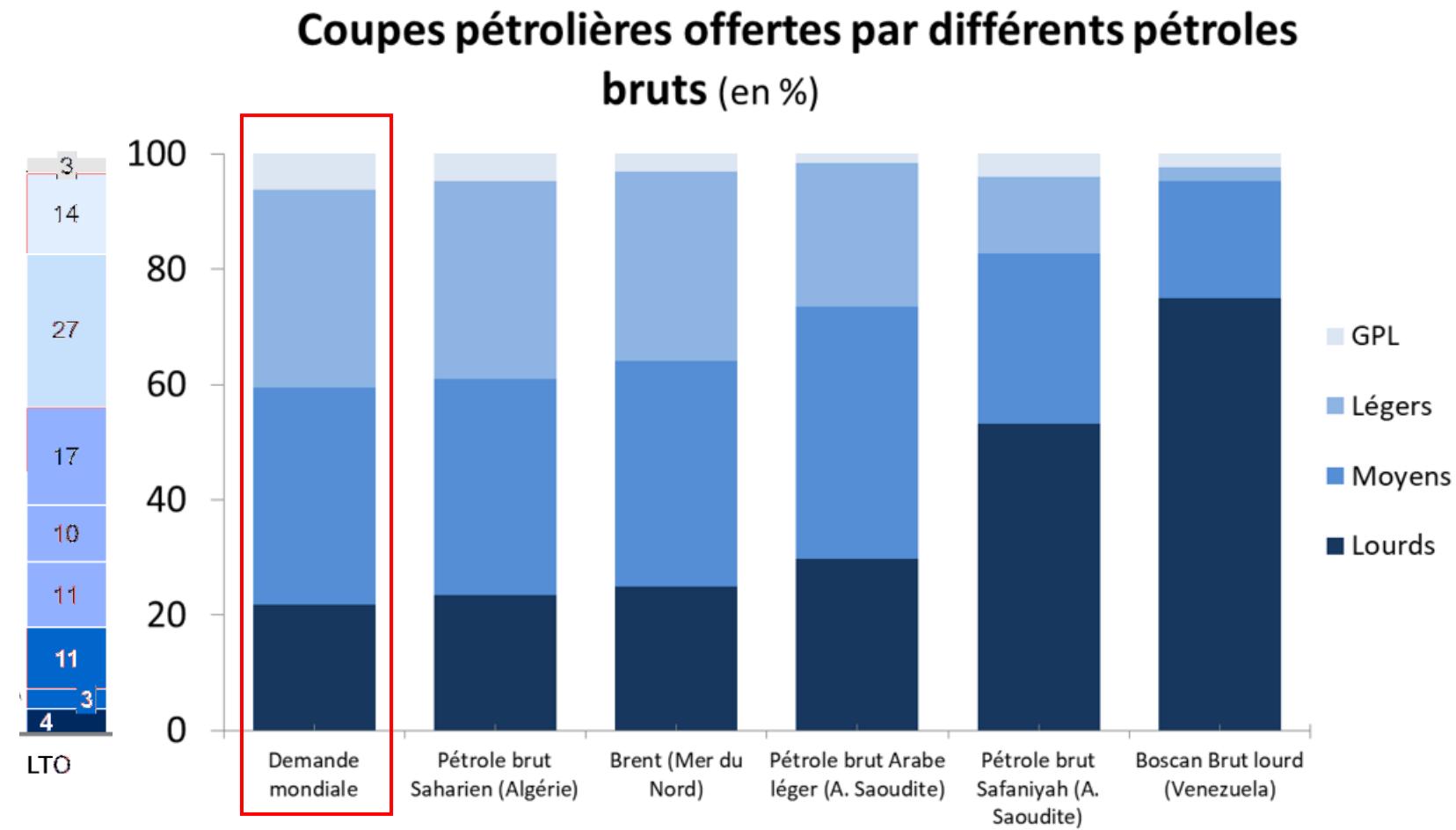
- Le pétrole est un combustible liquide à température et pression ambiante
- Il a une origine biologique et se forme dans certaines configurations géologiques particulières
- Il peut s'accumuler et former des gisements après son expulsion de la roche mère et migration vers une roche réservoir.
- On peut classifier le pétrole en différents types qui diffèrent par leur mode d'extraction et leur densité spécifique.

Conclusion fil rouge : de par ses caractéristiques, le pétrole représente un volume extractible fini. Reste à préciser les contours de ce stock.

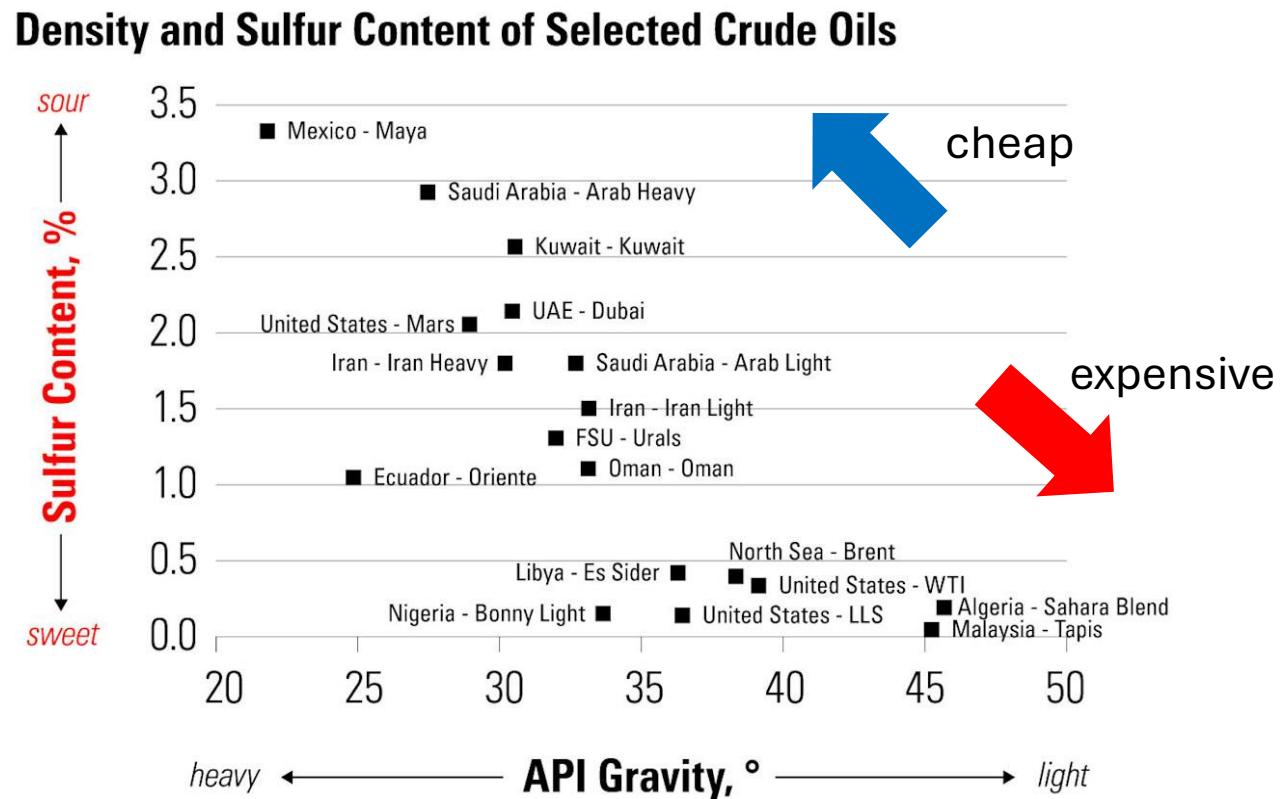


- I. Nature du pétrole**
- II. Traitement et utilisation**
- III. Pétrole et économie**
- IV. Finitude des ressources**
- V. La situation européenne**

# Coupes pétrolières



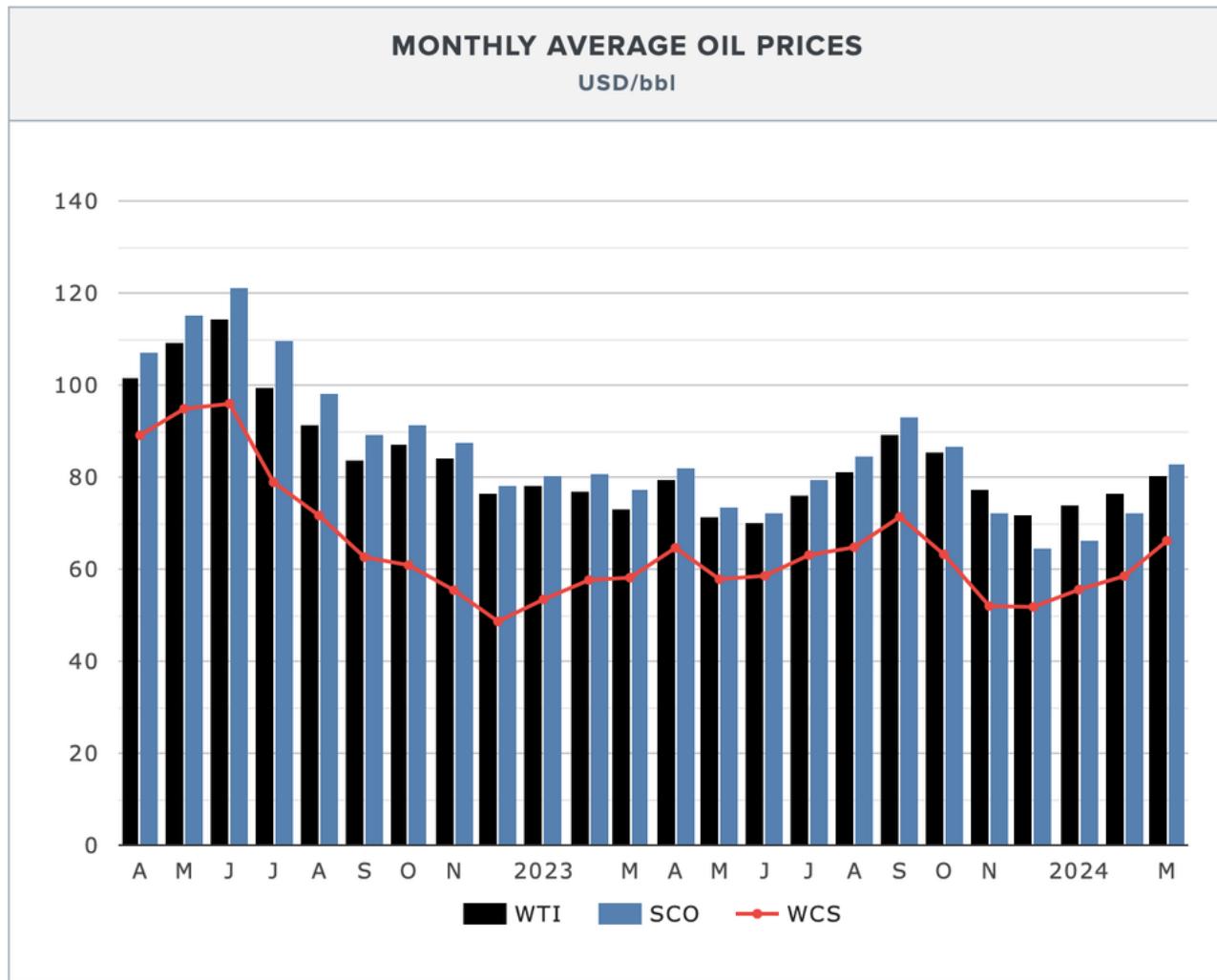
# Un prix dépendant de la qualité



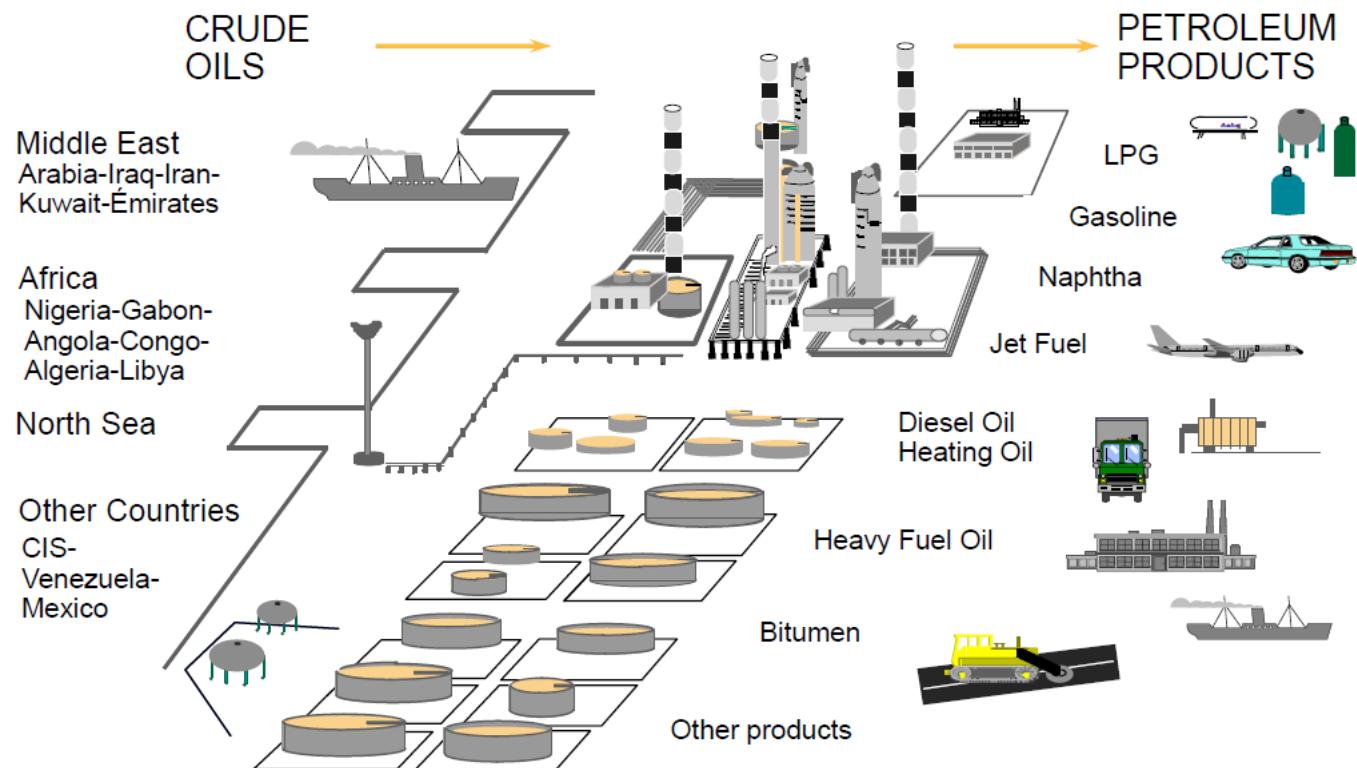
Source: U.S. Energy Information Administration, based on Energy Intelligence Group—International Crude Oil Market Handbook.

United States-Mars is an offshore drilling site in the Gulf of Mexico. WTI = West Texas Intermediate; LLS = Louisiana Light Sweet; FSU = Former Soviet Union; UAE = United Arab Emirates.

# Exemple du discount canadien

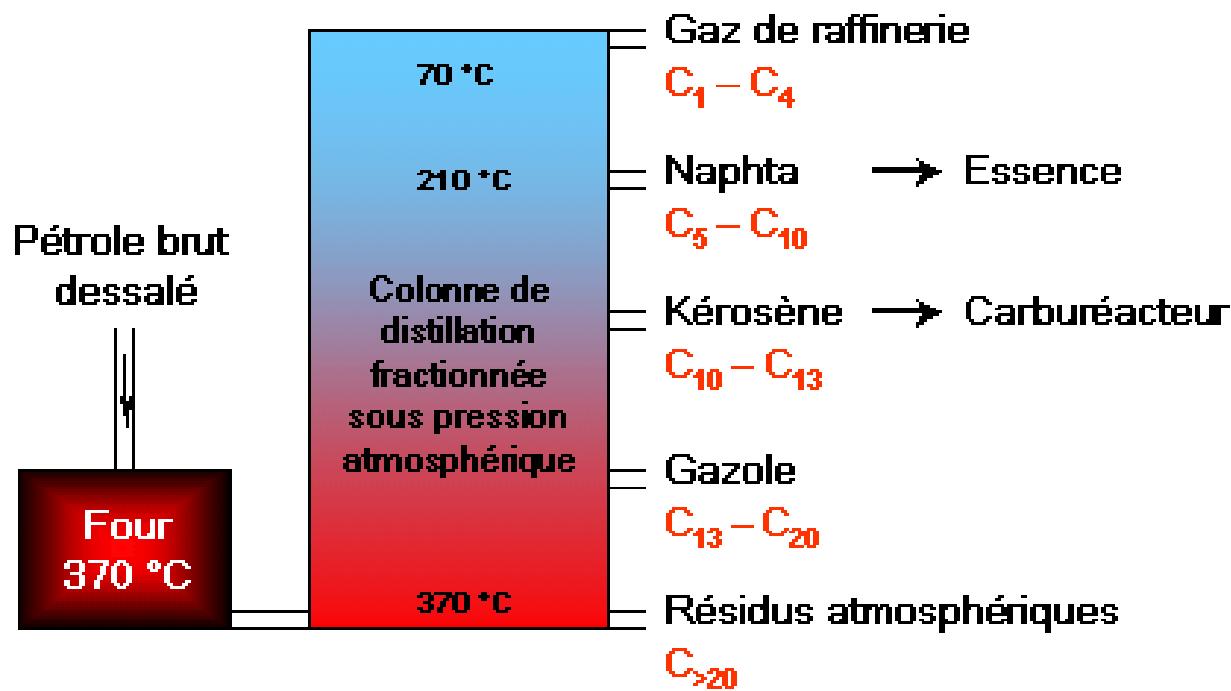


# Complexe de raffinage



# Distillation atmosphérique

**Raffinage du pétrole** : les différentes coupes de distillation et leur composition moyenne en hydrocarbures (**nombre d'atome de carbone**)

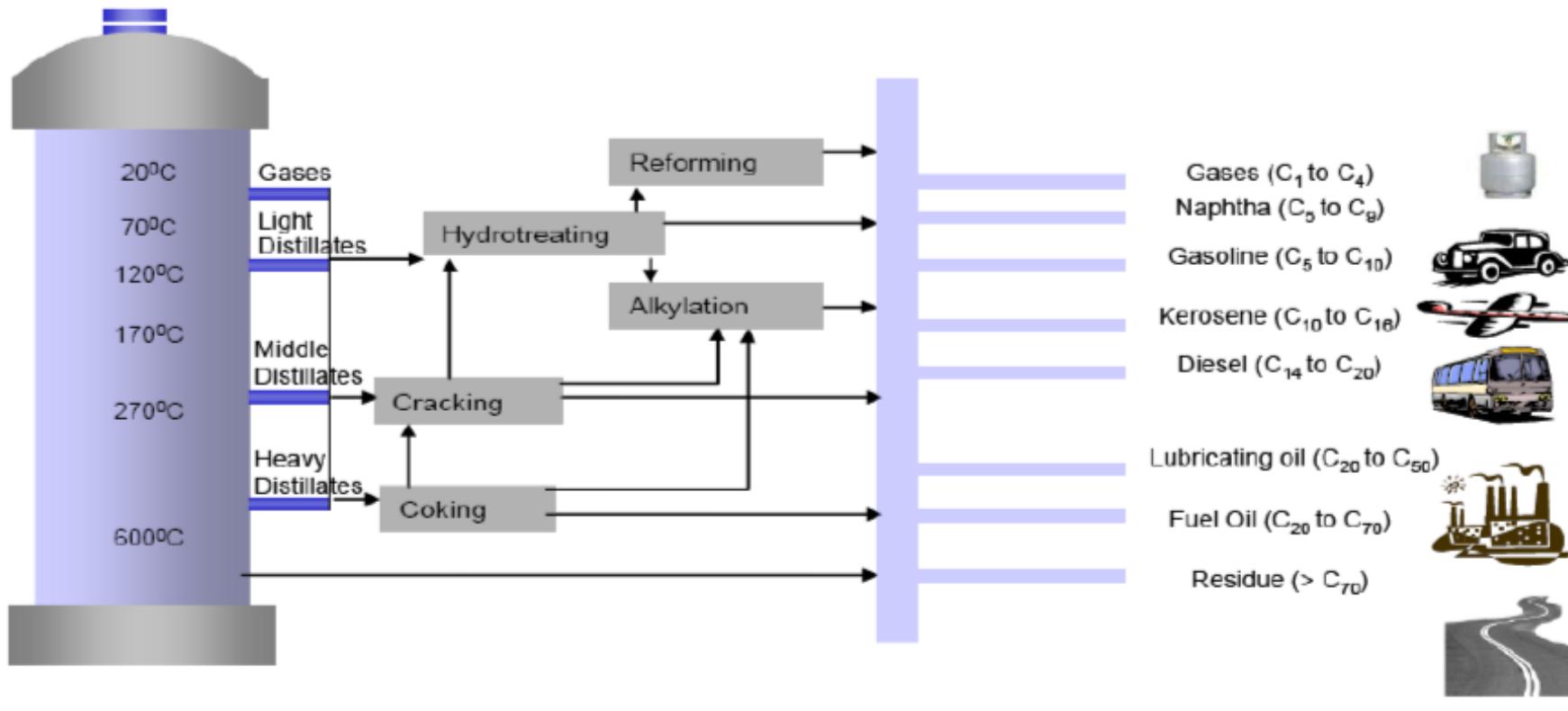


# Exemple de distillation

Cut Data	IBP	IBP	Atmospheric Cuts										Vacuum Cuts			
			C5	65	100	150	200	250	300	350	370	FBP	370	450	500	550
Start (°C)	65	100	150	200	250	300	350	370	FBP	450	500	550	FBP			
End (°C)	FBP	C4														
Yield (% wt)		2.9	4.8	7.5	16.4	10.8	10.4	9.9	8.5	2.8	26.0	9.5	5.0	4.0	7.5	
Yield (% vol)		4.0	6.0	8.5	17.7	11.1	10.3	9.4	7.9	2.5	22.7	8.5	4.4	3.5	6.3	
Cumulative Yield (% wt)		2.9	7.7	15.1	31.6	42.4	52.8	62.7	71.2	74.0	100.0					
Density @ 15°C (g/cc)	0.809	0.647	0.706	0.750	0.788	0.820	0.844	0.866	0.882	0.923	0.899	0.914	0.925	0.962		
API Gravity	43.3	87.0	68.8	57.2	47.9	41.0	36.1	31.8	28.8	21.7	25.8	23.3	21.5	15.5		
UOPK	12.1				11.9	11.8	11.8	11.8	11.8	11.8	12.1	11.9	12.1	12.2	12.2	12.2

Cut Data	IBP	Atmospheric Cuts										Vacuum Cuts				
		C5	149	212	302	392	482	572	662	698	FBP	698	842	932	1022	
Start (°F)	149	212	302	392	482	572	662	698	FBP	842	932	1022	FBP			
End (°F)	FBP															
Yield (% wt)		3.0	4.5	8.5	8.1	8.4	9.0	9.1	3.6	44.4	13.8	7.6	6.4	16.6		
Yield (% vol)		4.0	5.3	9.6	8.7	8.7	9.1	9.0	3.5	40.1	13.1	7.1	5.9	14.1		
Cumulative Yield (% wt)		1.2	4.2	8.8	17.3	25.4	33.8	42.8	52.0	55.6	55.6	69.4	77.0	83.4		
Volume Average B.P. (°F)	623	107	182	258	346	438	527	617	680	969	768	886	975	1195		
Density @ 59°F (g/cc)	0.8573	0.647	0.728	0.759	0.793	0.824	0.848	0.864	0.885	0.947	0.900	0.923	0.935	1.007		
API Gravity	33.5	87.2	62.9	55.0	46.8	40.2	35.3	32.2	28.3	17.8	25.6	21.7	19.7	8.9		
UOPK	12.0				11.8	11.7	11.7	11.7	11.9	11.8	11.9	11.9	12.0	12.1	11.7	
Molecular Weight (g/mol)					110	137	170	208	254	288	518	345	442	559	976	

# Complexification du raffinage



Distillation

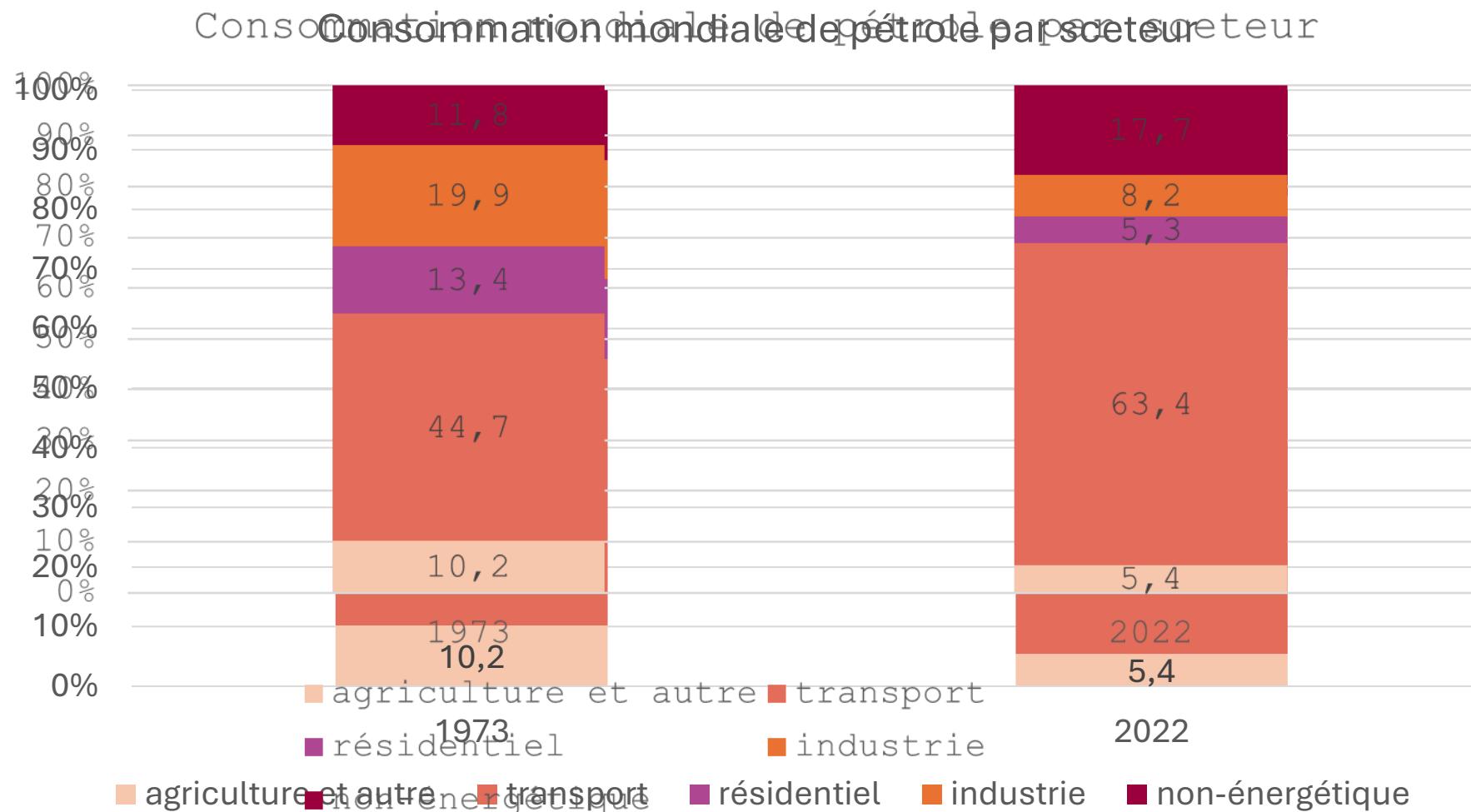
Conversion

Treatment

Blending

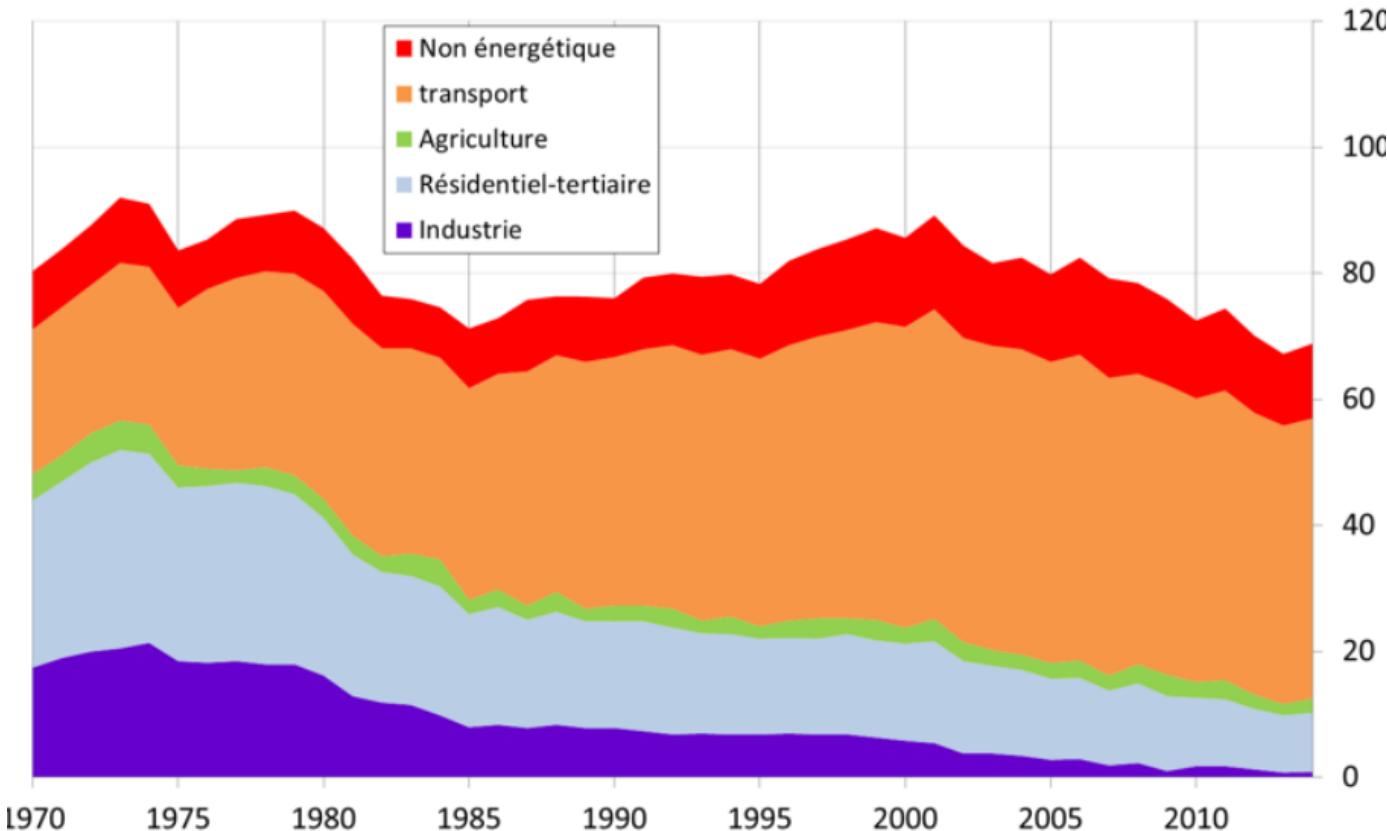
Final Products

# Usages du pétrole dans le monde

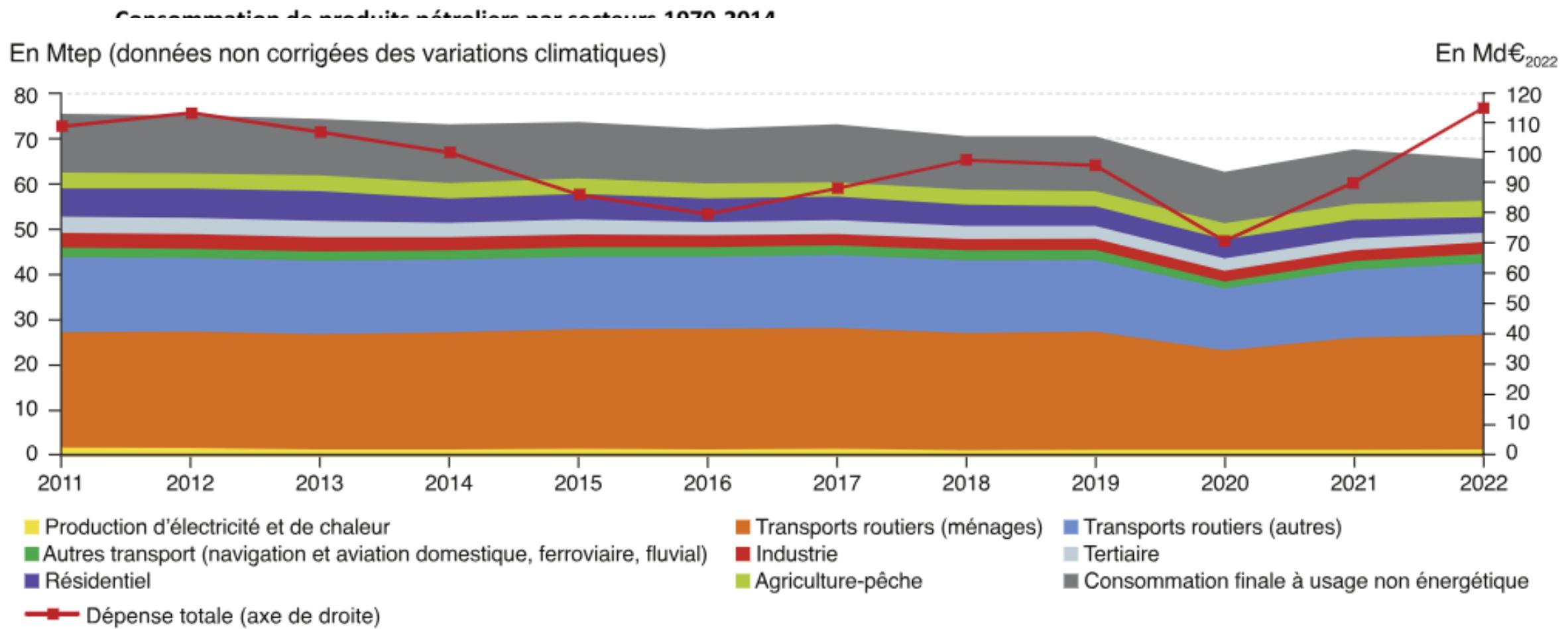


# Usages du pétrole en France

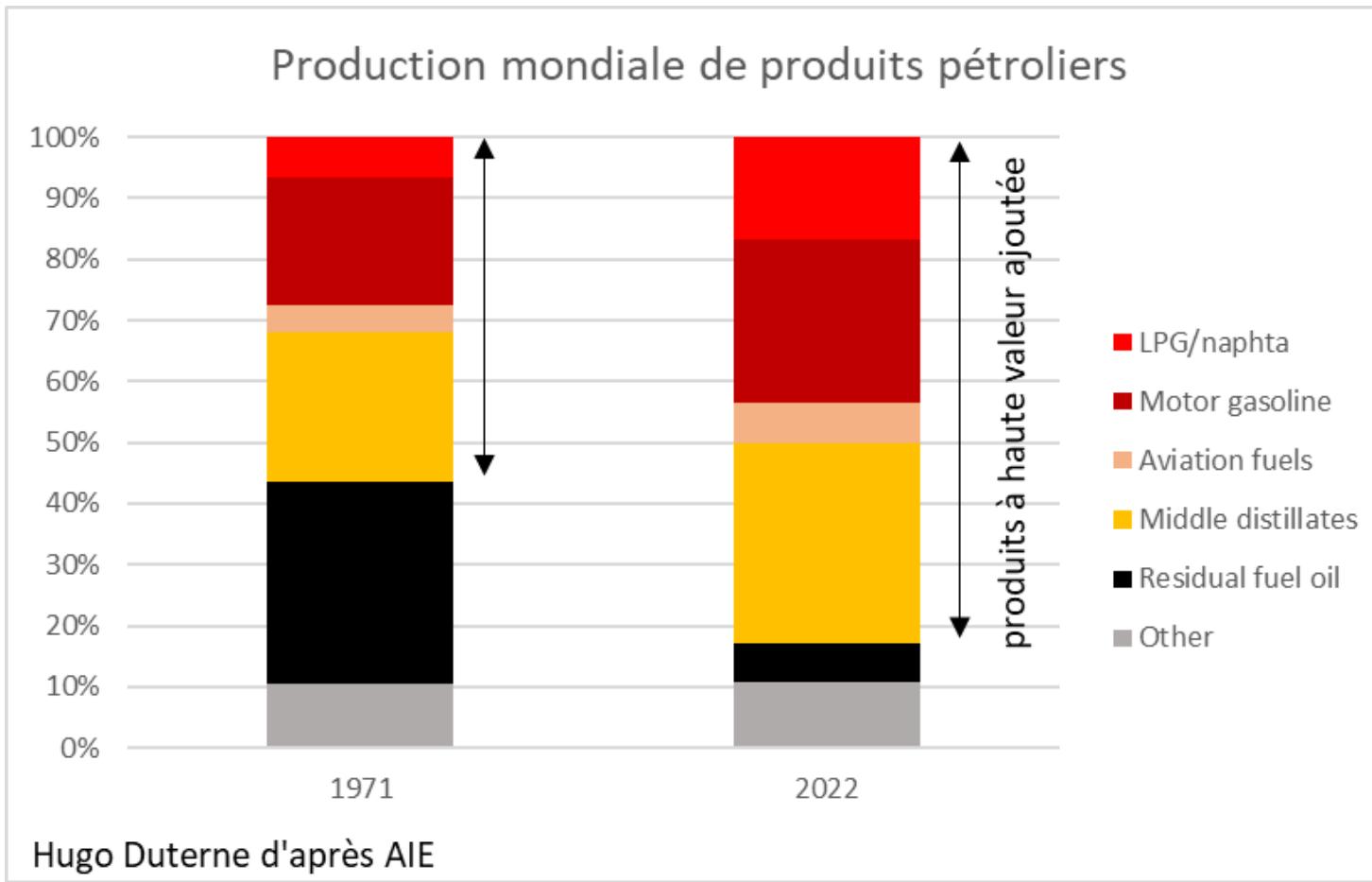
**Consommation de produits pétroliers par secteurs 1970-2014**  
(en millions de tonnes équivalent pétrole) (Source : Ministère de l'environnement)



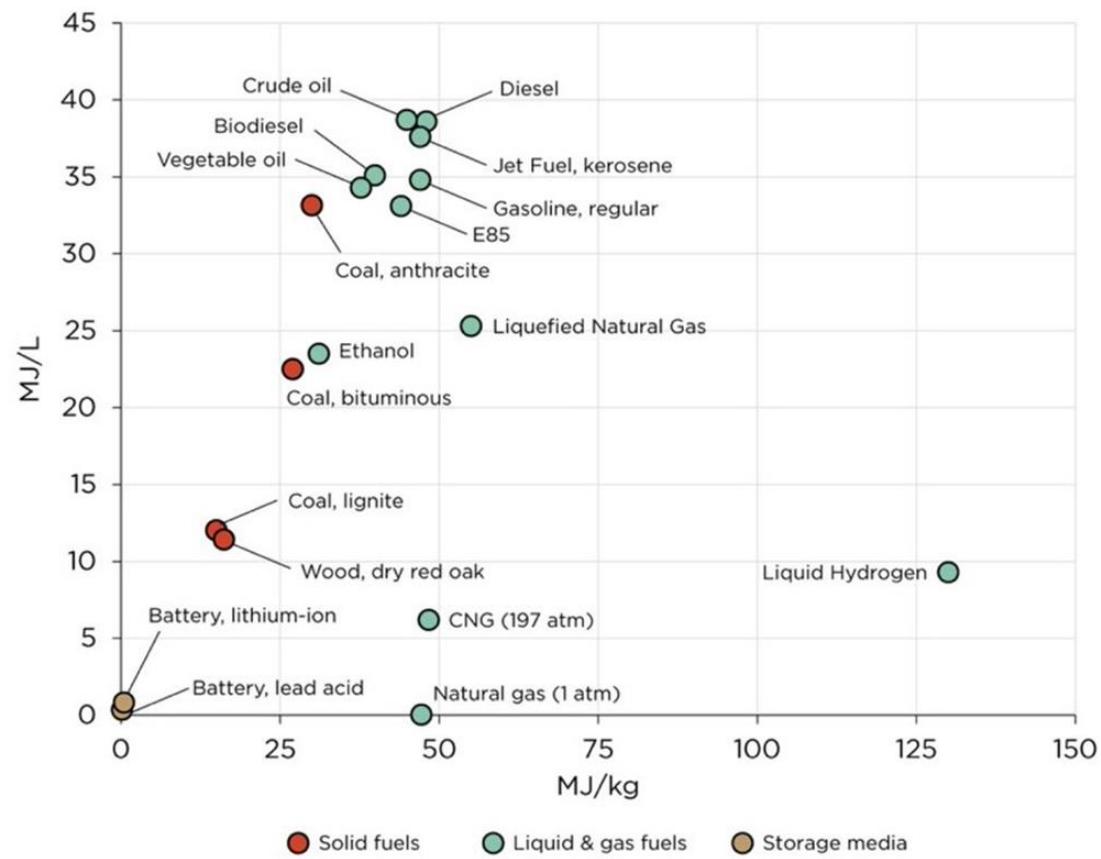
# Usages du pétrole en France



# Répartitions des produits



# Le pétrole dans la mobilité



# Bilan partie 2

- Le pétrole du fait de la diversité de molécules qu'il contient et de la diversité de composition entre différents gisements doit être raffiné afin de disposer de produits de qualité standard.
- Les procédés de raffinage se sont sans cesse complexifiés même si l'opération principale reste la distillation atmosphérique du pétrole brut.
- L'usage du pétrole est de plus en plus concentré sur le secteur du transport et sur les besoins non-énergétiques. Quel impact de l'électrification future du transport ?

**Conclusion fil rouge : La diversification des sources d'approvisionnement en pétrole face au resserrement de la demande à des secteurs d'activités spécifiques (carburants) force le raffinage pétrolier à des adaptations structurelles majeures. Quel impact sur les prix ?**

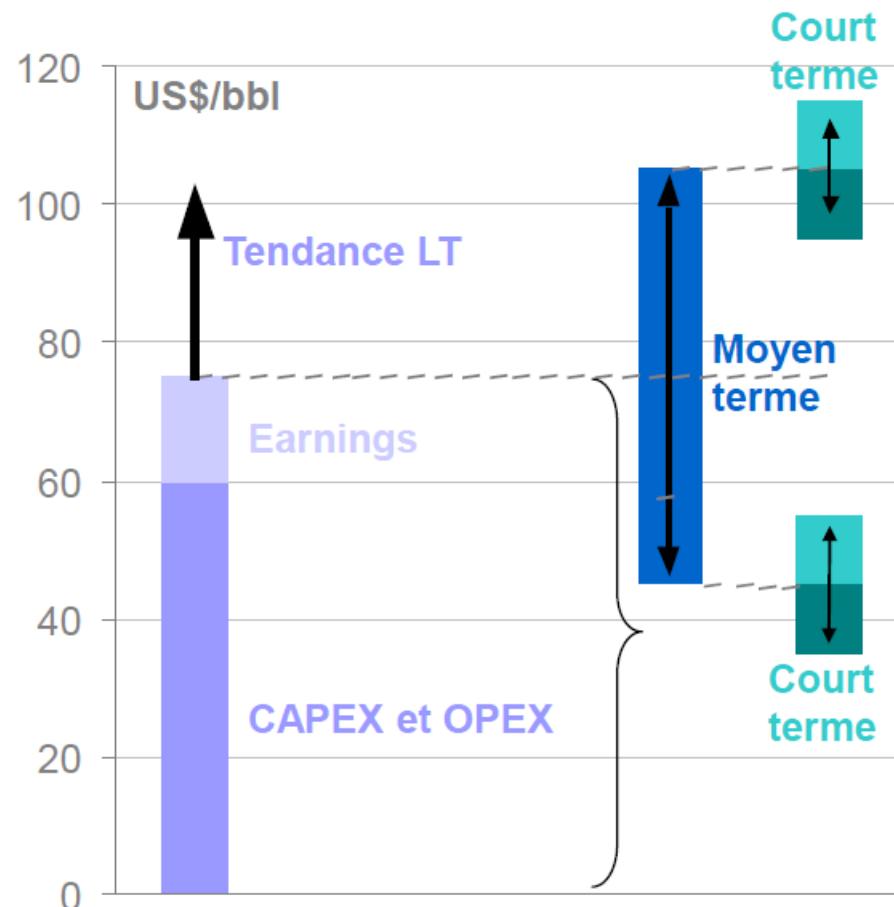


CentraleSupélec

- I. Nature du pétrole**
- II. Traitement et utilisation**
- III. Pétrole et économie**
- IV. Finitude des ressources**
- V. La situation européenne**



# Formation du prix



## Composante court terme

- Stocks
- Capacités de raffinage
- Saisonnalité

## Composante moyen terme

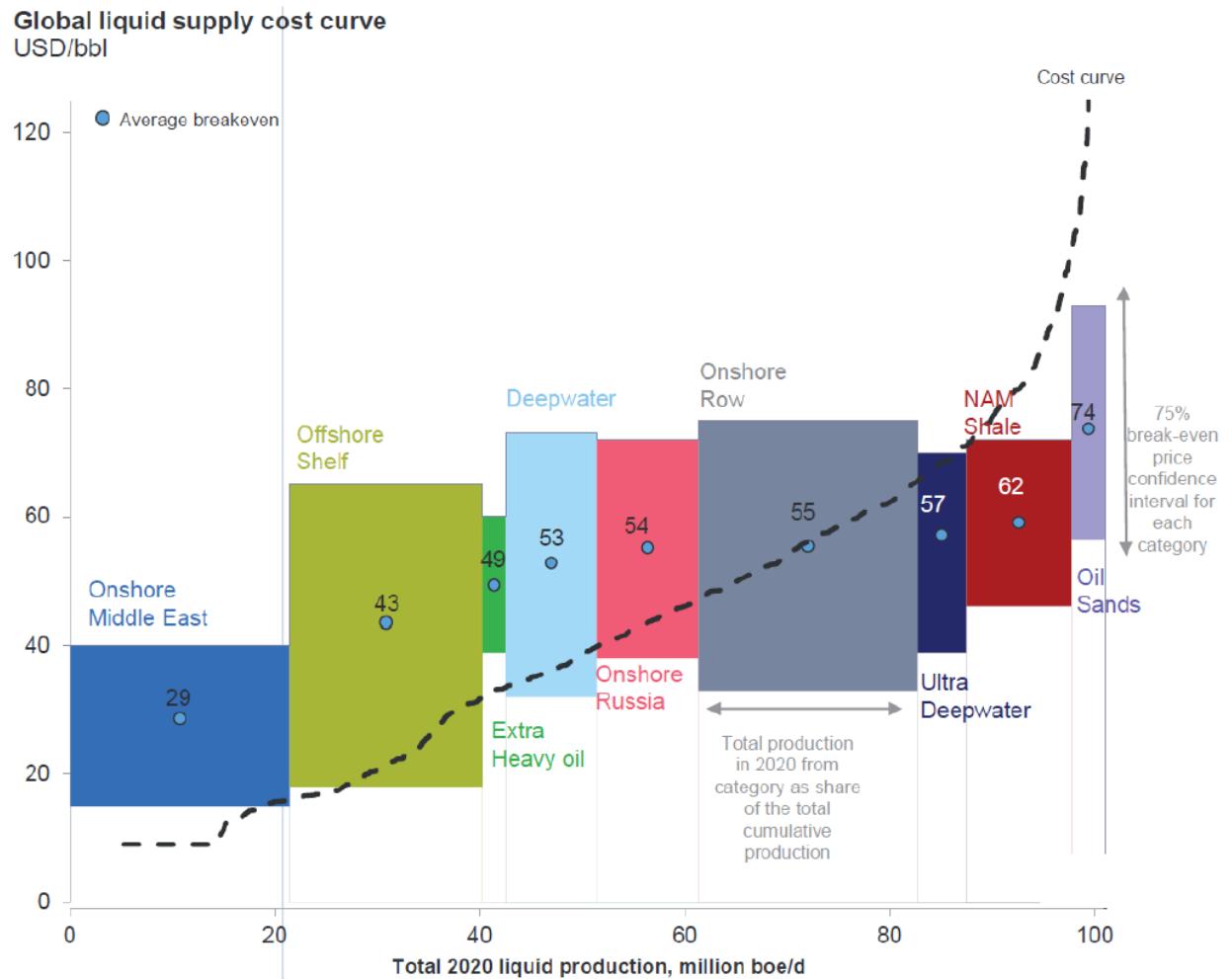
- Sous-capacités versus élasticité demande
- Surcapacités versus stratégie de l'acteur dominant

## Composante long terme

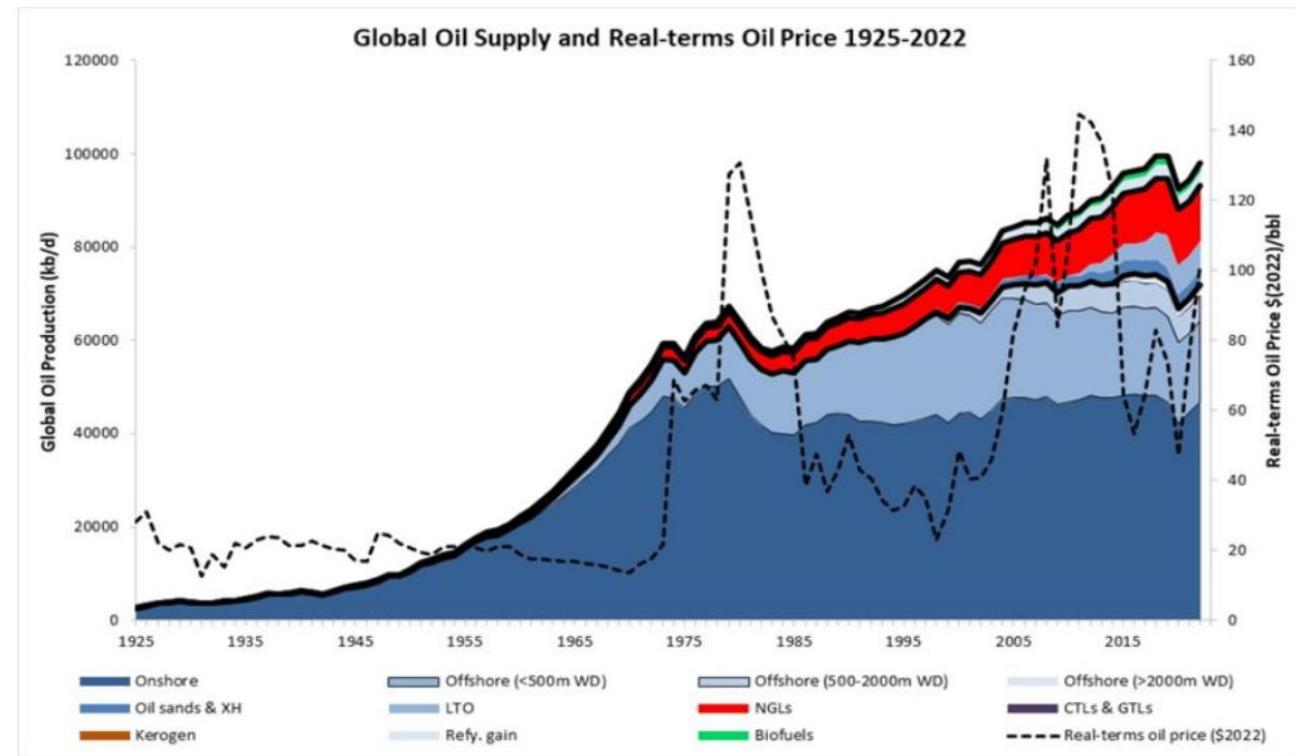
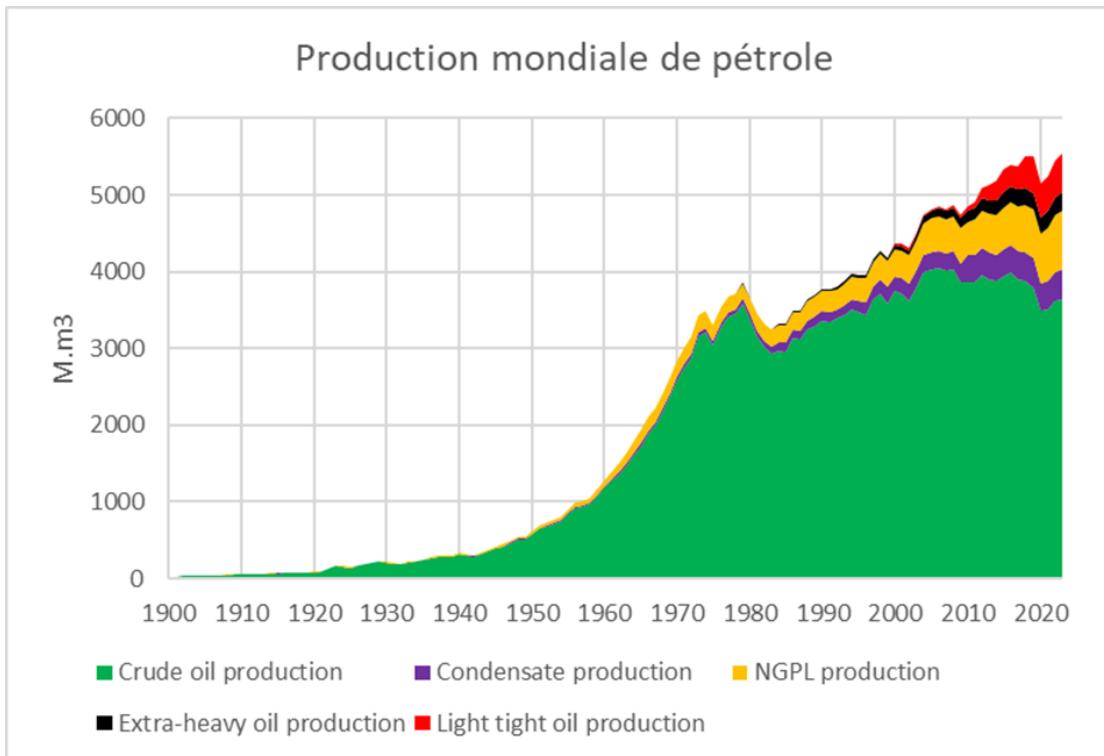
### Coût marginal d'extraction

- Coûts techniques services parapétroliers
- Technologie
- Géologie
- Termes contractuels

# Composante de long terme

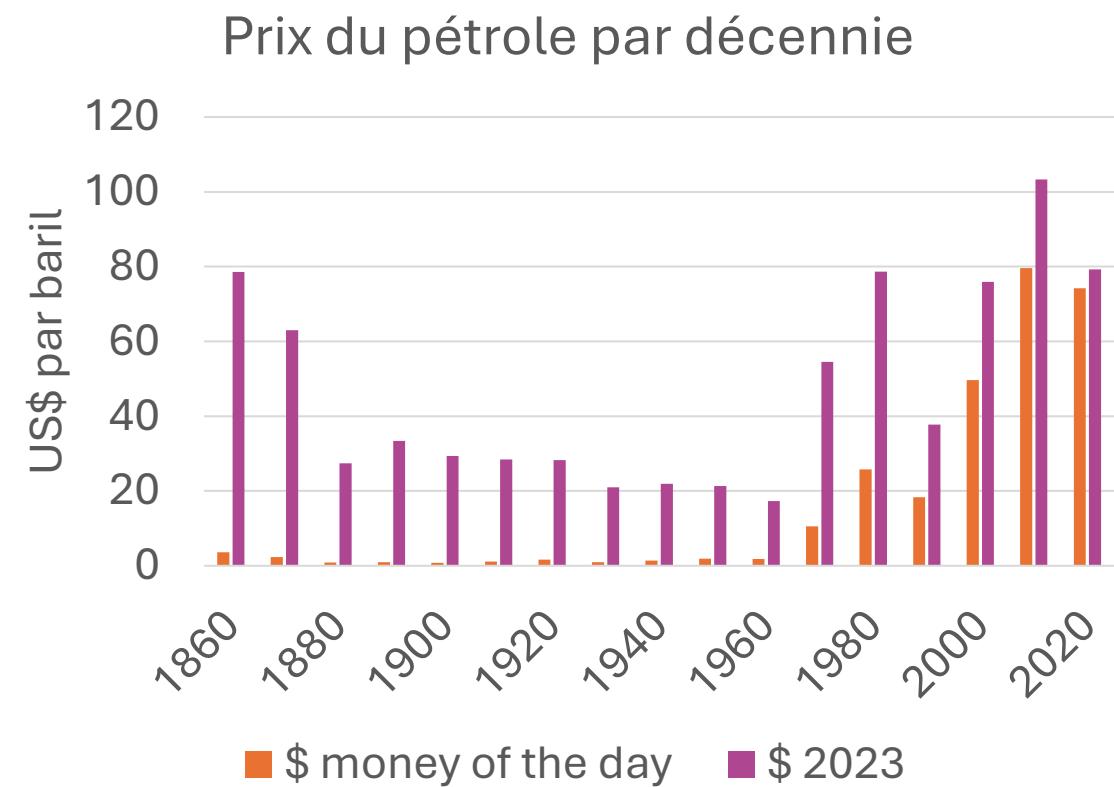
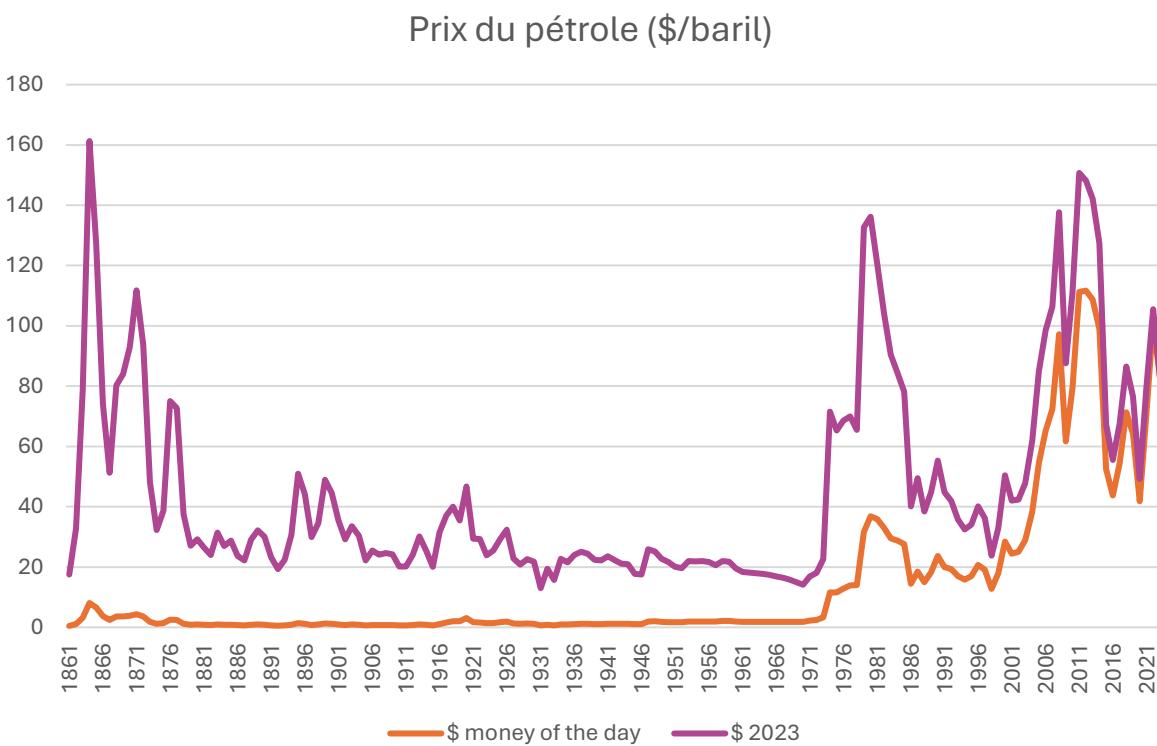


# Composante de long terme



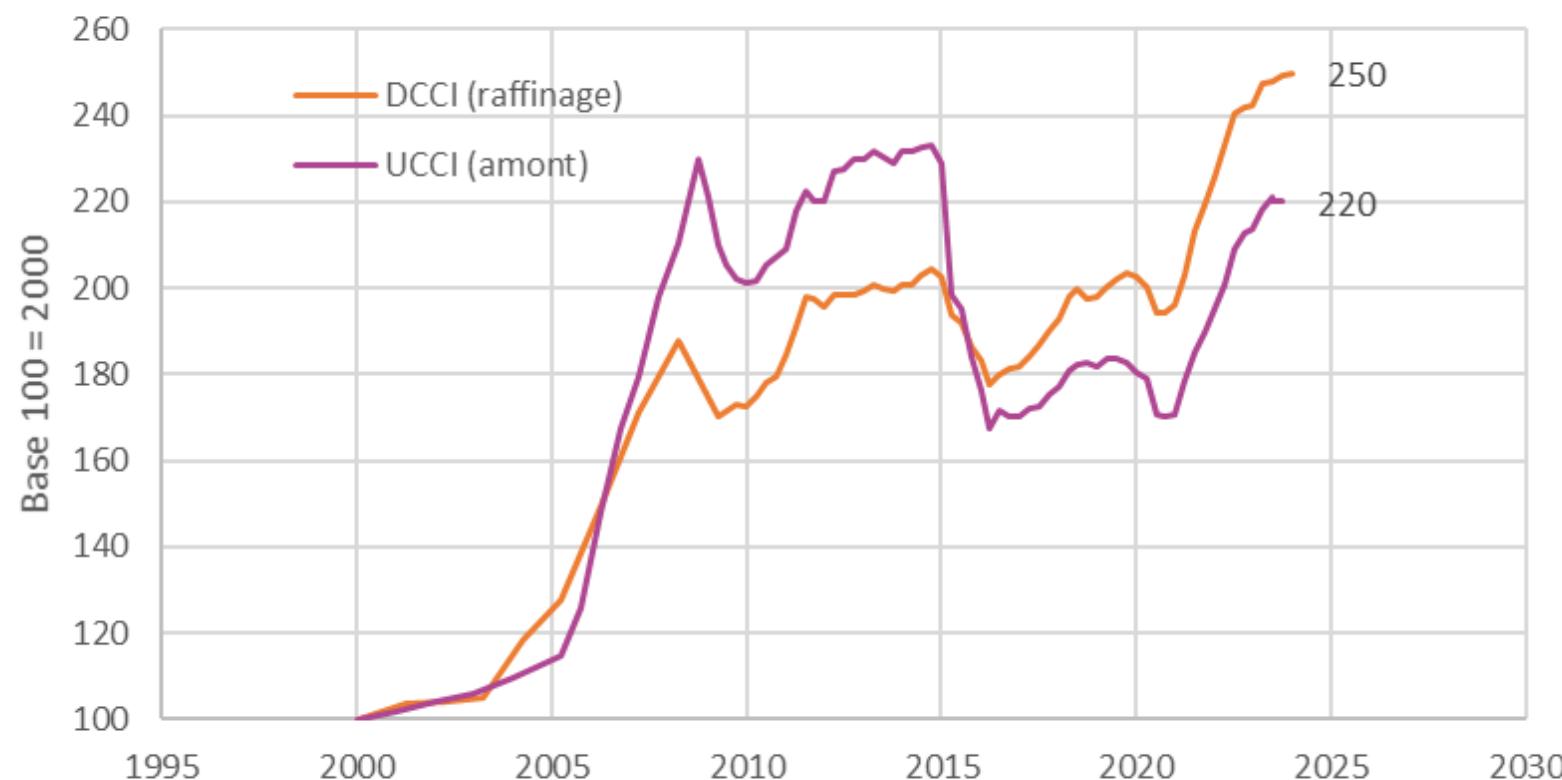
Source : ASPOdata

# Hausse structurelle des prix



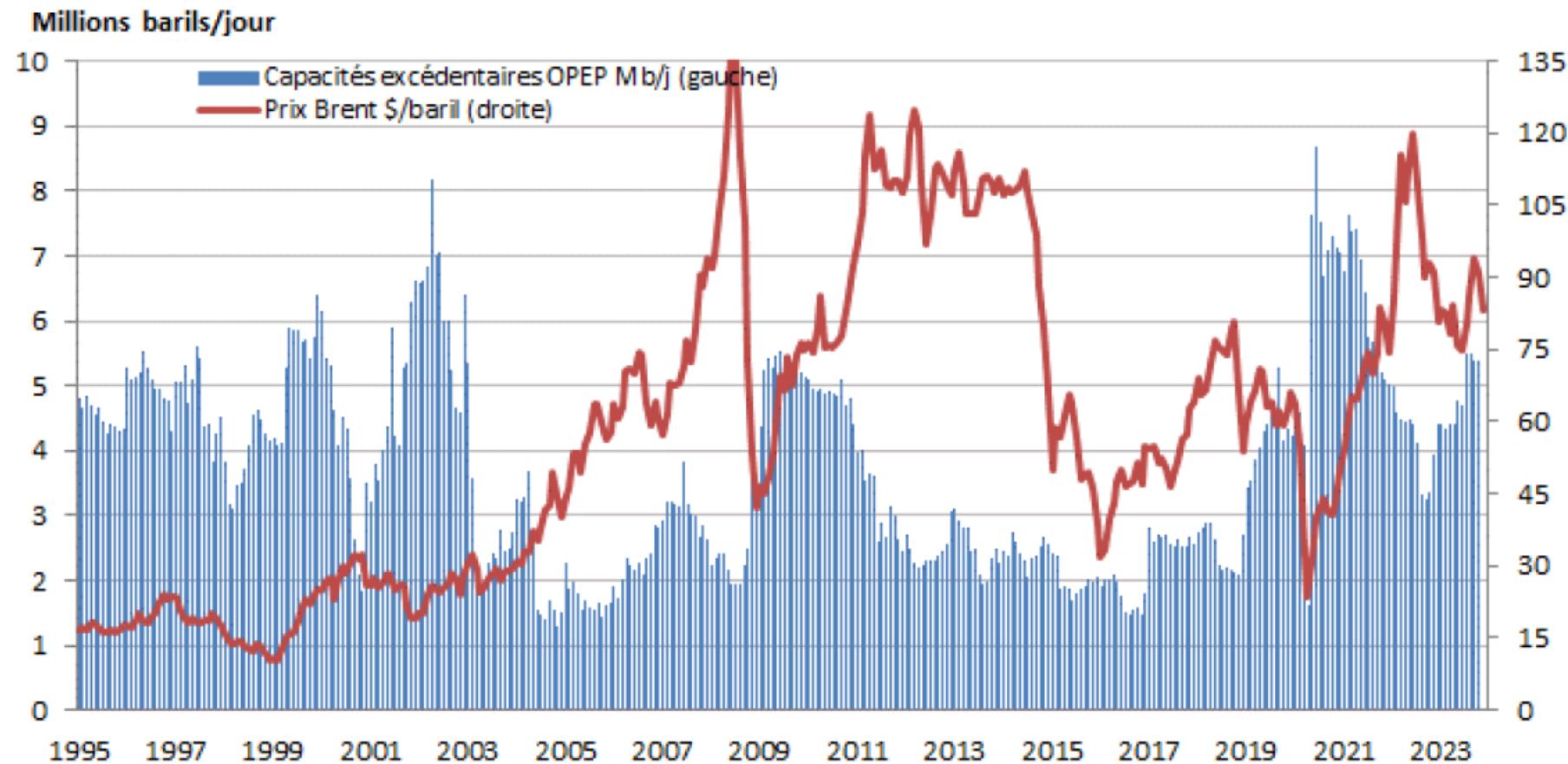
# Prix du produit final

Dépenses en capital de l'amont et l'aval pétrolier



Hugo DUTERNE d'après S&P

# Composante moyen-terme



# Composante court terme

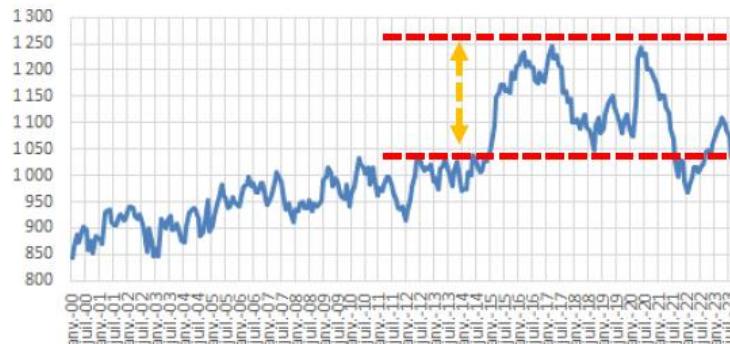
## LES STOCKS - LA COMPOSANTE DE COURT TERME DU PRIX: UN SIGNAL FORTEMENT VOLATILE DEPUIS 2014...

Stocks industrie totaux - OCDE (Mb)

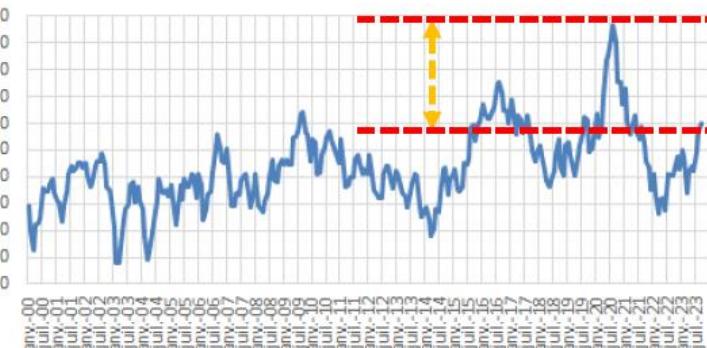


Source of data : IEA Oil Market Report

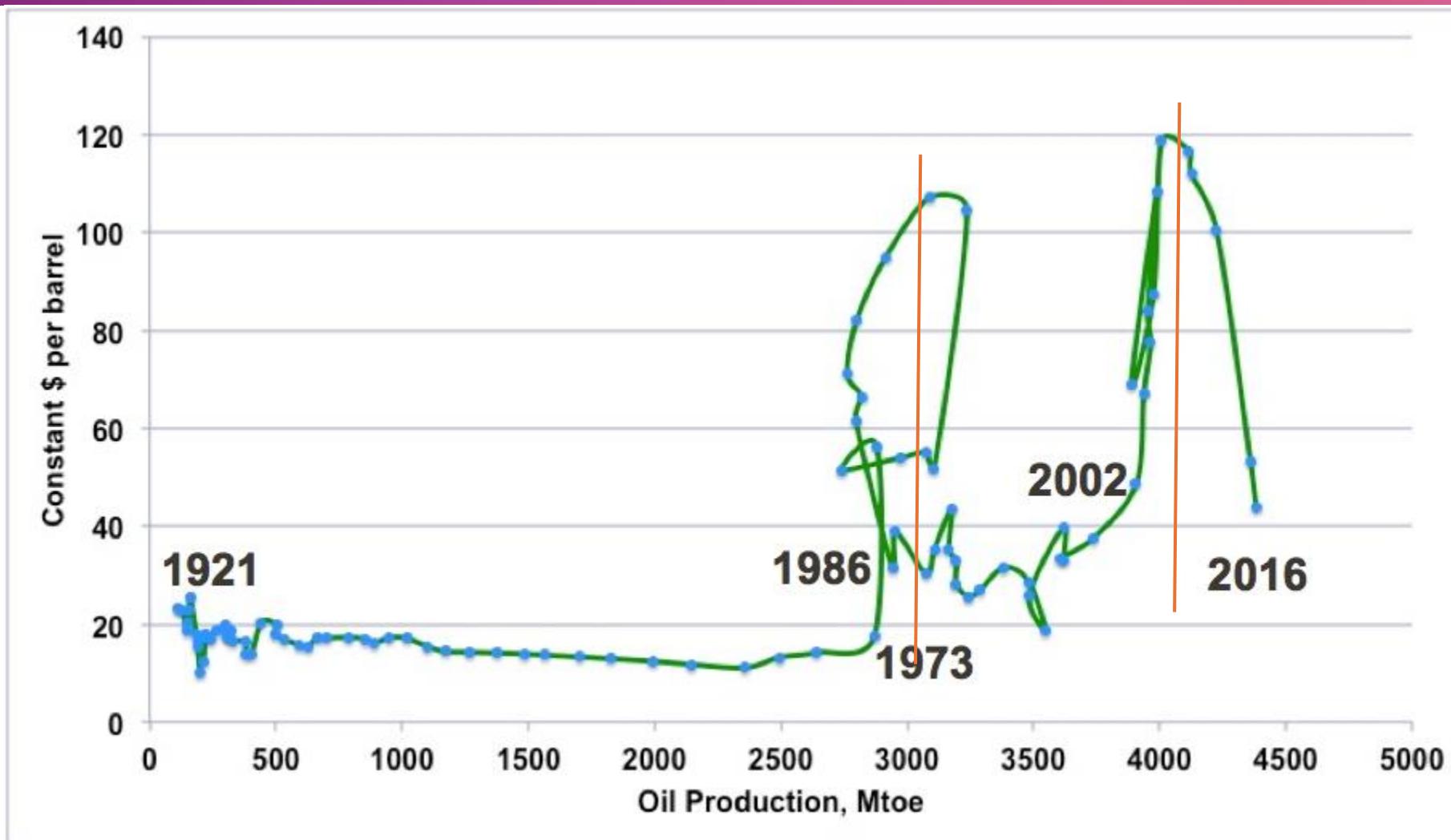
Stocks industrie pétrole brut - OCDE (Mb)



Stocks total products - OCDE (Mb)

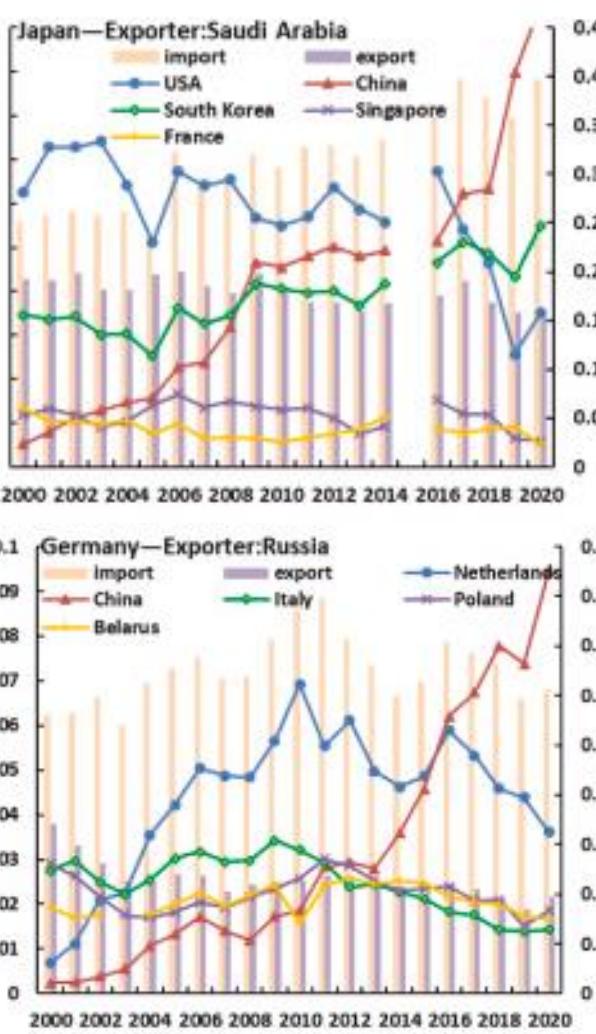
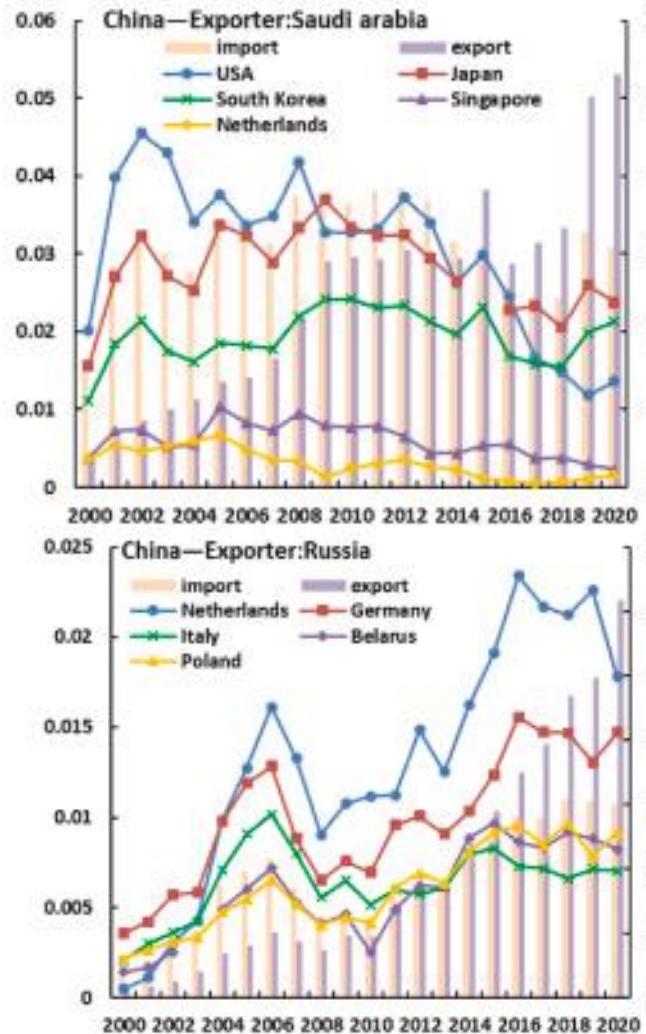


# Hausse de la volatilité

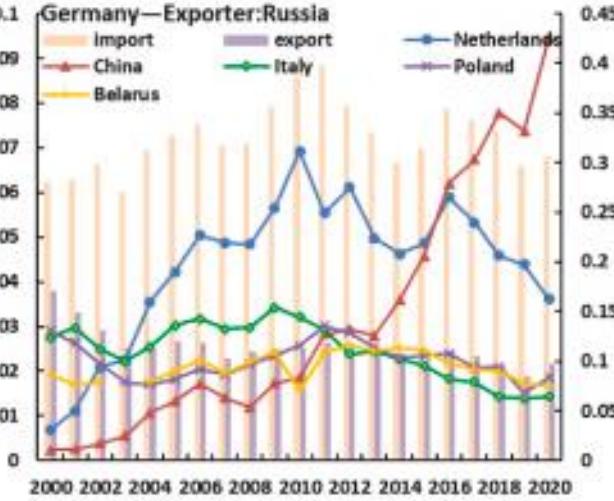
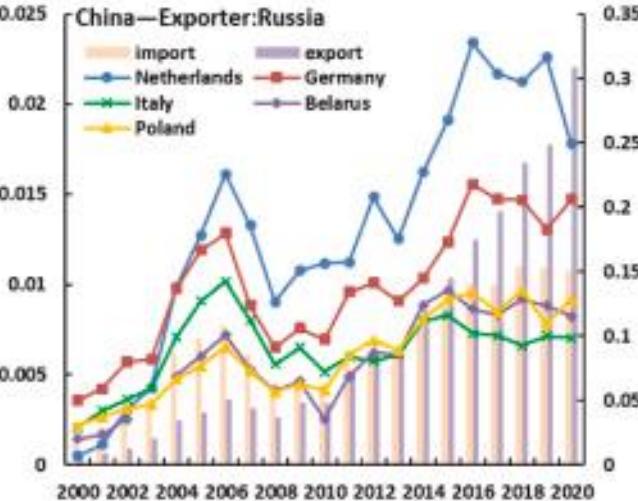


# Concurrence internationale

Import competition pressure



Proportion of export and imports



- Import competition pressure is the pressure caused by the unbalanced import proportion between two countries who have the same import origins.

- China has gotten increasing competitive pressure from Germany and Netherlands in Russia in recent years, but decreasing in Saudi Arabia.

# Elasticité de la demande

**Table 3.1. Oil Demand Price and Income Elasticities**

(Subsample, 1990–2009)

	Short-Term Elasticity		Long-Term Elasticity	
	Price	Income	Price	Income
Combined OECD <sup>1</sup> and Non-OECD	-0.019 [-0.028, -0.009]	0.685 [0.562, 0.808]	-0.072 [-0.113, -0.032]	0.294 [0.128, 0.452]
OECD	-0.025 [-0.035, -0.015]	0.671 [0.548, 0.793]	-0.093 [-0.128, -0.057]	0.243 [0.092, 0.383]
Non-OECD	-0.007 [-0.016, 0.002]	0.711 [0.586, 0.836]	-0.035 [-0.087, 0.013]	0.385 [0.193, 0.577]

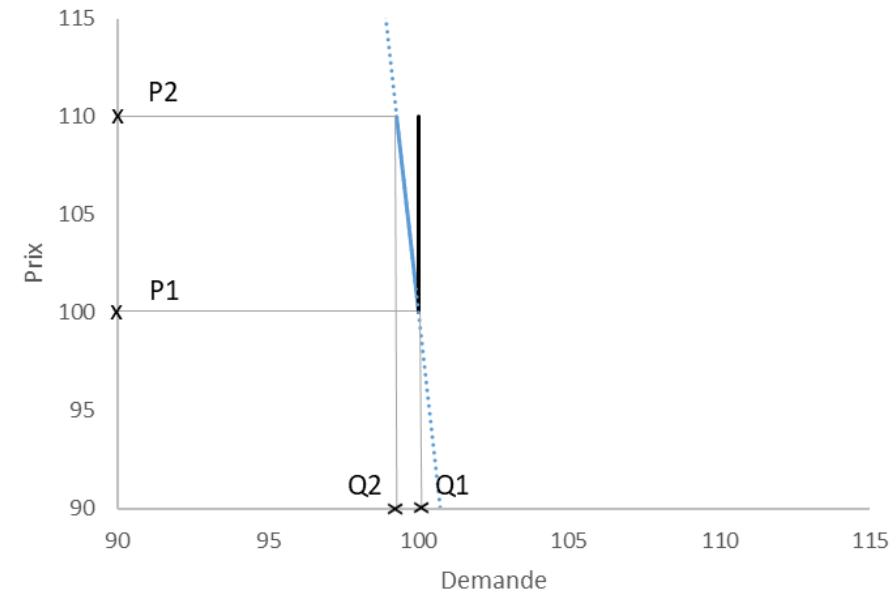
Source: IMF staff calculations.

Note: Median elasticities and confidence intervals showing 10th and 90th percentile of the distribution in brackets are estimated by Monte Carlo simulations. Long-term elasticities are calculated using a 20-year horizon.

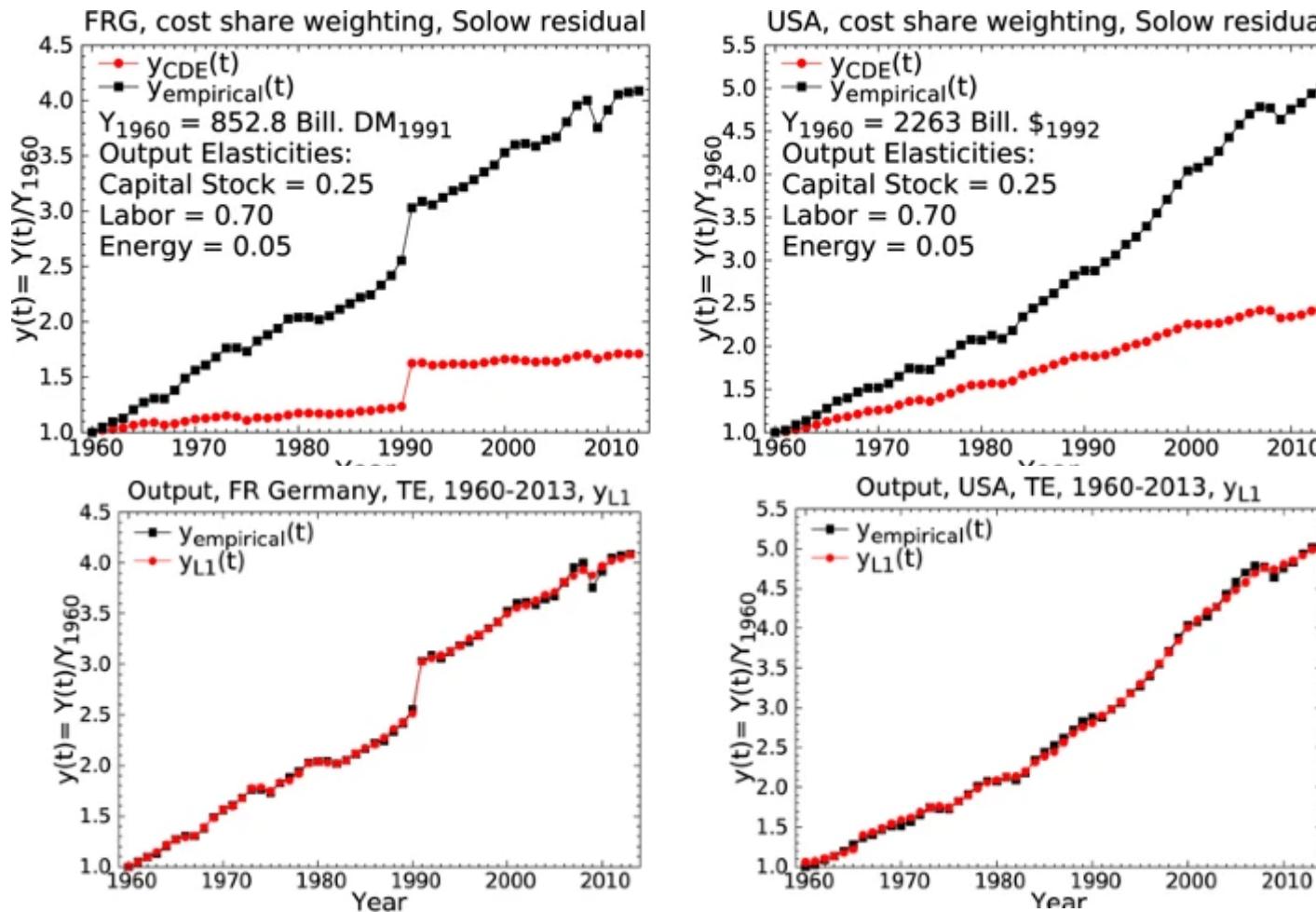
<sup>1</sup>OECD = Organization for Economic Cooperation and Development.

Le pétrole est quasi équivalent à un bien inélastique ( $e=0$ ), ou bien de nécessité. Il n'est quasiment pas substituable à court terme et très peu à long terme.

Elasticité prix de LT de la demande en pétrole  
 $e = -0,072$

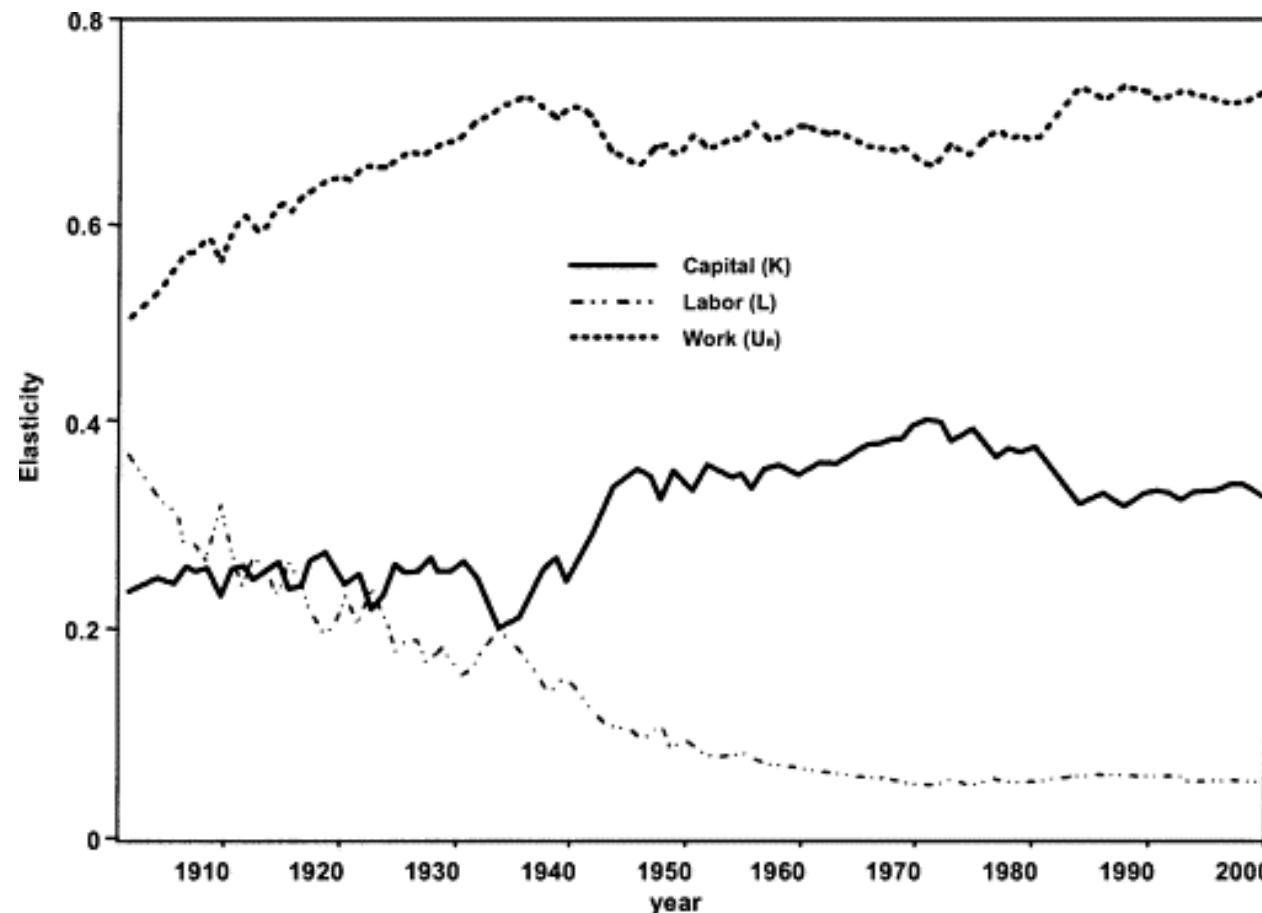


# L'offre pétrolière comme facteur de production



Lindenberger, D.,  
Weiser, F., Winkler,  
T. et al (2017)

# Sensibilité de la production à l'énergie



Robert U. Ayres,  
Benjamin Warr (2005)

Marginal productivities (elasticities) of each factor of production using UB, USA, 1900–1998.

# Bilan partie 3

- Le coût d'extraction du pétrole (composante de long terme) est orienté à la hausse en raison de la mise en production de gisements à forte intensité capitaliste
- La hausse de la concurrence internationale pour l'accès à la ressource induit une hausse de la volatilité des prix
- Malgré la hausse tendancielle des prix le pétrole reste un bien « inélastique » proche d'un produit de première nécessité (alimentation). Si elle stimule les investissements dans les nouveaux gisements, la hausse des prix pétroliers ne constraint pas la demande à la baisse
- En revanche, on observe que l'énergie et par conséquent le pétrole est un facteur de production longtemps sous estimé. Historiquement, l'offre de pétrole « génère » de l'activité économique et non l'inverse.

Conclusion fil rouge : Le pétrole est une ressource limitée (partie 1) dont l'extraction et l'utilisation s'avère toujours plus coûteuse (partie 2 et 3) mais dont la demande semble toujours plus forte. Si la fin du pétrole ne vient pas d'un manque de demande faut-il regarder du côté d'un manque d'offre ?



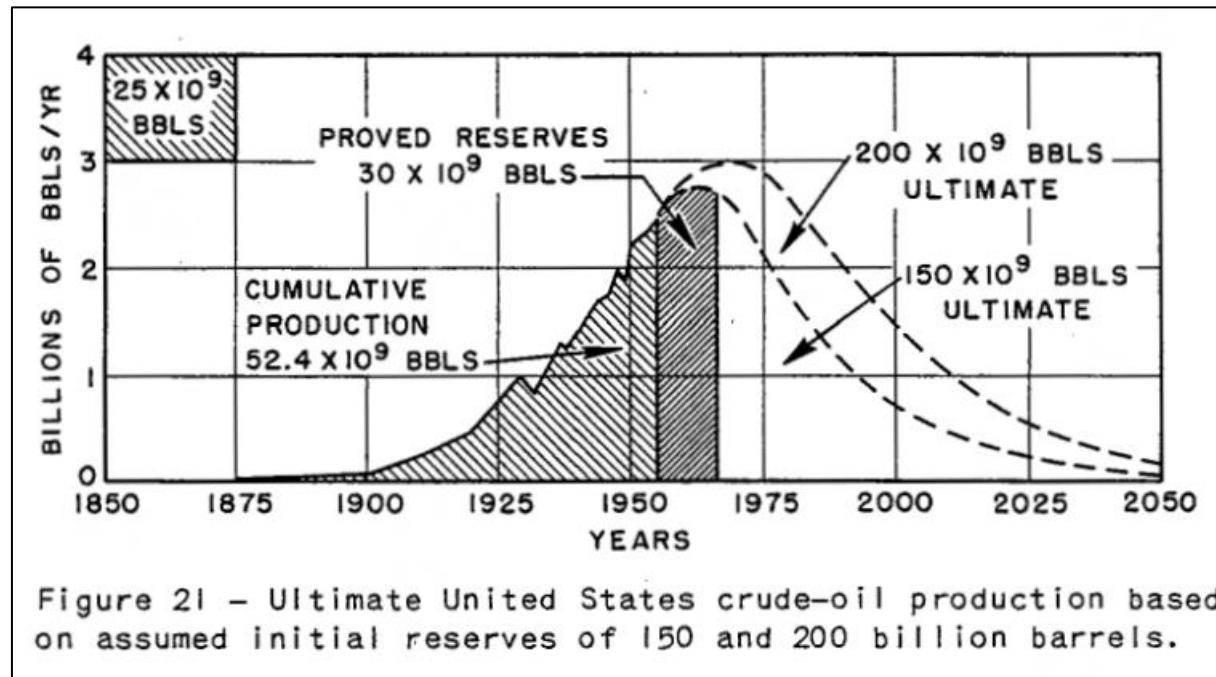
CentraleSupélec

- I. Nature du pétrole**
- II. Traitement et utilisation**
- III. Pétrole et économie**
- IV. Finitude des ressources**
- V. La situation européenne**



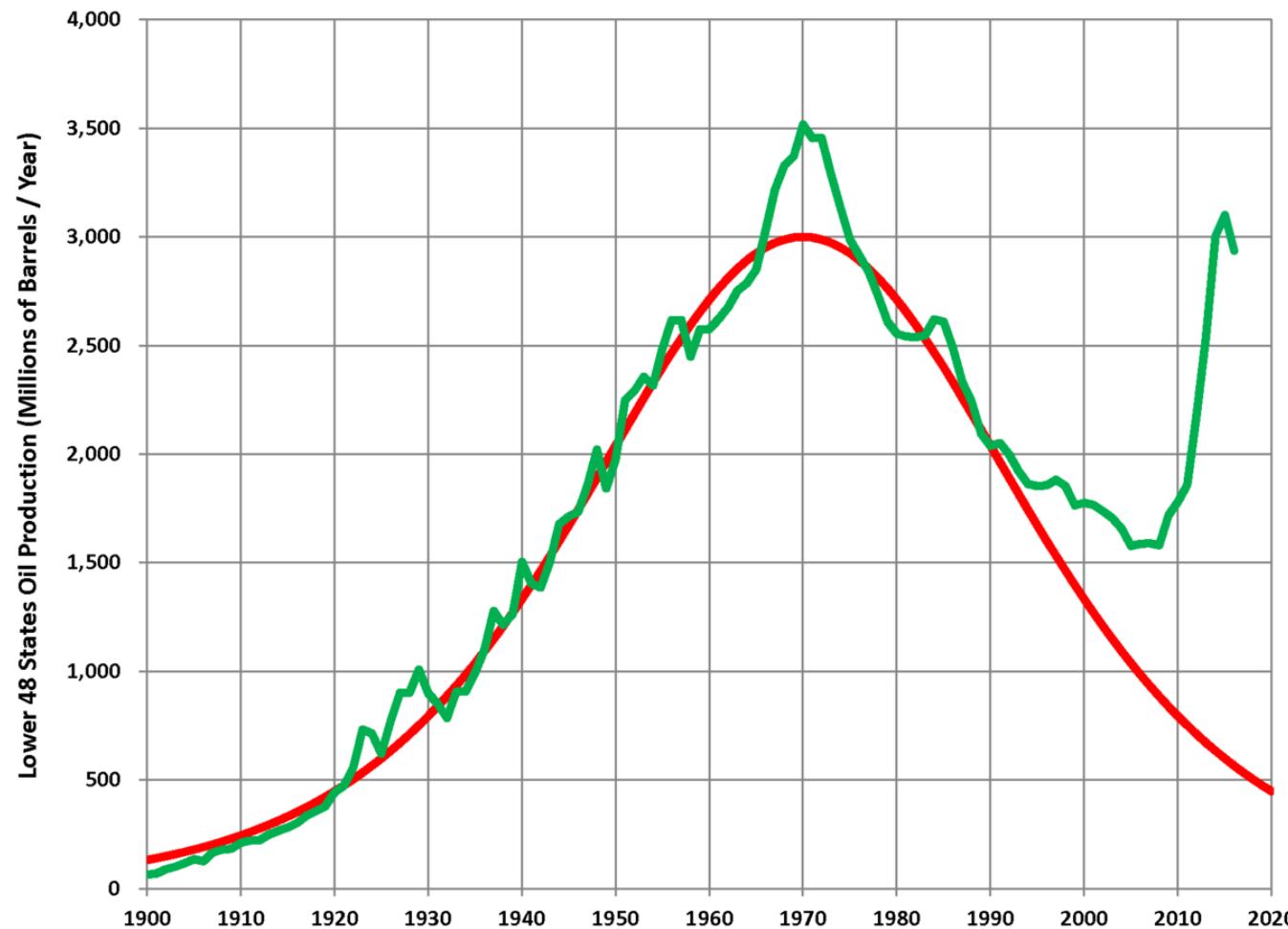
ASPO France

# Le débat sur le peak oil

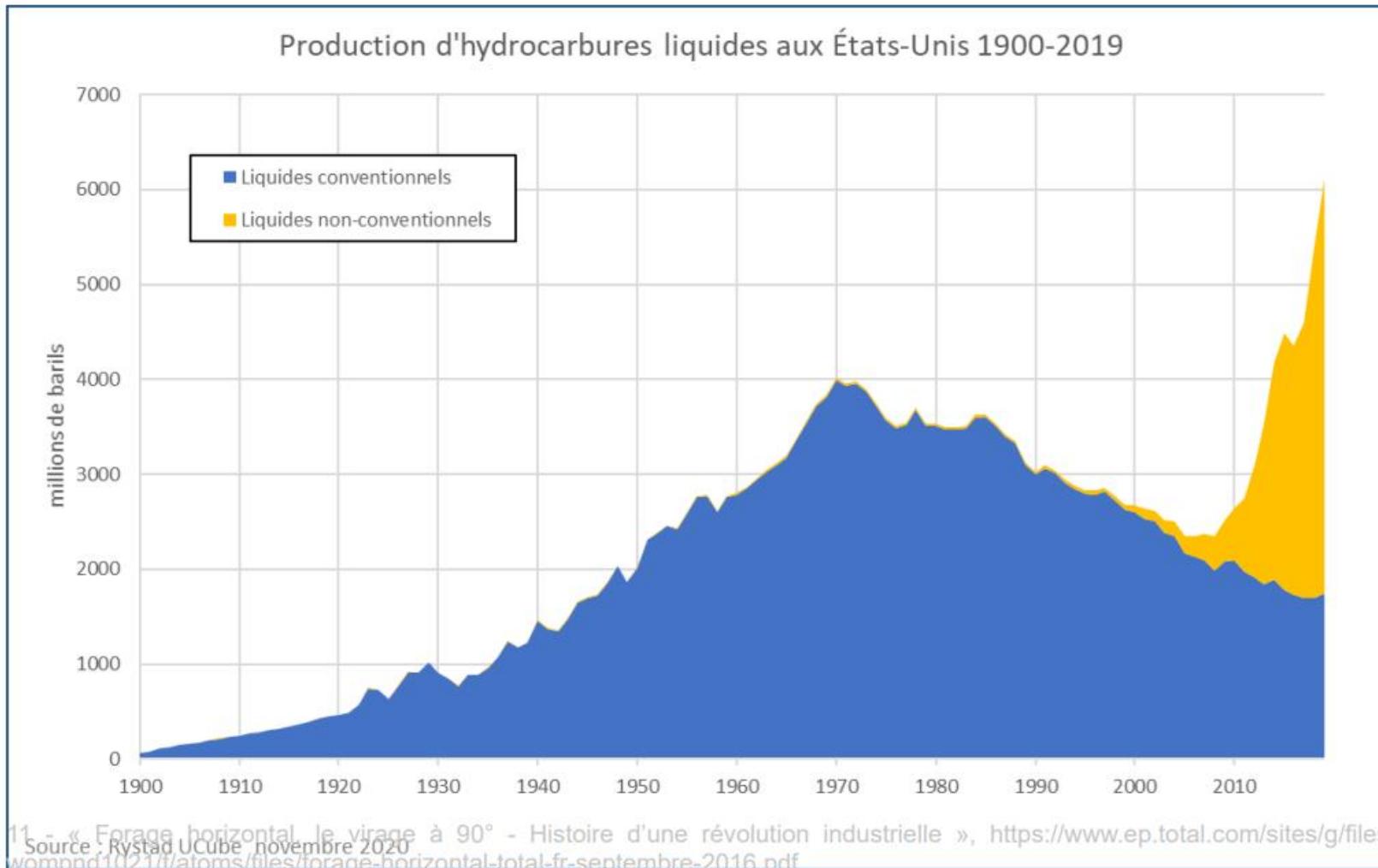


Modèle présenté par King Hubbert en 1956, lors d'un meeting de l'American Petroleum Institute à San Antonio, au Texas,

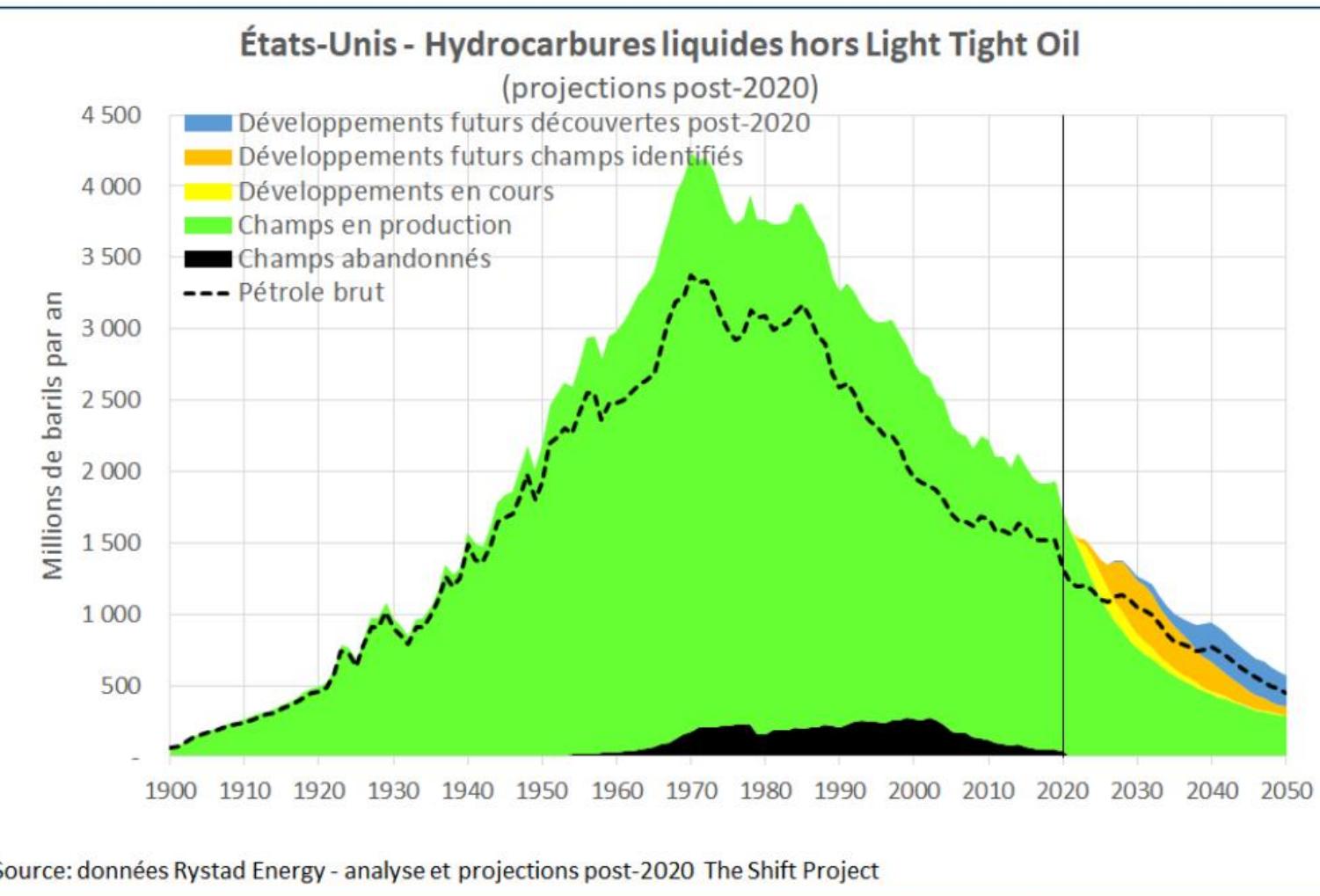
# Le débat sur le peak oil



# Le débat sur le peak oil



# Le débat sur le peak oil

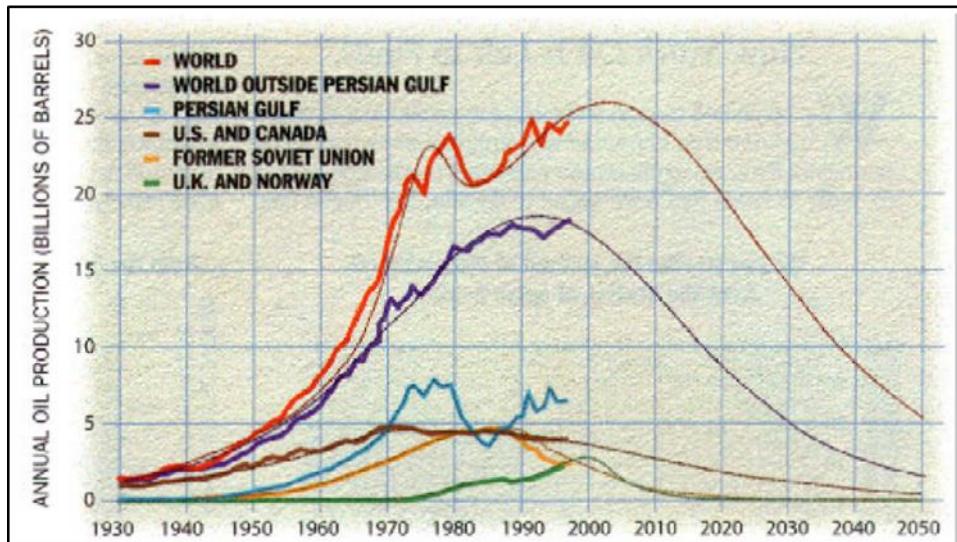


# Le débat sur le peak oil

## The End of Cheap Oil

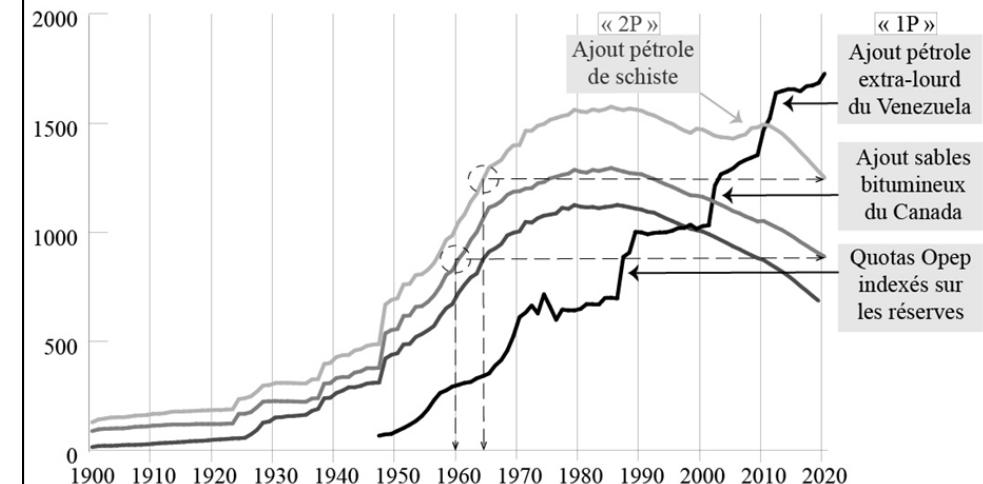
Global production of conventional oil will begin to decline sooner than most people think, probably within 10 years

by Colin J. Campbell and Jean H. Laherrère



## Réserves : les données officielles augmentent, les données techniques déclinent

Réserves mondiales restantes de pétrole, 1900 - 2020 (Milliards de barils)



### Réserves restantes déclaratives « 1P » « prouvées »

— Pétroles conventionnel et non conventionnels. Source : EIA/Oil & Gas Journal

### Réserves restantes techniques « 2P » « prouvées et probables »

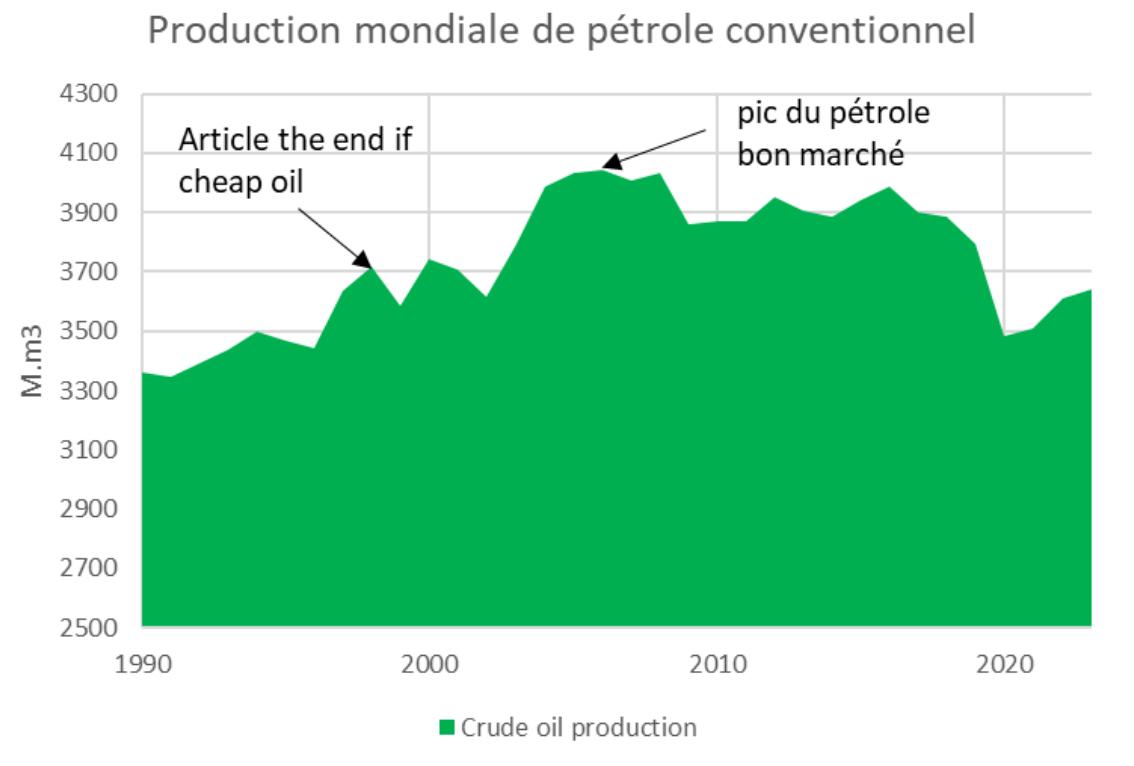
— Pétroles conventionnel et non conventionnels. Source : Rystad Energy, 2020

— Pétrole conventionnel. Source : Rystad Energy, 2020

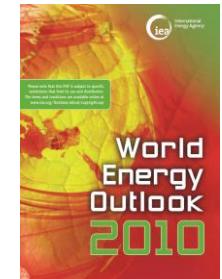
— Pétrole conventionnel. Source : Jean Laherrère 2020 (Petroconsultants, IHS, USDOE, CAPP, API)

NB : Ces trois séries sont « backdatées », c'est-à-dire que le volume total des découvertes passées a été réévalué et réajusté au fil du temps.

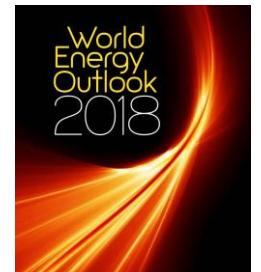
# Le débat sur le peak oil



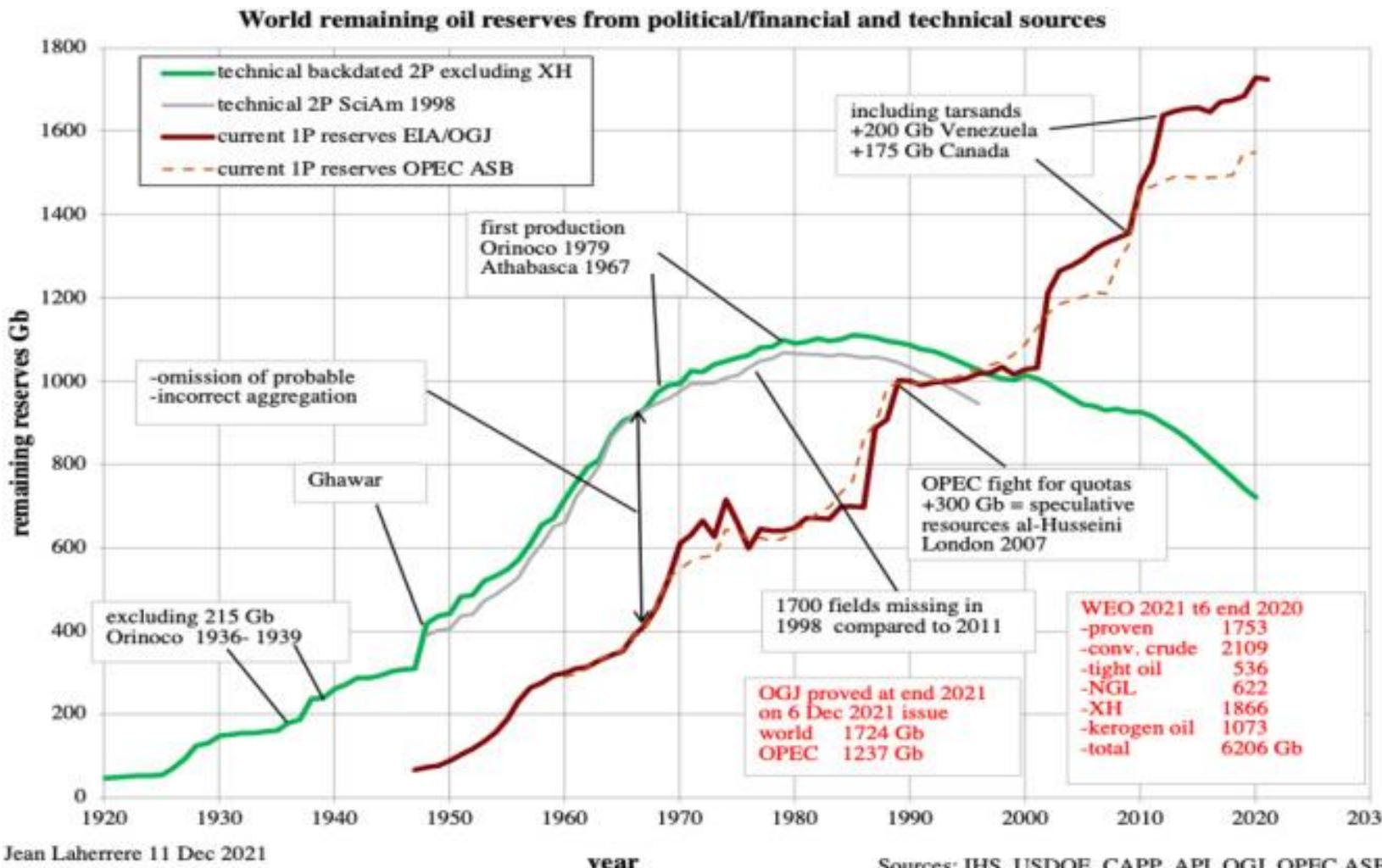
the balance of 3 mb/d coming from processing gains. Crude oil output reaches an undulating plateau of around 68-69 mb/d by 2020, but never regains its all-time peak of 70 mb/d reached in 2006, while production of natural gas liquids (NGLs) and



Global conventional crude oil production peaked in 2008 at 69 mb/d and has since fallen by just over 2.5 mb/d. In the New Policies Scenario, it drops by a further 3 mb/d by 2040 and its share in the global supply mix falls from 72% today to 62% in 2040 (Figure 3.6).

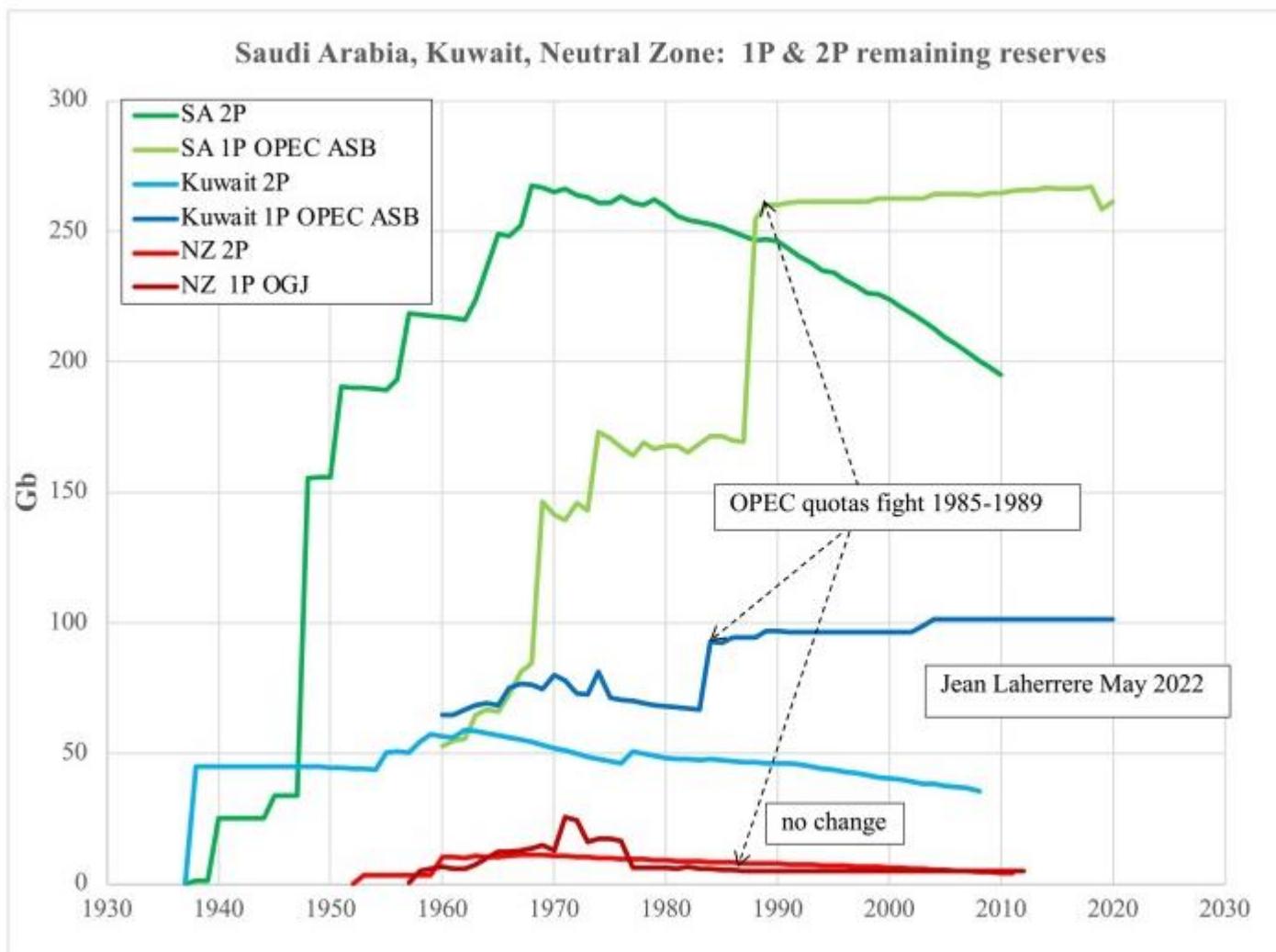


# Chiffrer les réserves



Chiffres publics vs  
chiffres techniques

# Chiffrer les réserves



# Estimation des réserves

Estimation pour un champ :

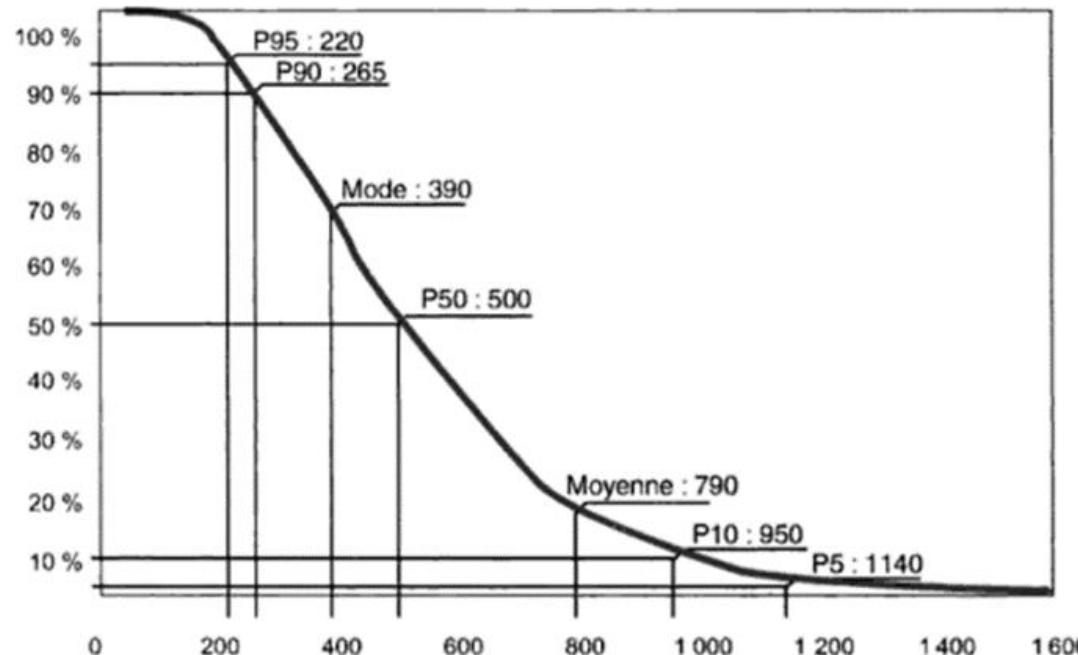


Figure 3.2 Fonction de répartition d'une loi LogNormale modélisant la distribution de la taille d'un champ de pétrole.

Estimation pour un ensemble de champ :

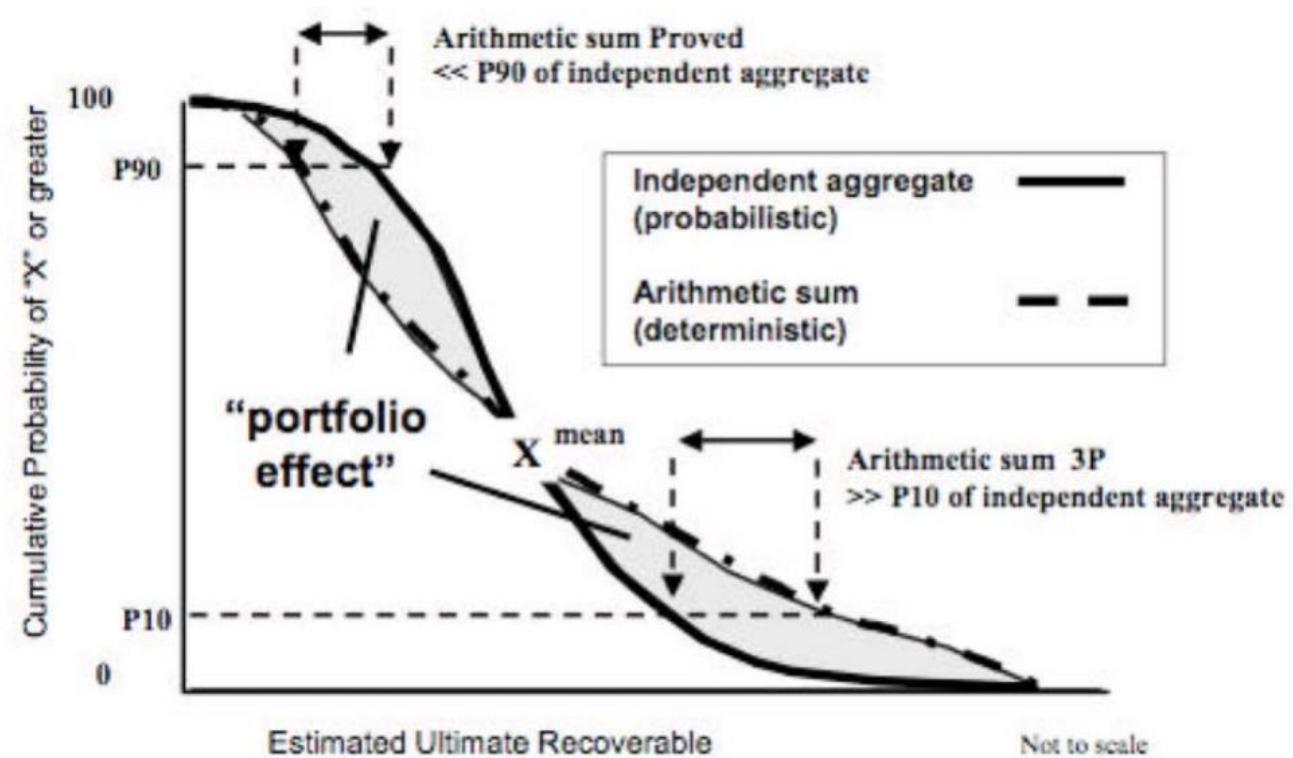
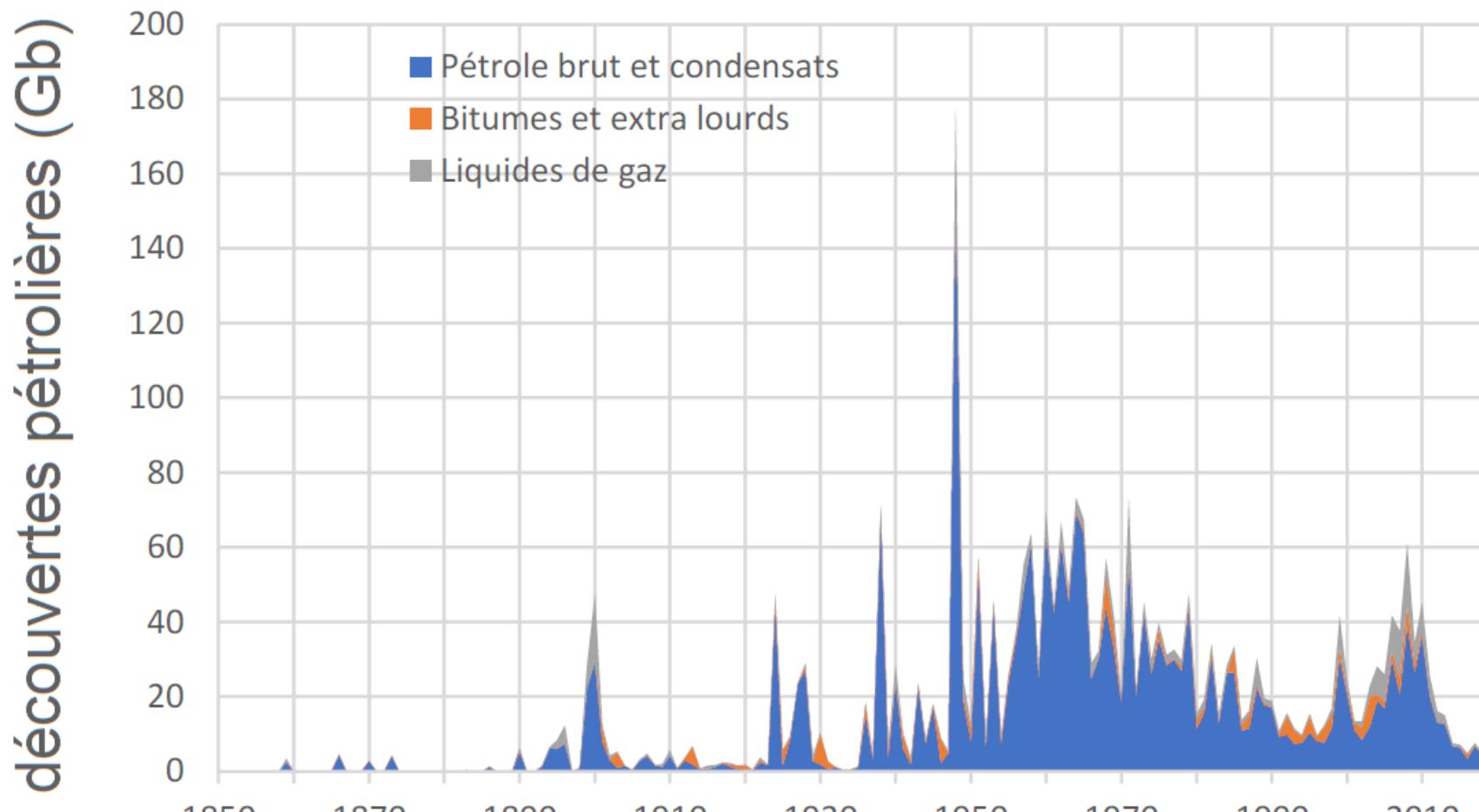


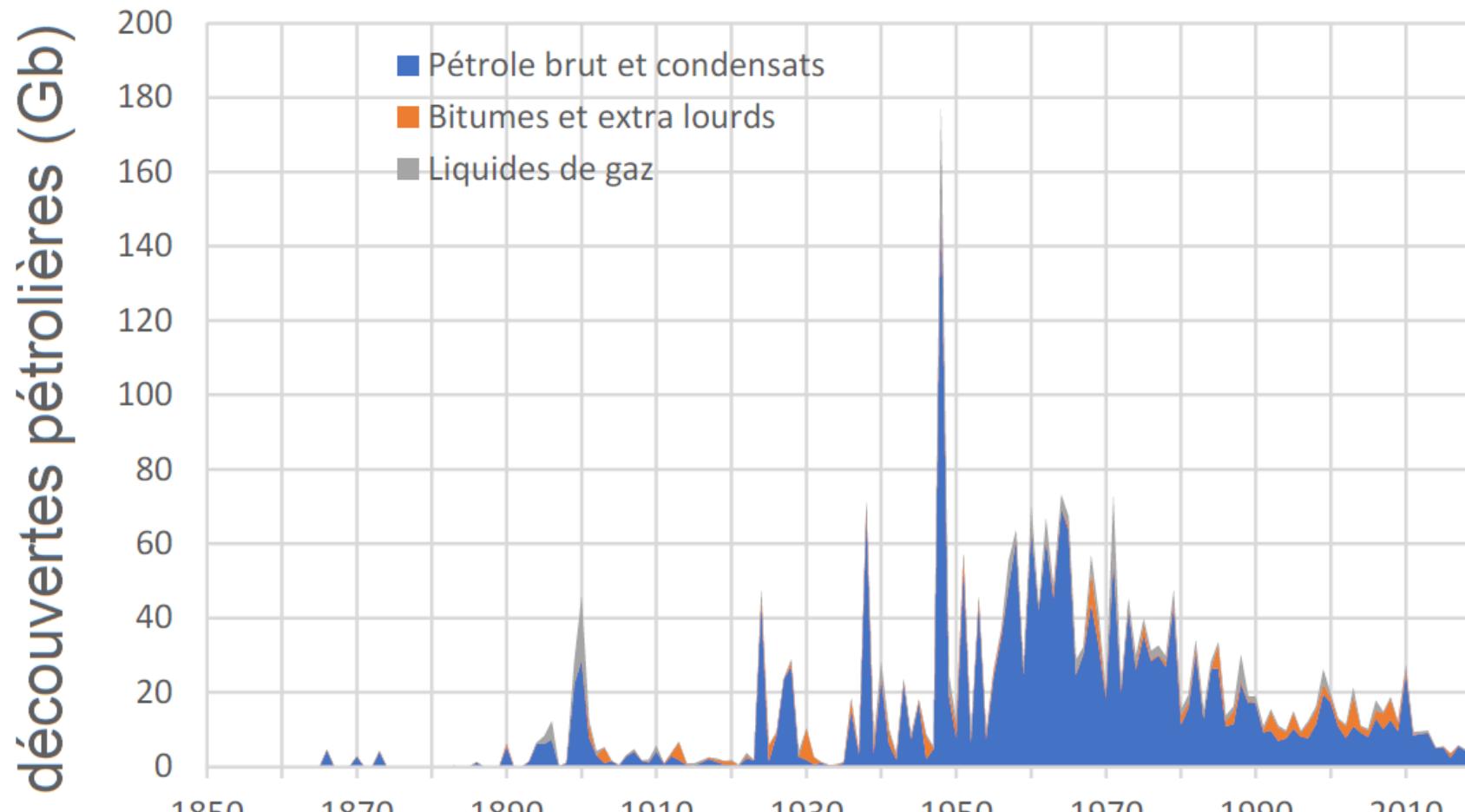
Figure 3-2: Deterministic versus Probabilistic Aggregation

# Découvertes 2P en déclin



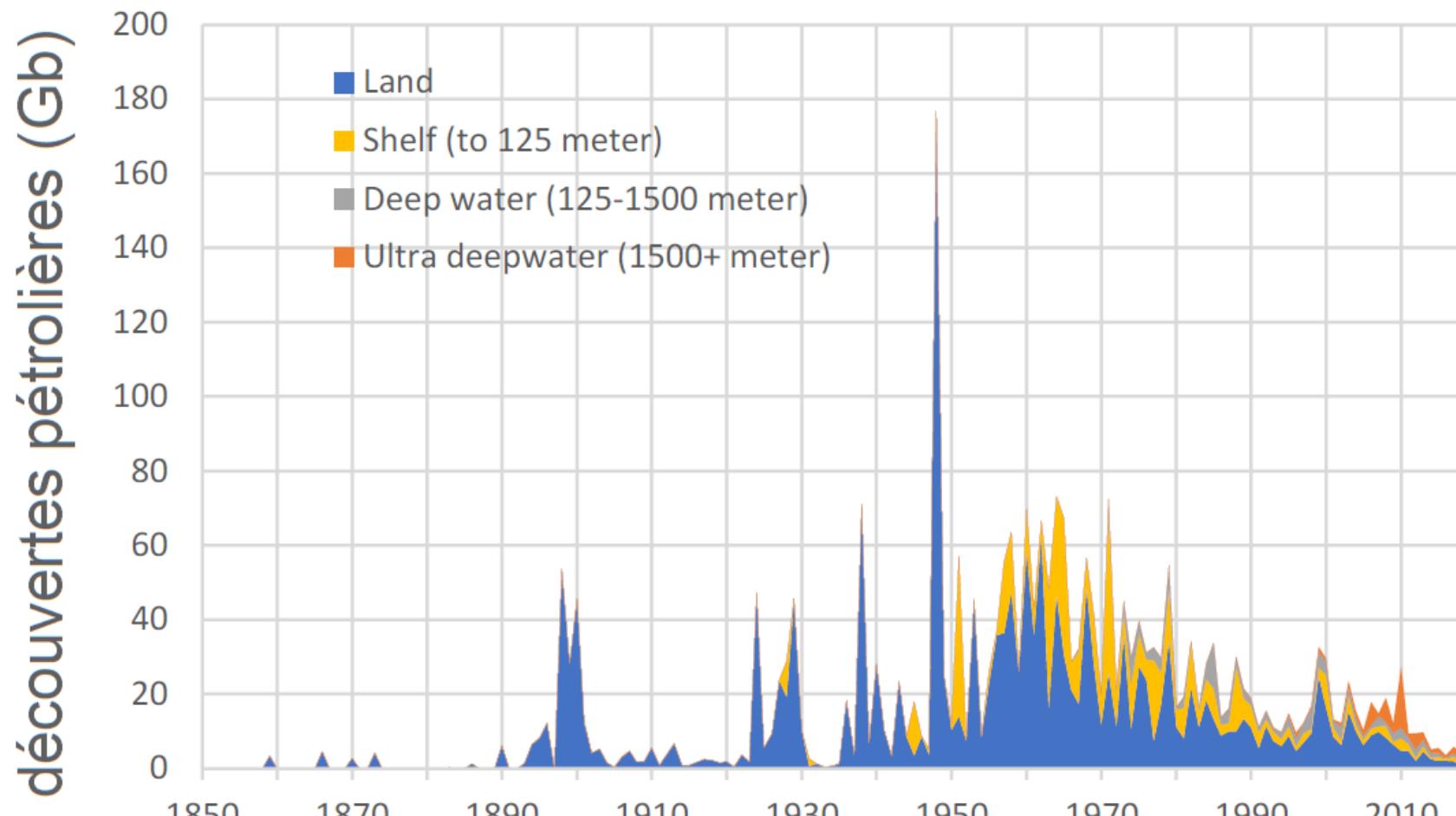
Source : Shift Project d'après Rystad Energy

# Découvertes hors LTO



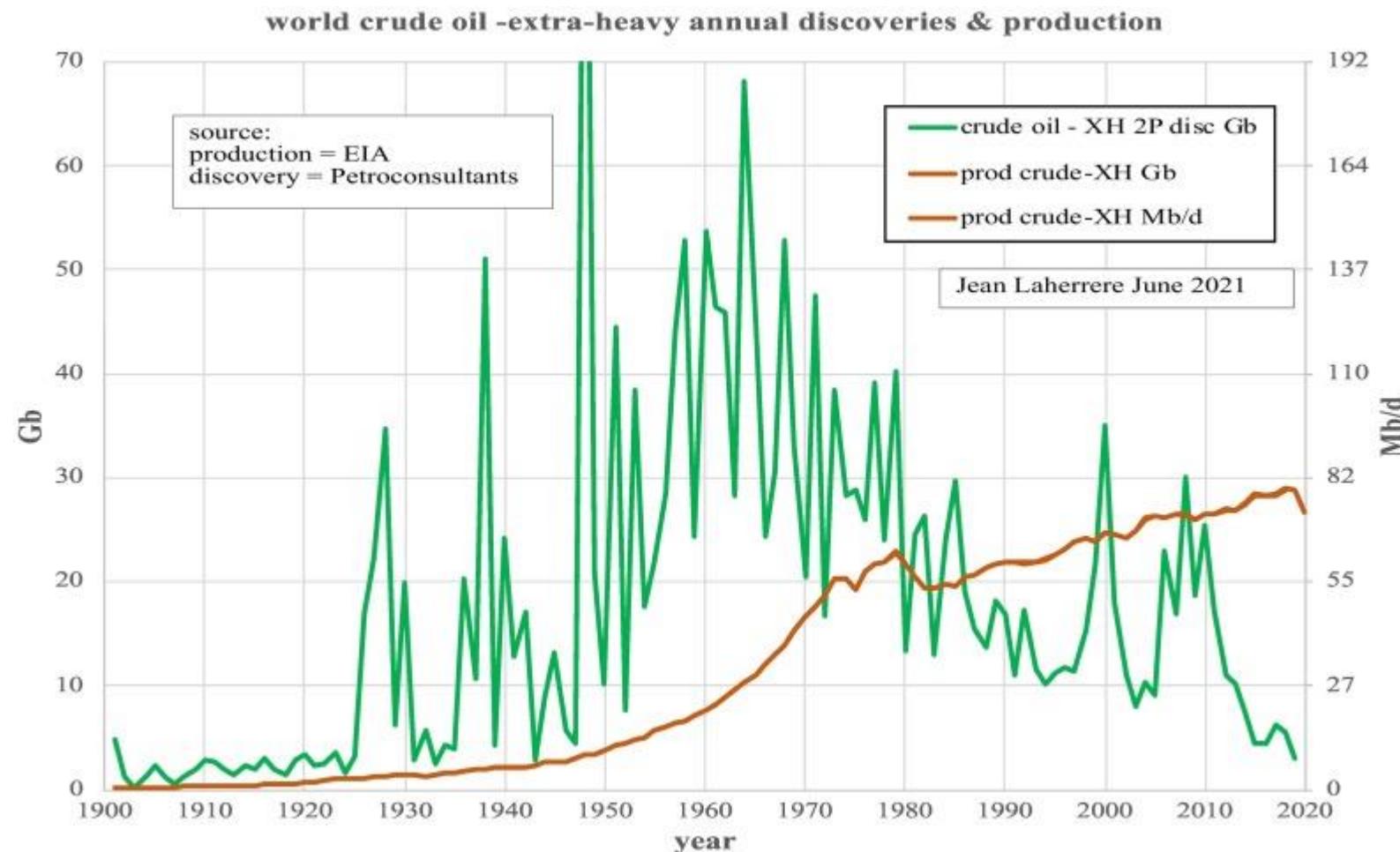
Source : Shift Project d'après Rystad Energy

# Découvertes offshore

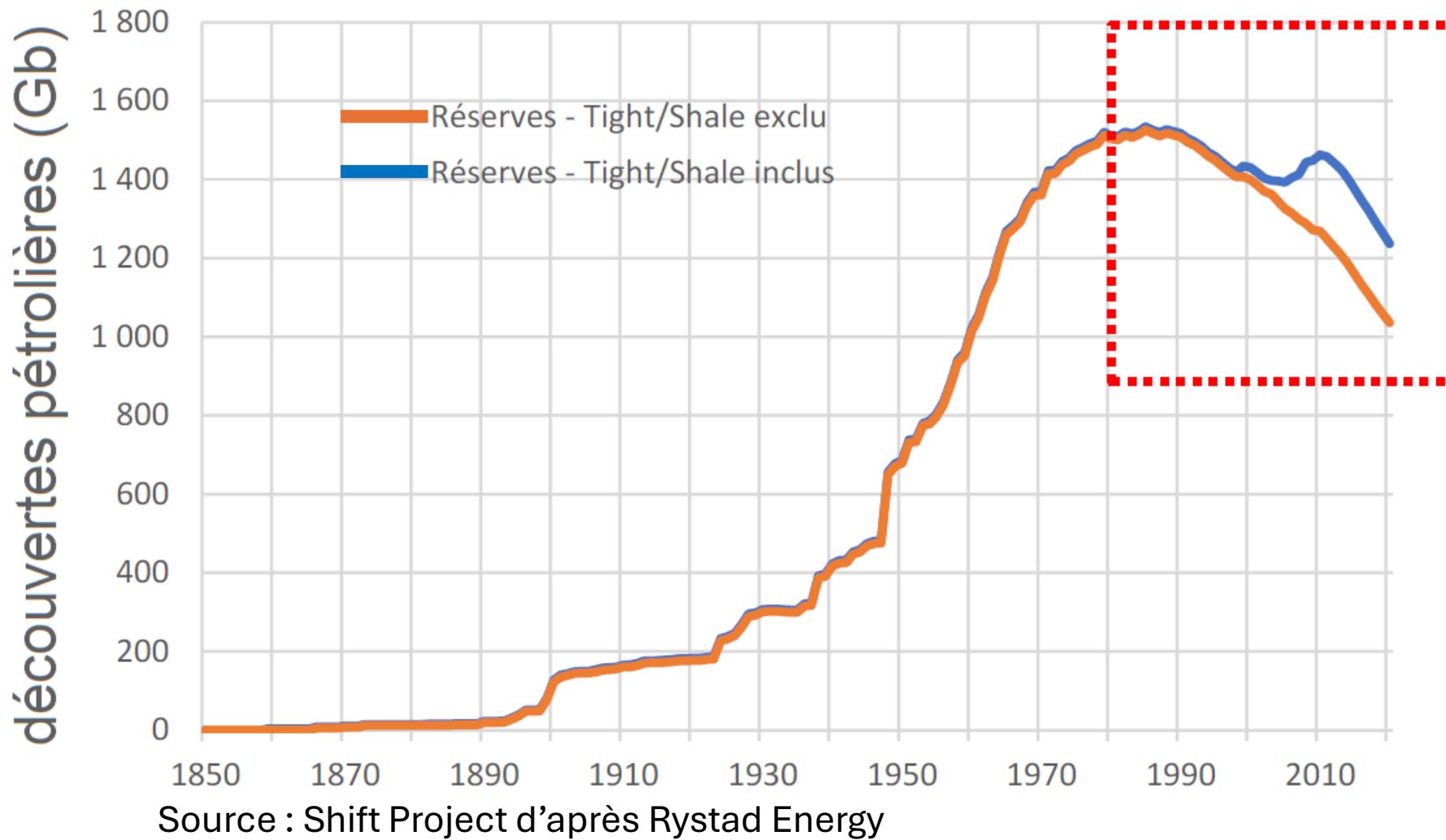


Source : Shift Project d'après Rystad Energy

# Croisement découvertes-production



# Déclin des réserves



# Bilan partie 4

- L'analyse de l'état des réserves pour évaluer le potentiel de production à long terme a fait historiquement ses preuves avec les prévisions de Hubbert puis Campbell et Laherrère
- Cette analyse s'appuie sur une définition rigoureuse des réserves, dites réserves 2P ou réserves techniques
- Néanmoins ces données sont confidentielles et donc peu présentes dans le débat public (sauf à Centrale-Supélec)
- On observe un déclin des découvertes pétrolières depuis le milieu des années 1960 et un déclin des réserves mondiales depuis le milieu des années 1980. Le niveau actuel des réserves est équivalent au niveau de 1960 mais la consommation est 3,5 fois plus forte qu'à l'époque.

**Conclusion fil rouge : La raréfaction de l'offre pétrolière pose un défi majeur aux économies modernes. Compte tenu du difficile ajustement de la demande et du rôle prépondérant du pétrole dans la création de richesse on peut légitimement craindre des difficultés économiques majeures dans les années qui viennent. Quel est la position européenne dans ce contexte de décrue pétrolière ?**

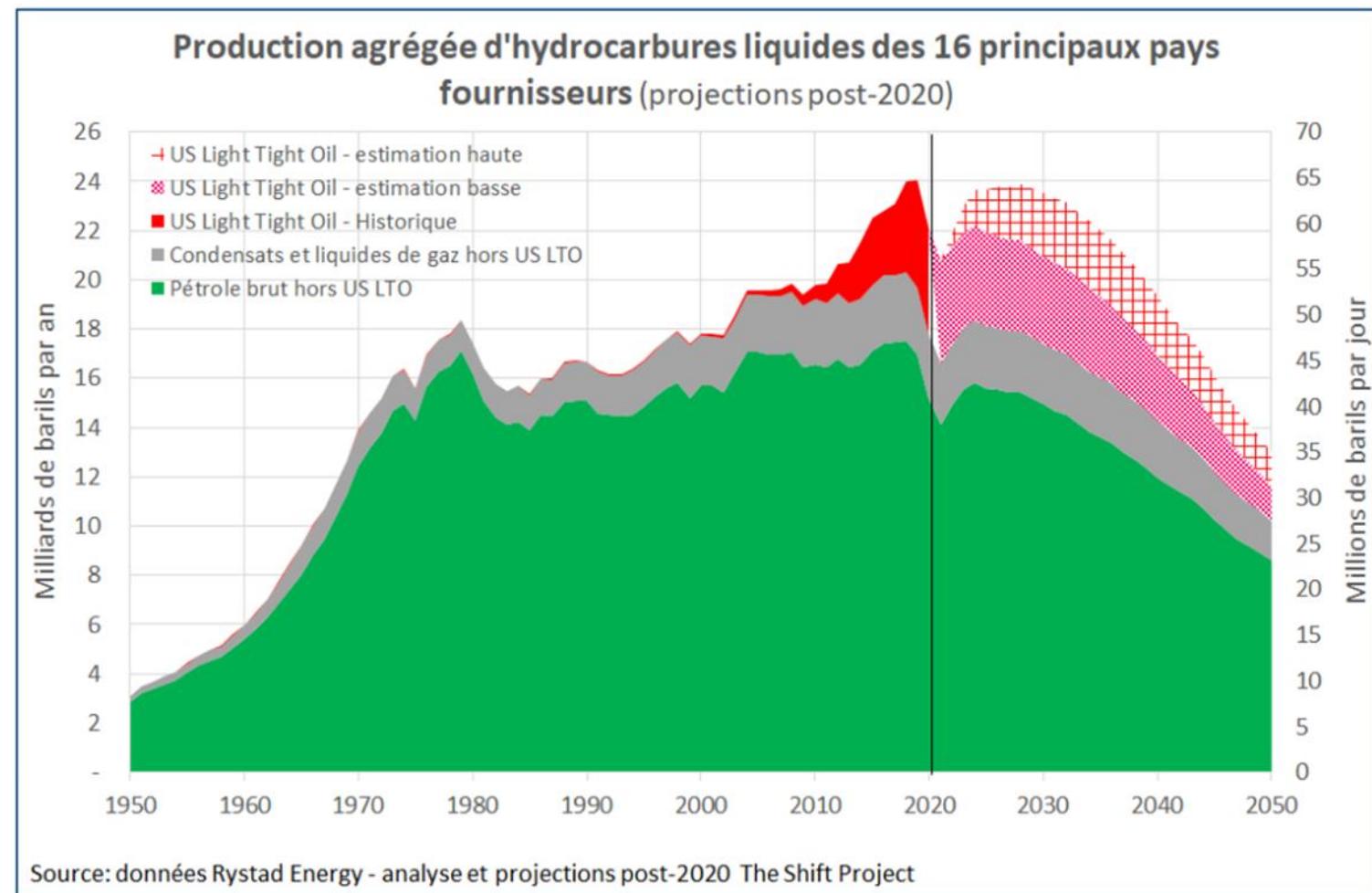


CentraleSupélec

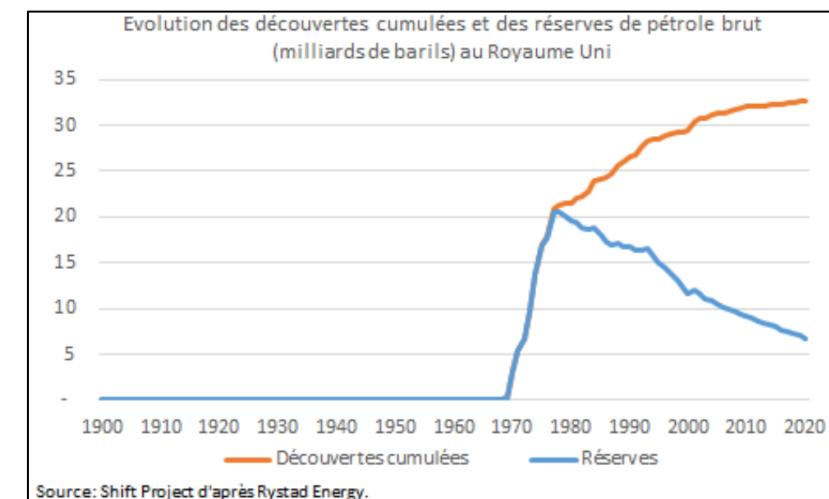
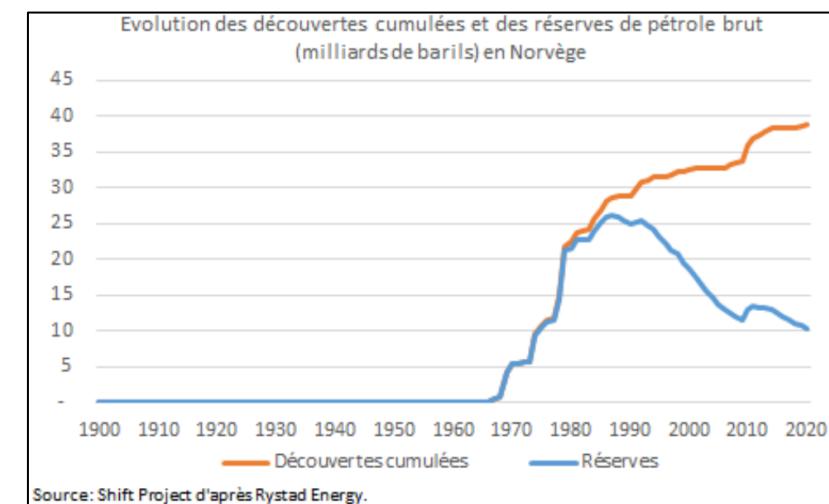
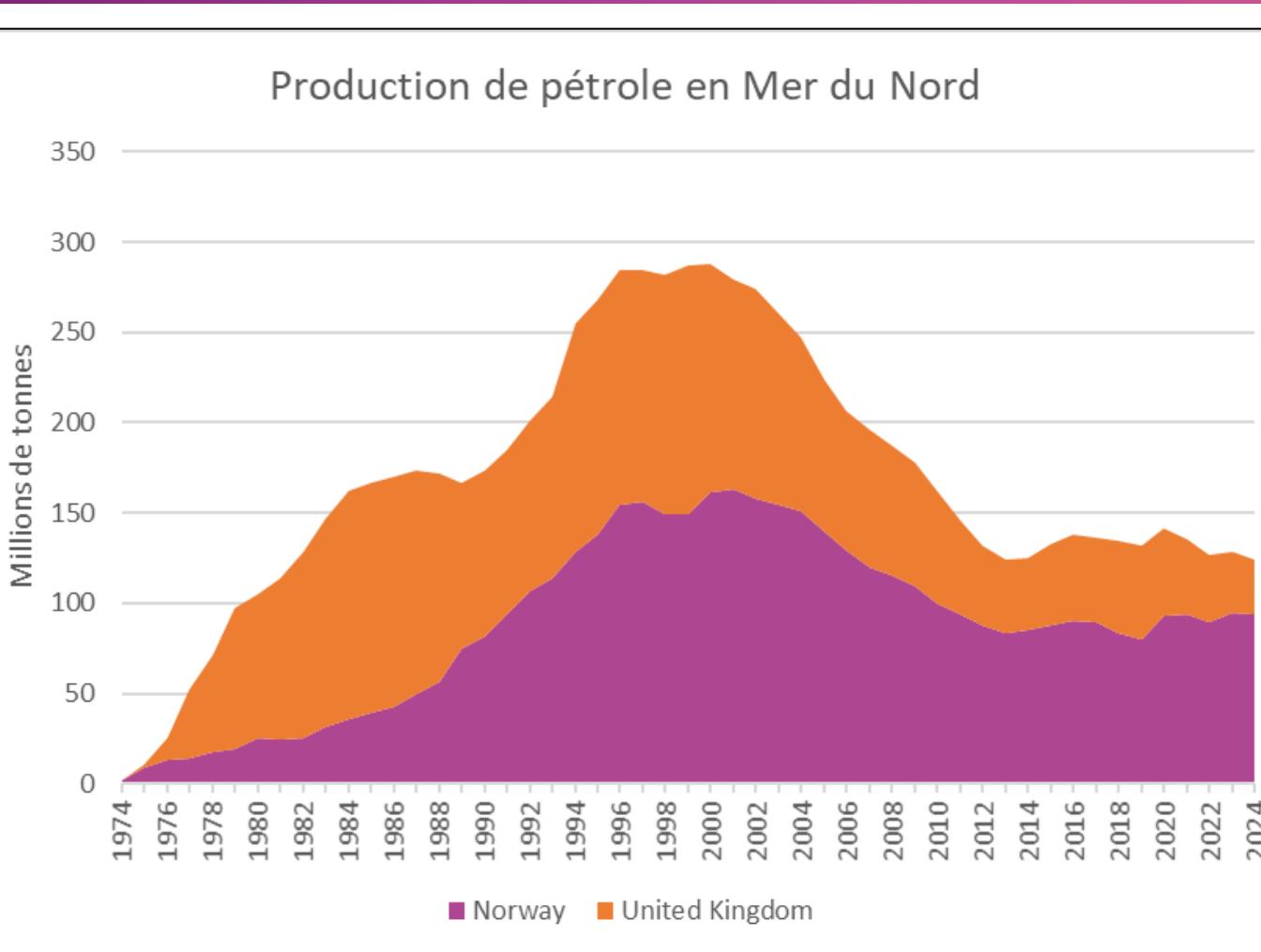
- I. Nature du pétrole**
- II. Traitement et utilisation**
- III. Économie et pétrole**
- IV. Finitude des ressources**
- V. La situation européenne**



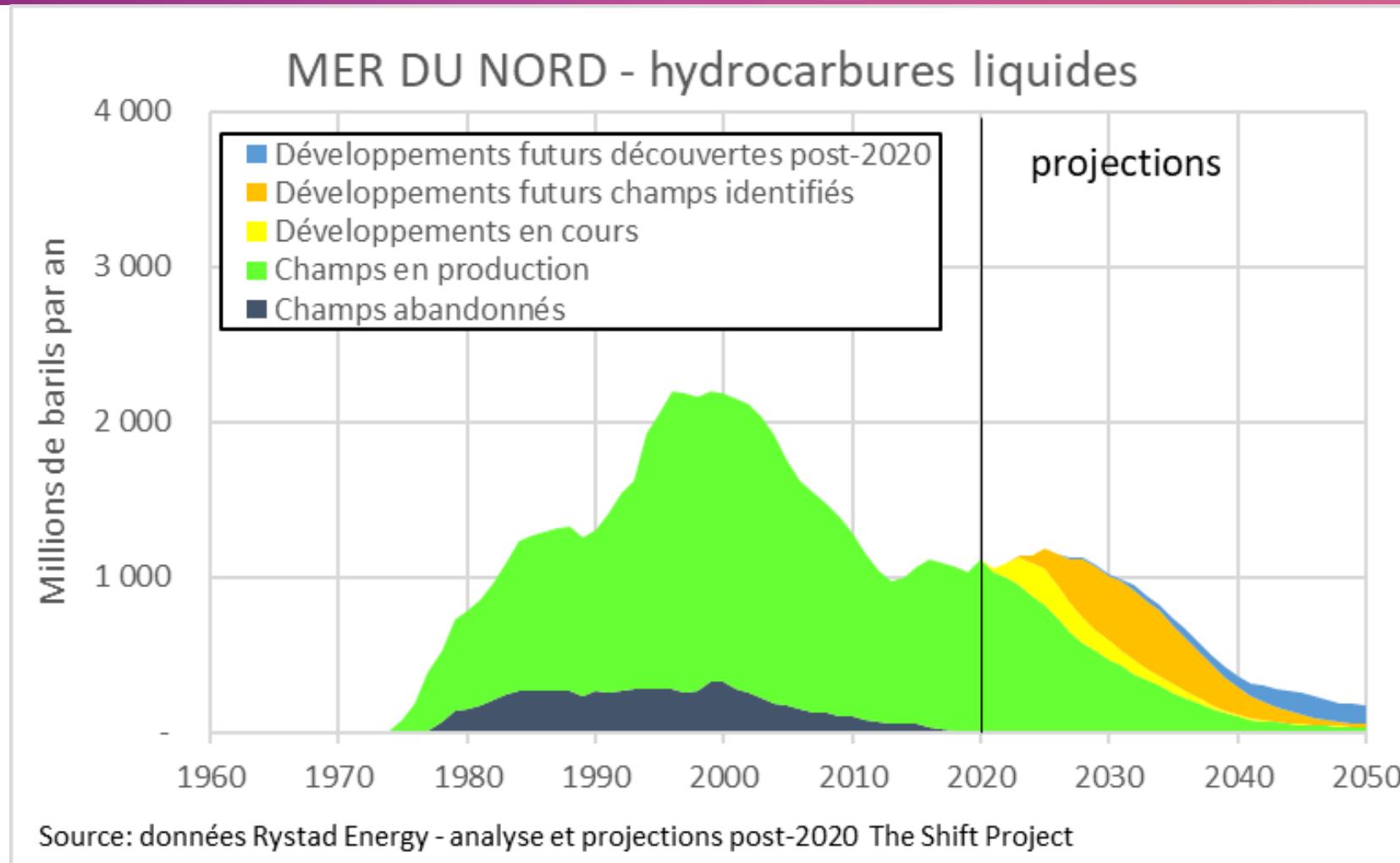
# Approvisionnements sous tension



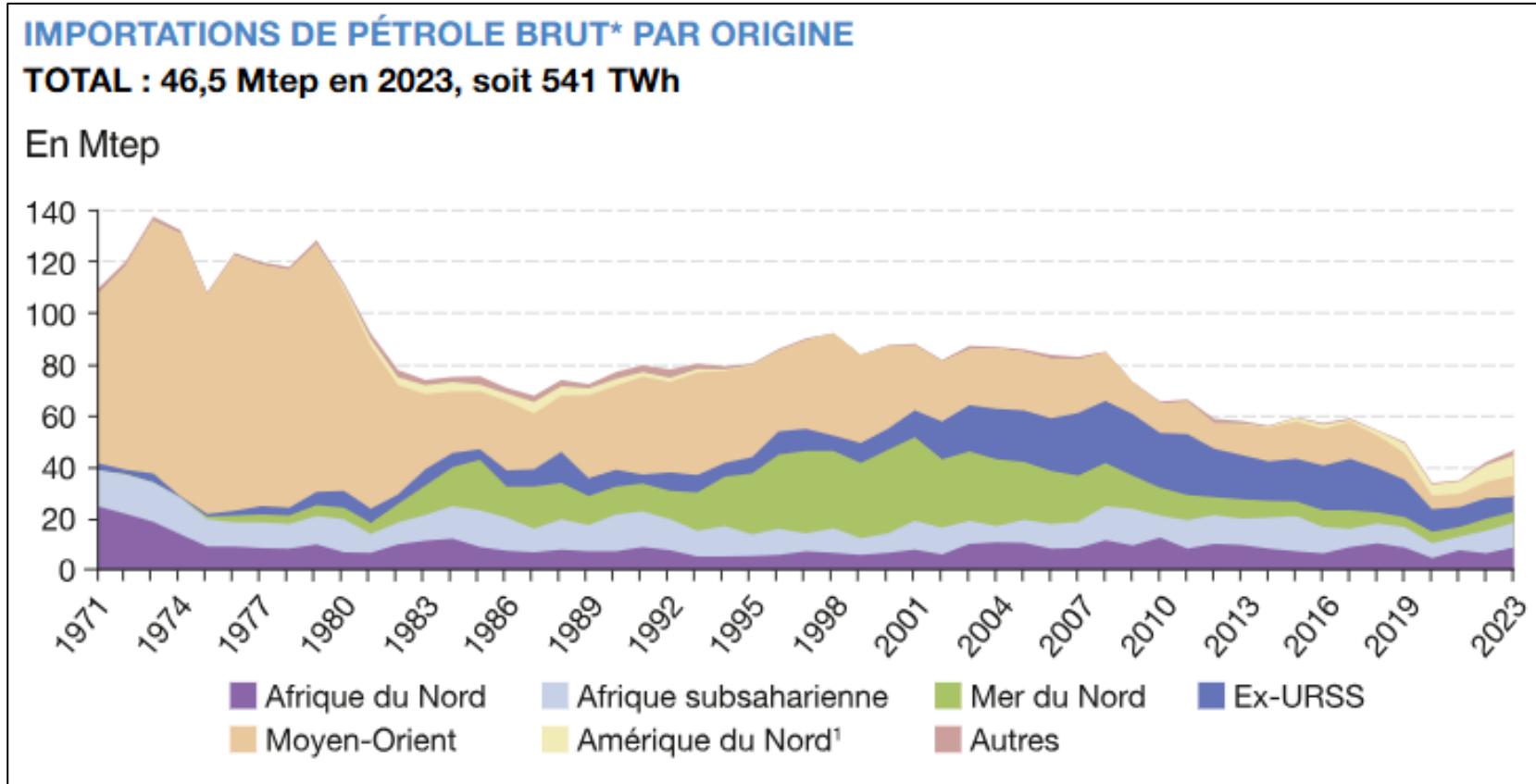
# Déclin de la Mer du Nord



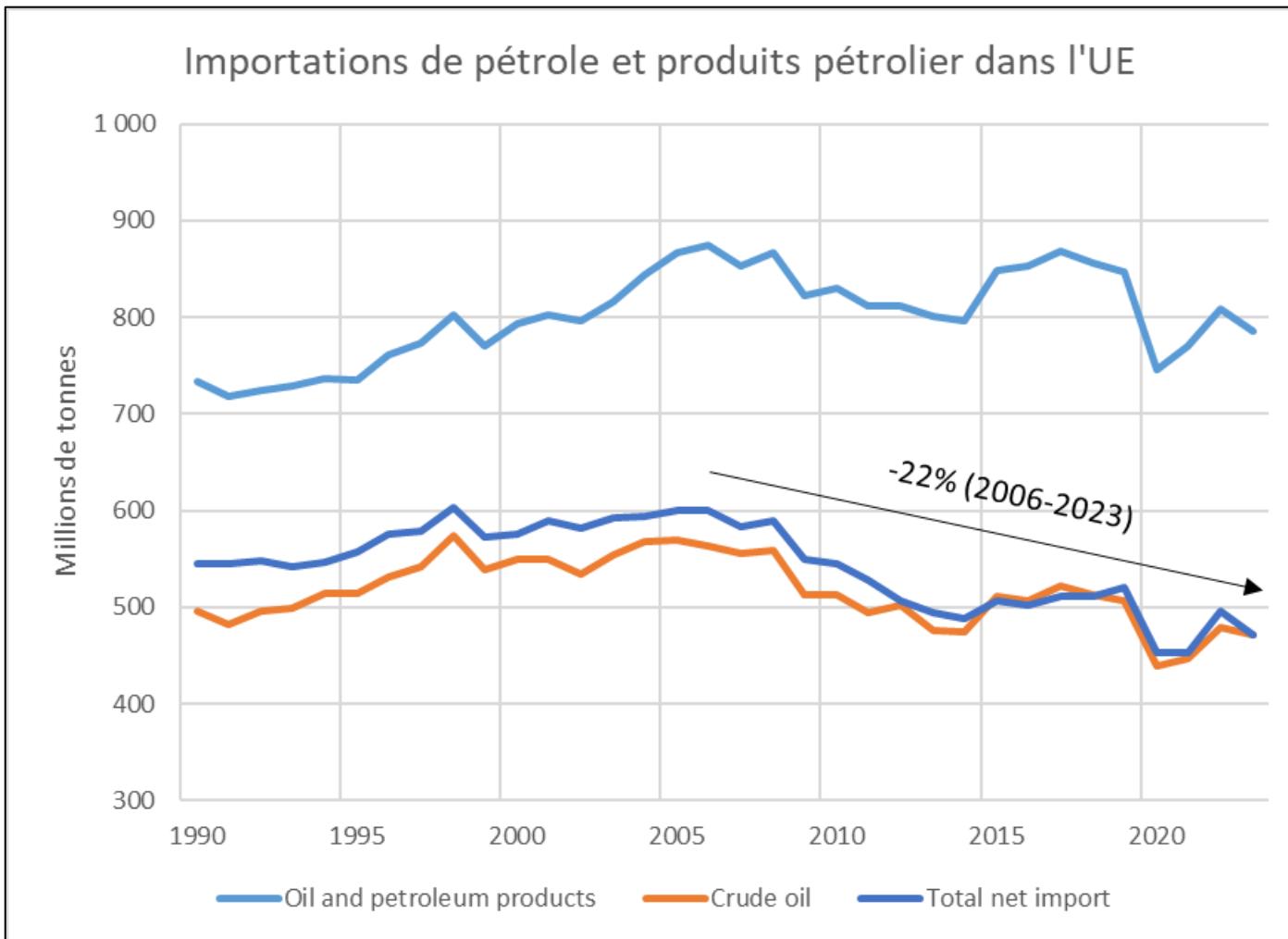
# Déclin de la Mer du Nord



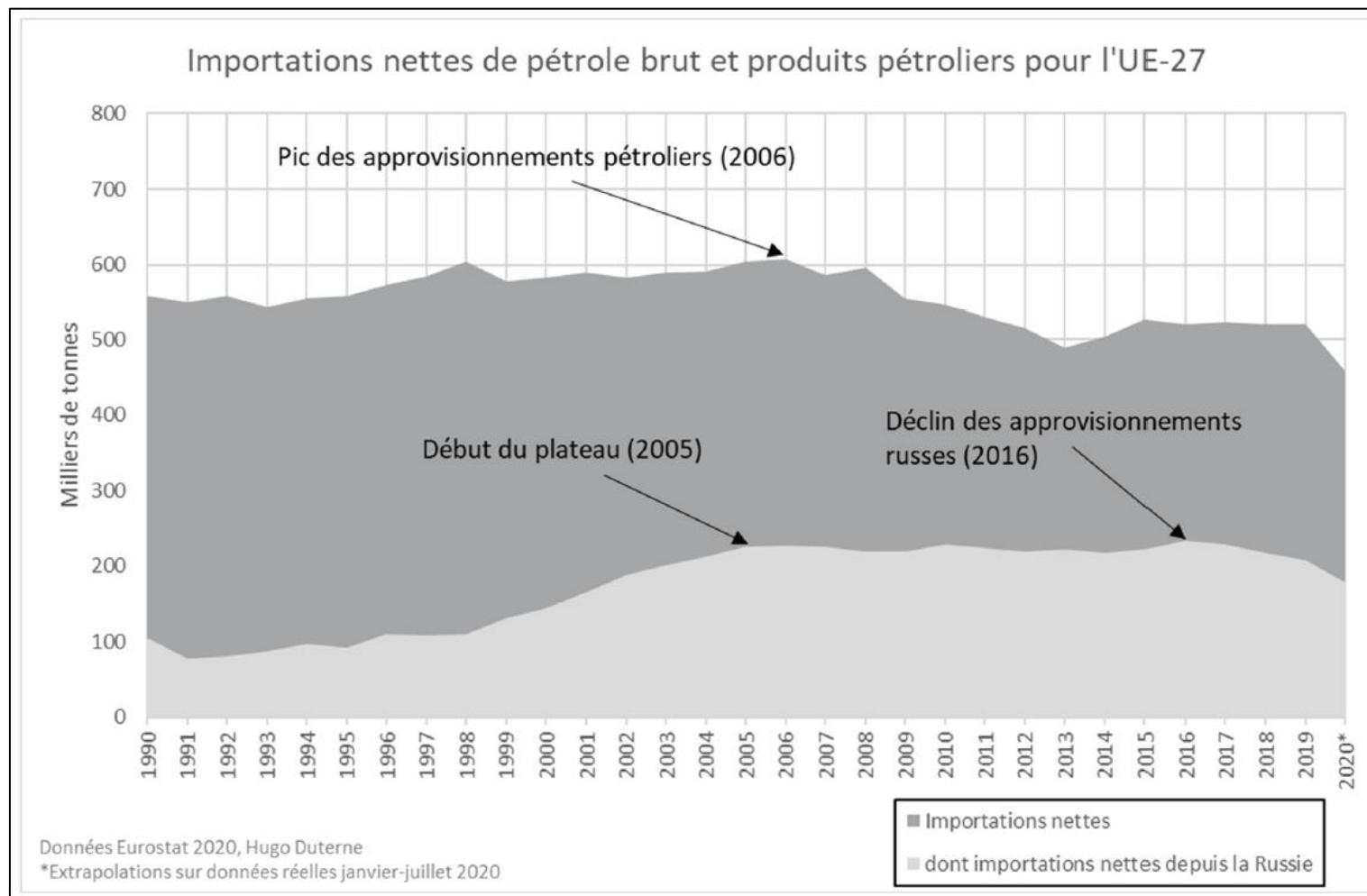
# Déclin en mer du nord, déclin russe



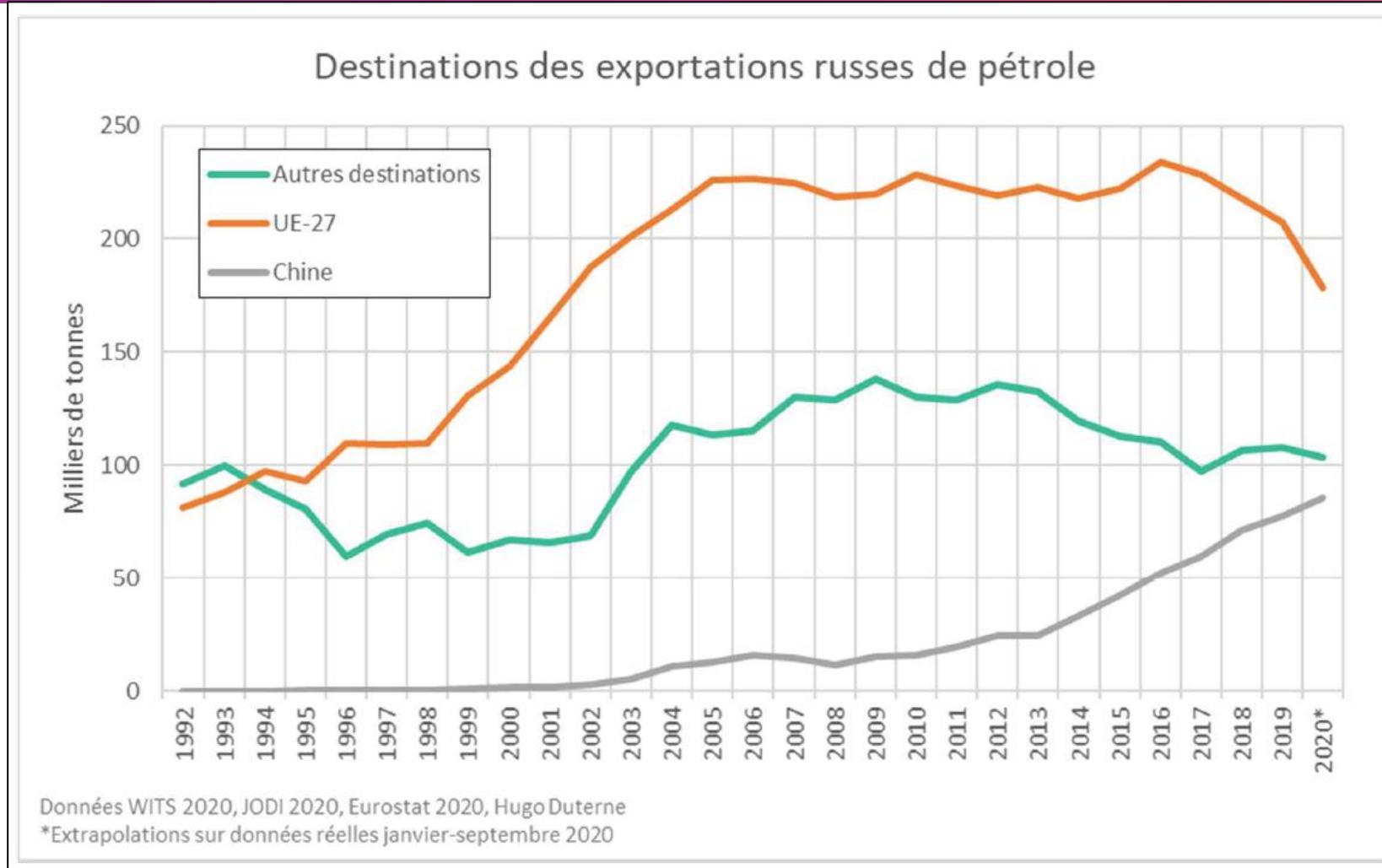
# Déclin des imports européens



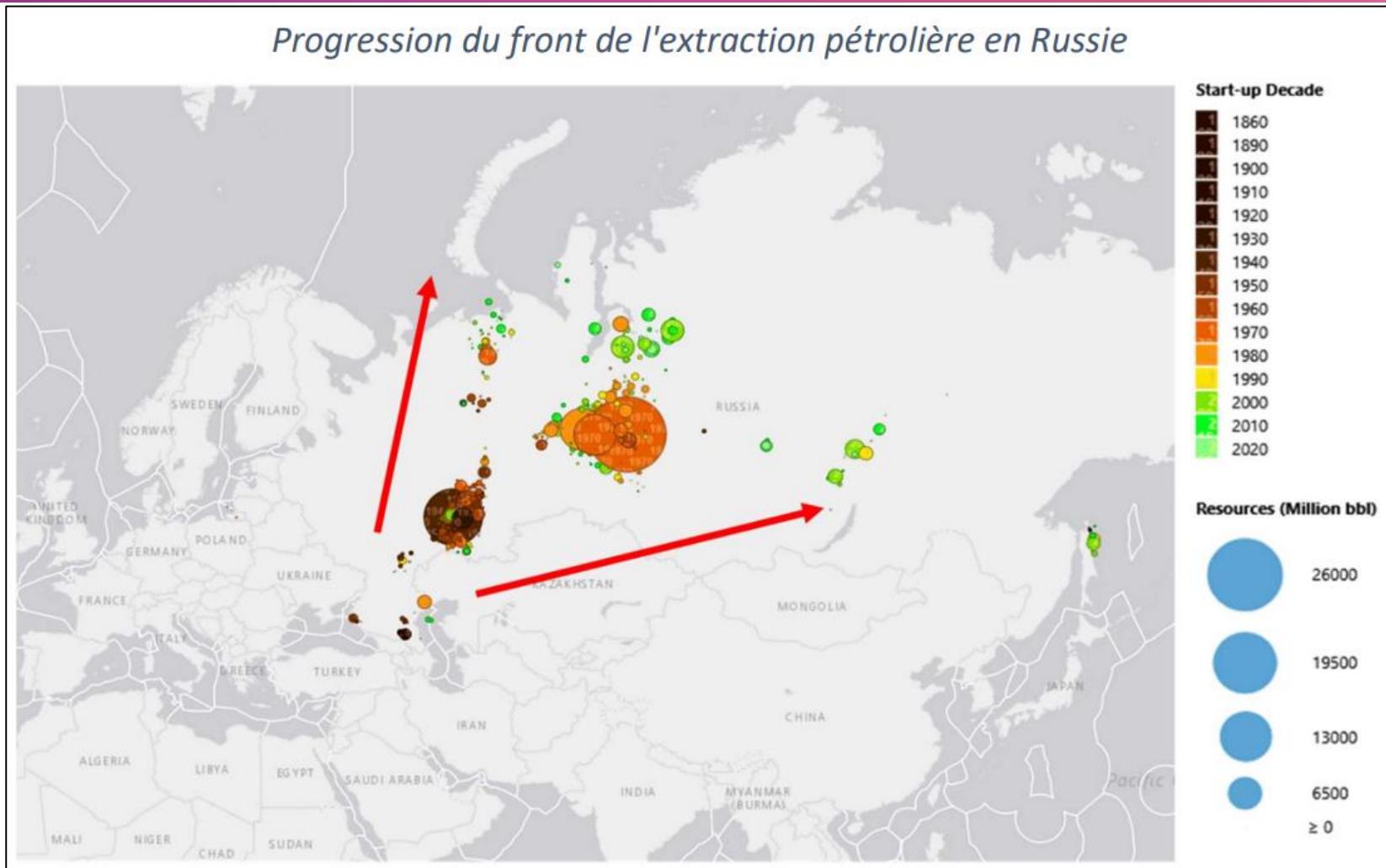
# Dépendance au pétrole russe



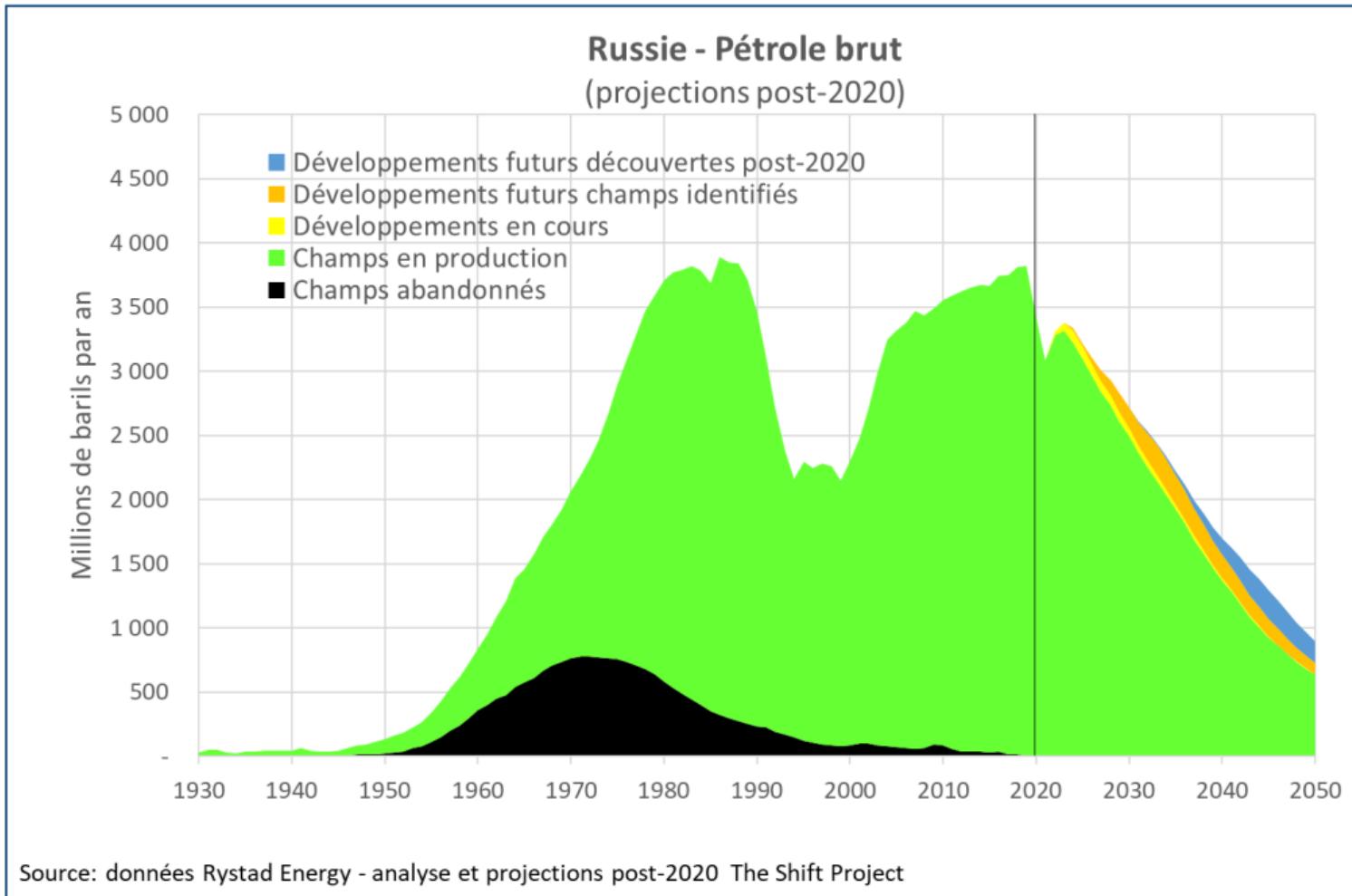
# Dépendance au pétrole russe



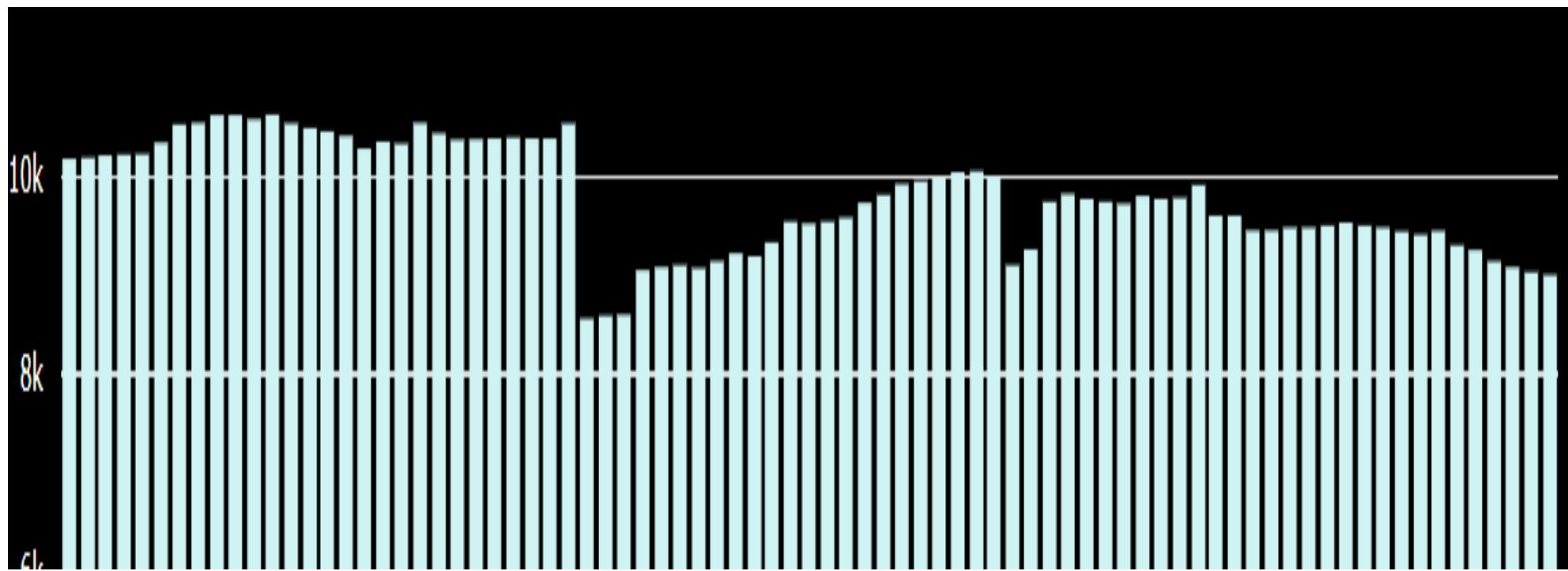
# Front pétrolier ouest-est



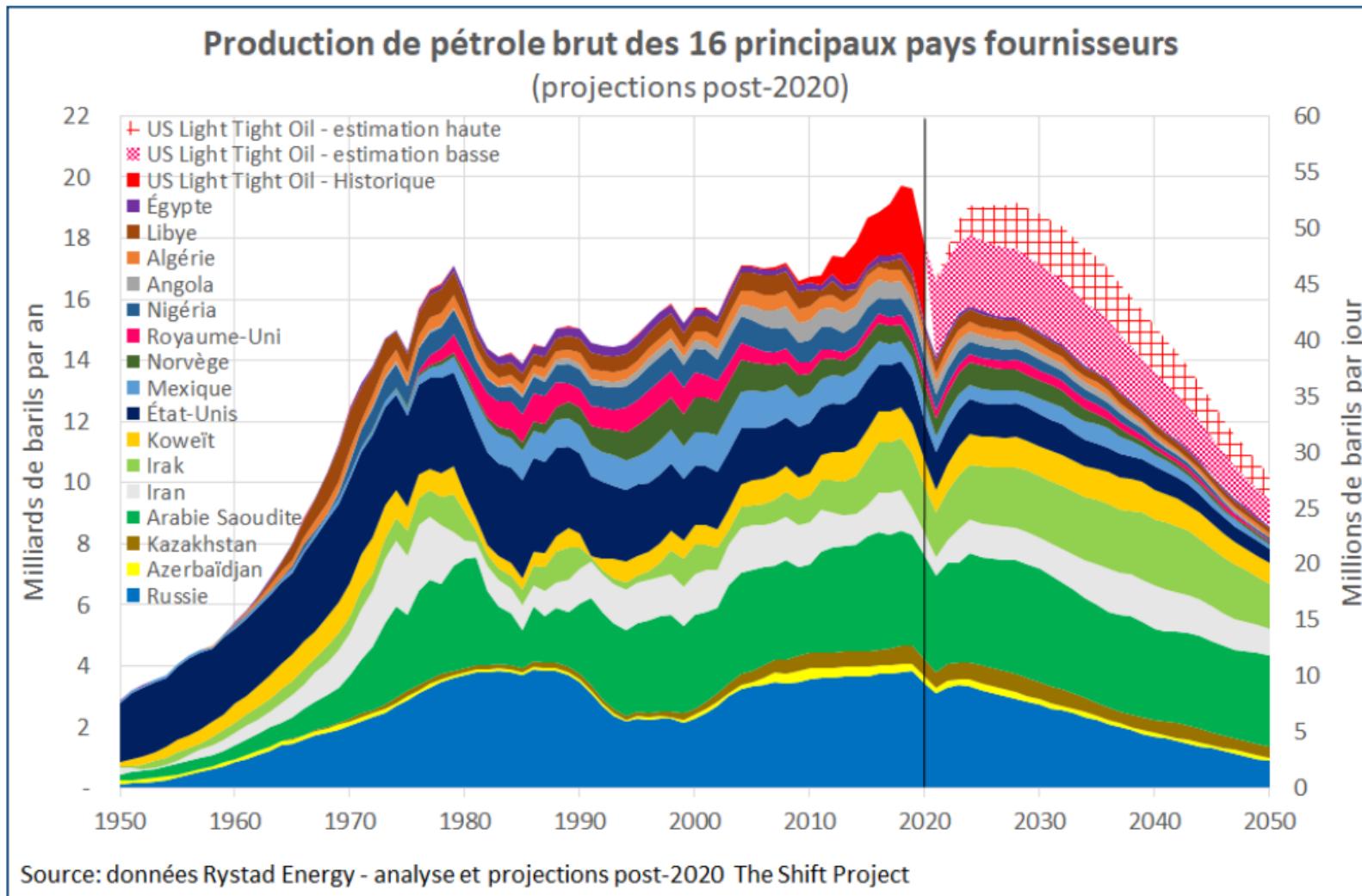
# Evolution de la production russe



# Evolution de la production russe



# Bilan des sources d'appro



# Bilan partie

- L'Europe est une zone particulièrement vulnérable du point de vue de ses approvisionnements pétroliers
- La Mer du Nord, seule source d'approvisionnement « locale » est en déplétion pétrolière avancée
- La hausse de la dépendance aux importations extra-européenne se produit dans un contexte marché très tendu → difficultés à ajuster l'offre mondiale à la hausse et concurrence accrue entre pays consommateurs, not. Pays émergents
- L'exemple du pétrole russe montre la grande fragilité de la position européenne.

Conclusion fil rouge : La réalité géologique et de marché impose à l'Europe une dé-pétrolisation rapide de son économie. Cette deuxième contrainte carbone ajoute un contexte court terme extrêmement fort aux politiques climatiques européennes

# MASTER MANAGEMENT MARCHÉS DE L'ENERGIE

## - SÉMINAIRE PETROLE

### Fondamentaux, passé et perspectives

Hugo DUTERNE – Economiste, membre d'ASPO France

[hduterne@outlook.fr](mailto:hduterne@outlook.fr)

1<sup>er</sup> avril 2025

