



CentraleSupélec

MASTER MANAGEMENT MARCHÉS DE L'ENERGIE - SÉMINAIRE PETROLE

Fondamentaux, passé et perspectives

Hugo DUTERNE – Economiste, membre d'ASPO France

hduterne@outlook.fr

1^{er} 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**

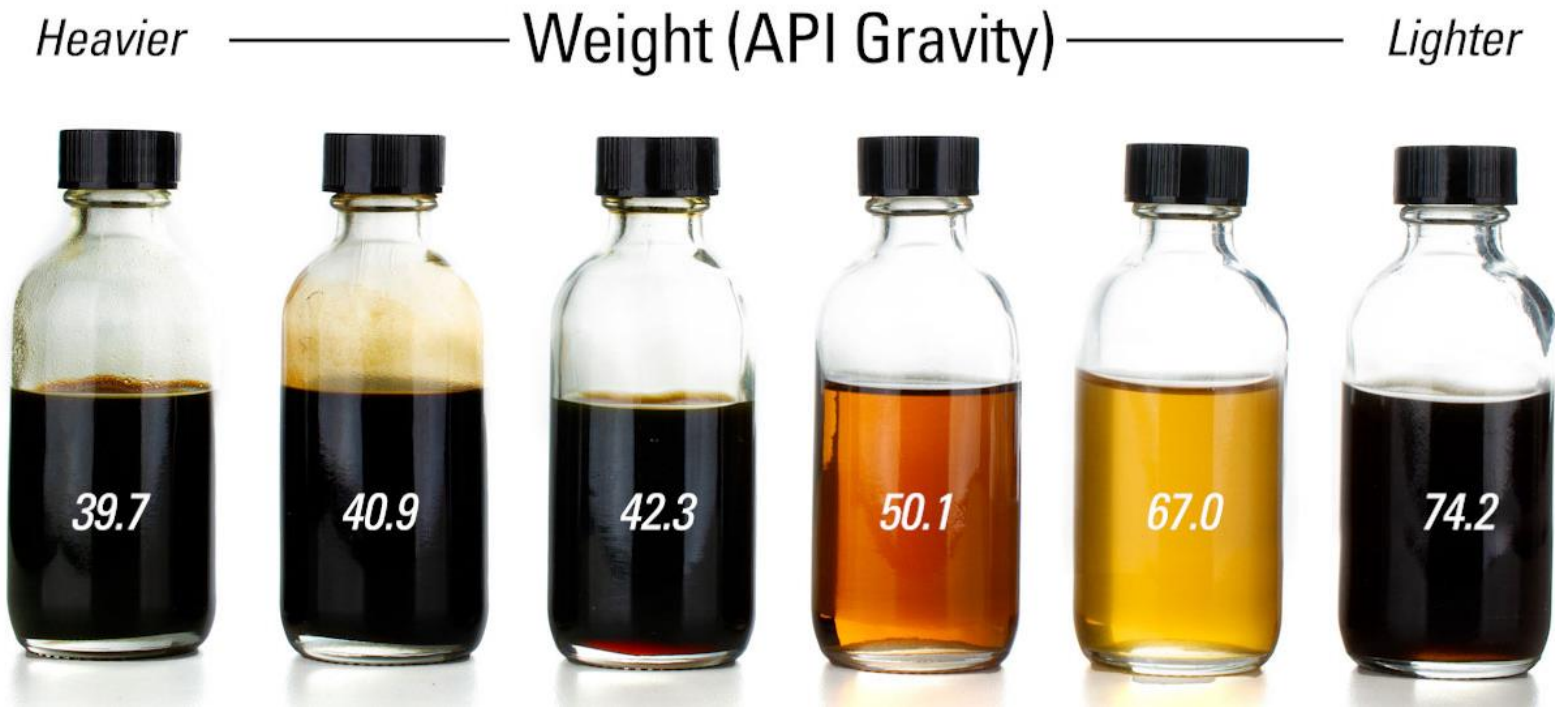




CentraleSupélec

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

Caractéristiques principales



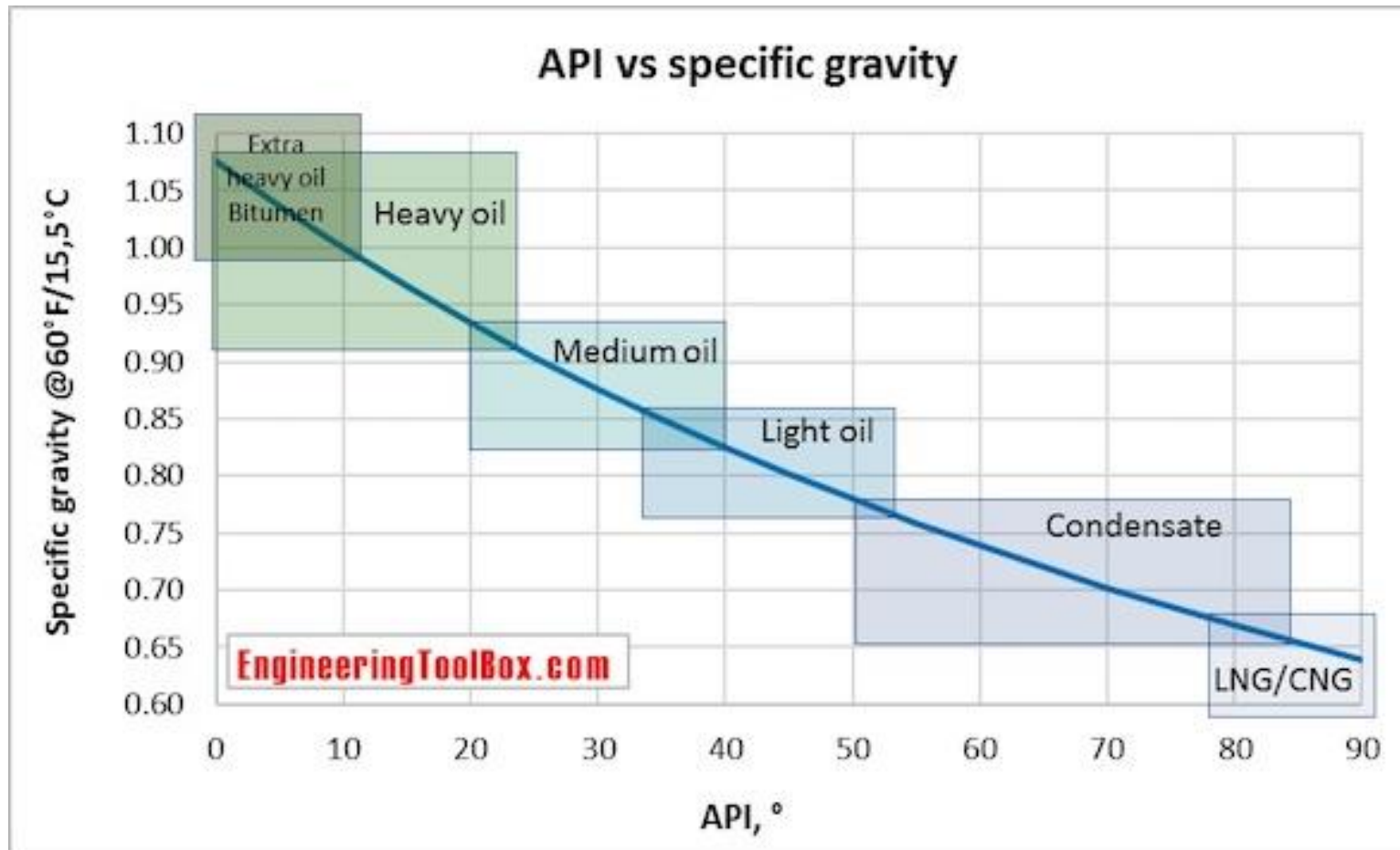
Liquide à température et pression ambiante

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

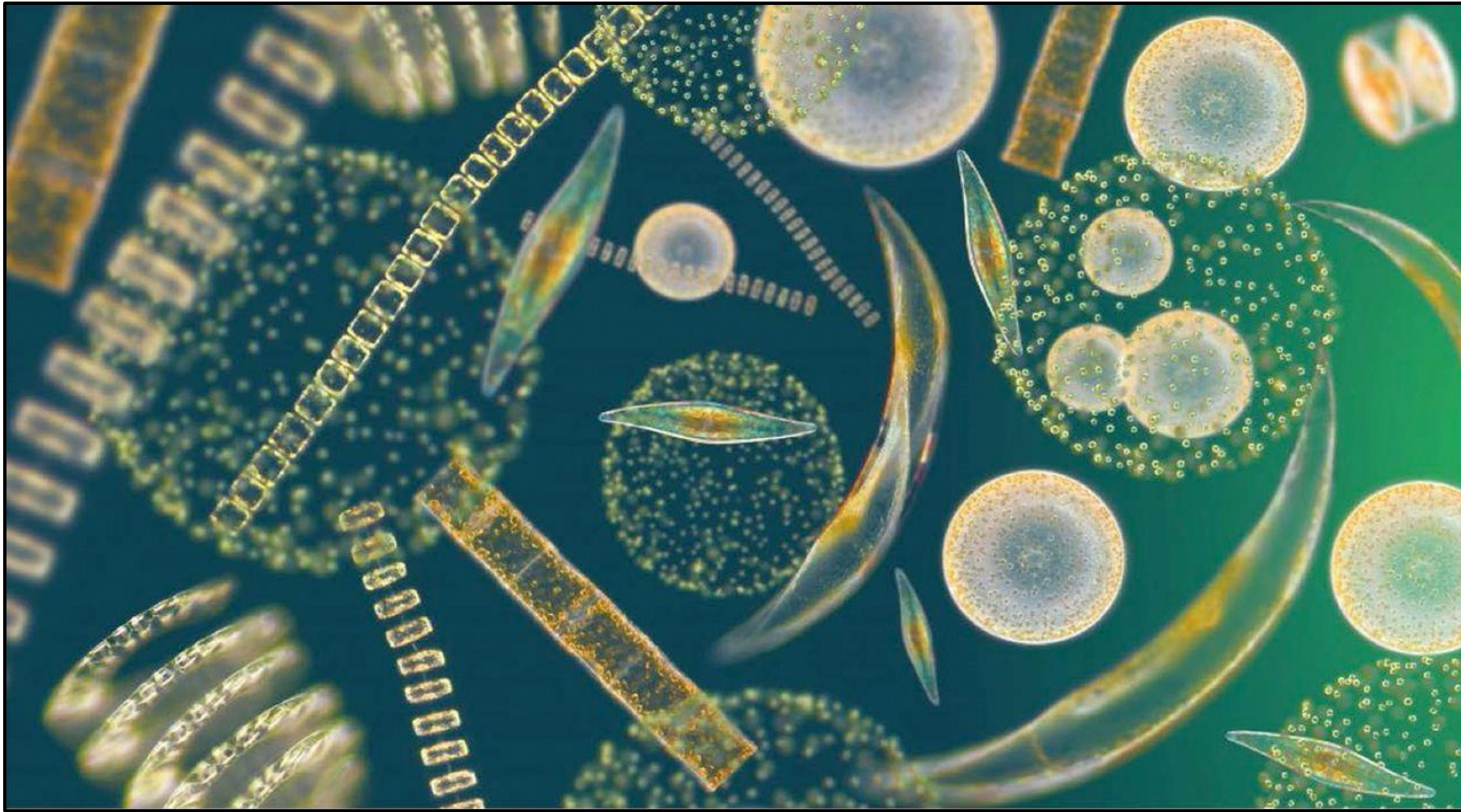


Figure 1 : Phytoplanctons au microscope, photo Richard Kirby

Milieux de formation

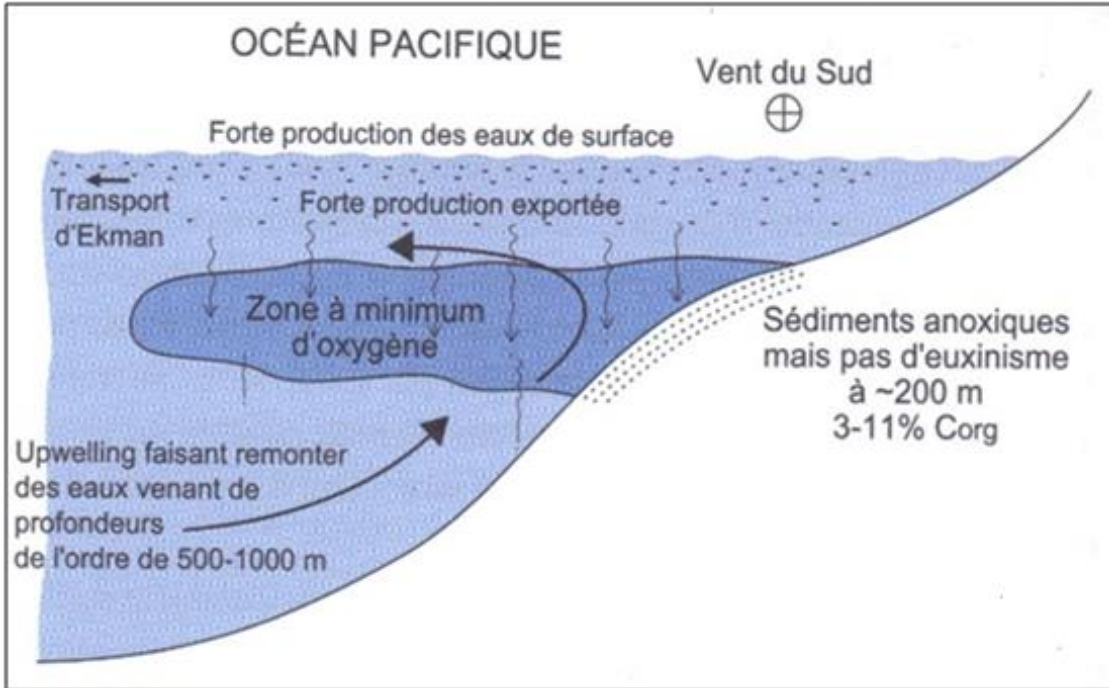


Figure 1 : Milieux propices à la formation de pétrole, cas de l'upwelling côtier (Biteau and Baudin, 2017)

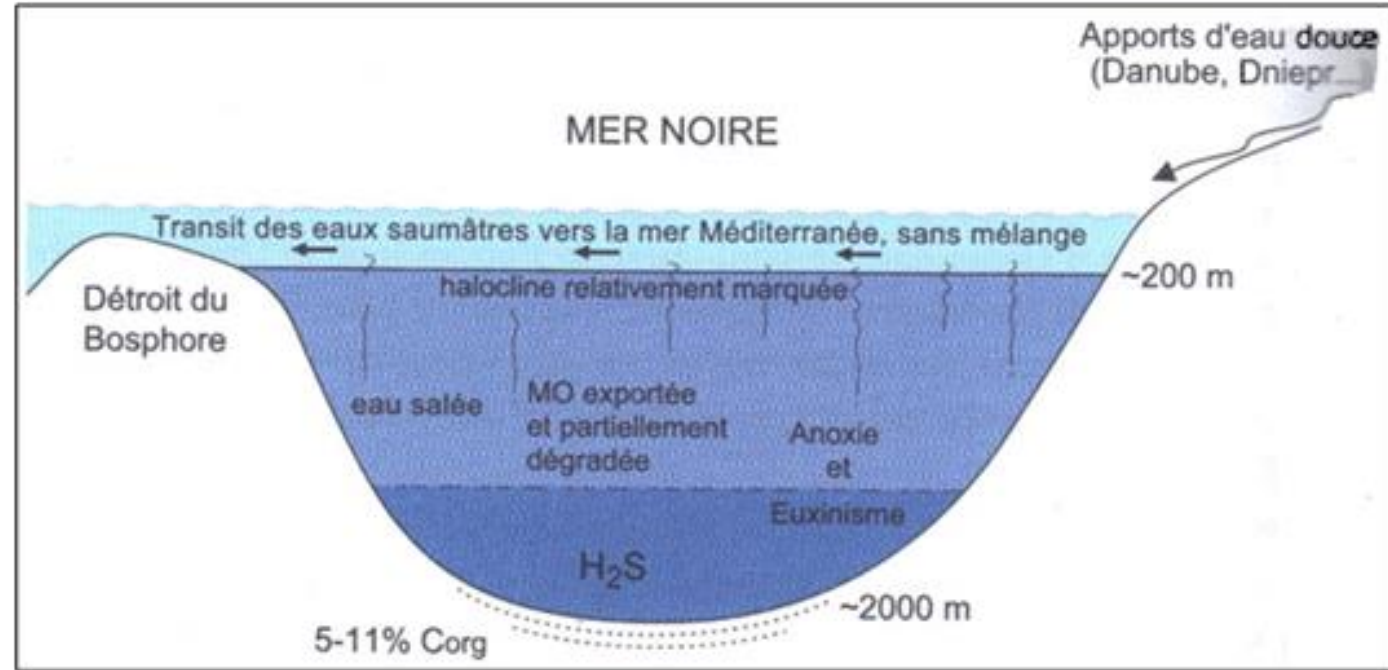


Figure 1 : Milieux propices à la formation de pétrole, cas de la stratification haline des eaux (Biteau and Baudin, 2017)

Milieux de formation

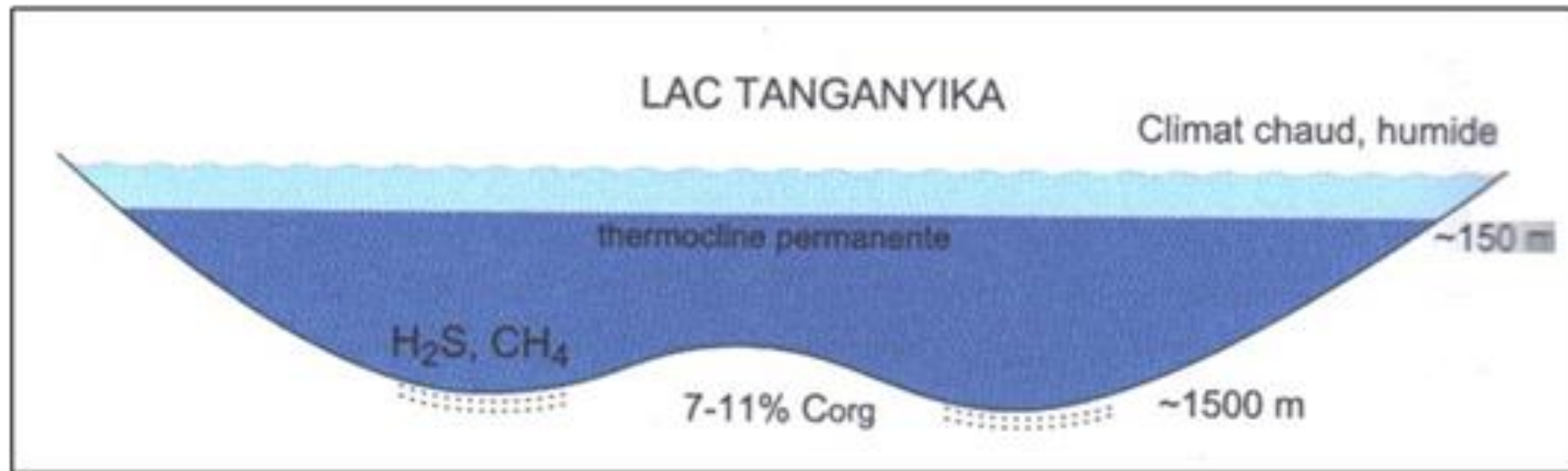
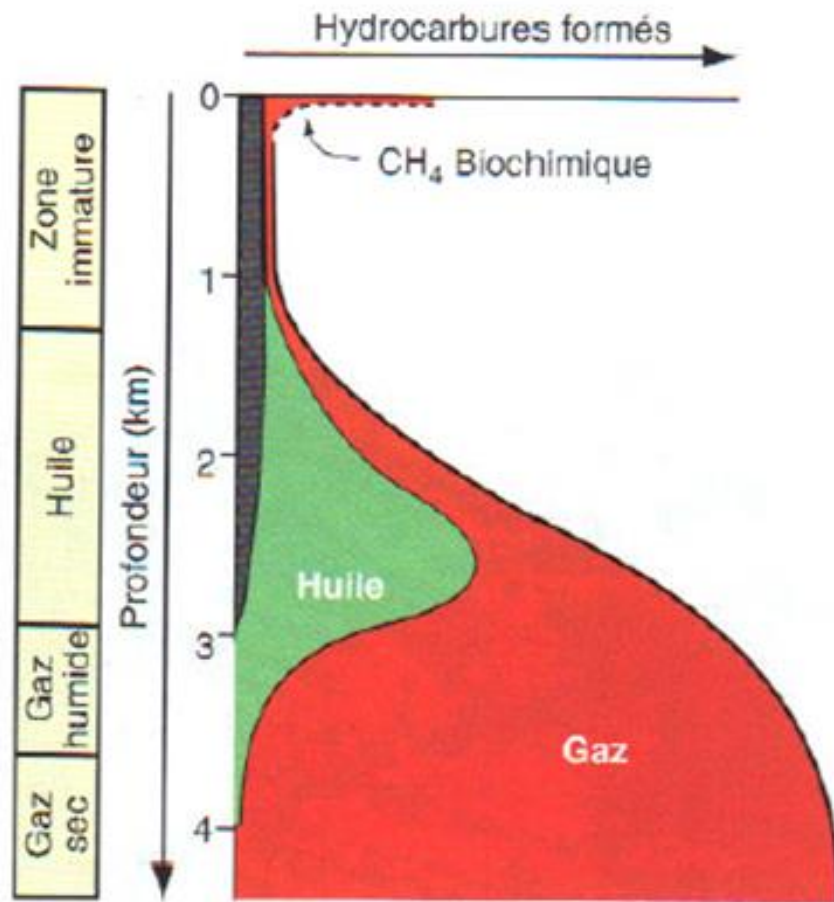


Figure 1 : Milieux propices à la formation de pétrole, cas de la stratification thermique des eaux (Biteau and Baudin, 2017)

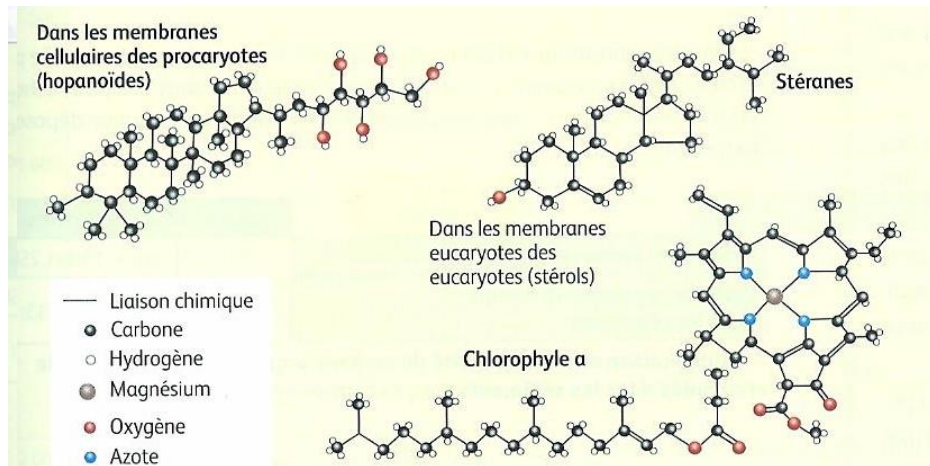
Formation du pétrole



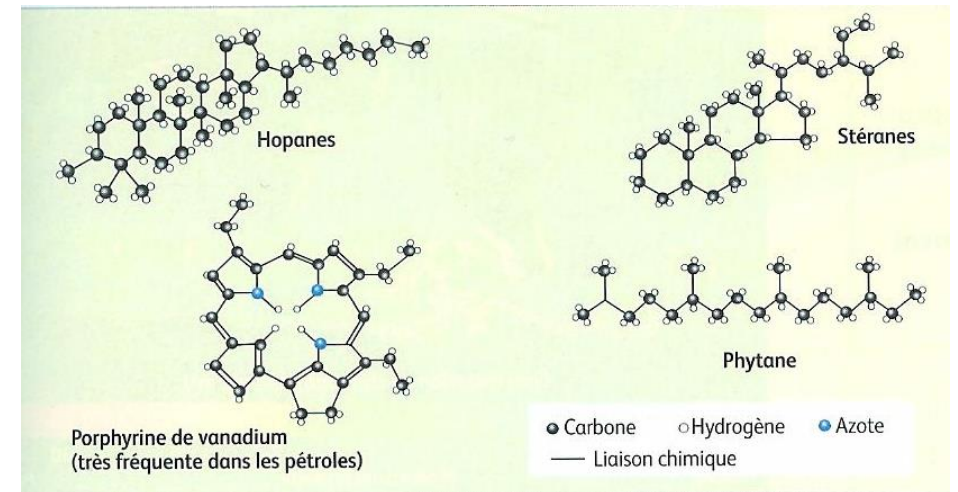
Le kérogène subit un craquage thermique (appelé également « pyrolyse ») sous l'effet de pressions et des températures géothermiques de plus en plus élevées (50 à 120°C), et il se transforme en partie en hydrocarbures.

Figure 1 : Génération d'hydrocarbures (Bret-Rouzaut and Favennec, 2010)

Formation du pétrole



Pyrolyse du
kérogène



Naissance d'un champ pétrolier

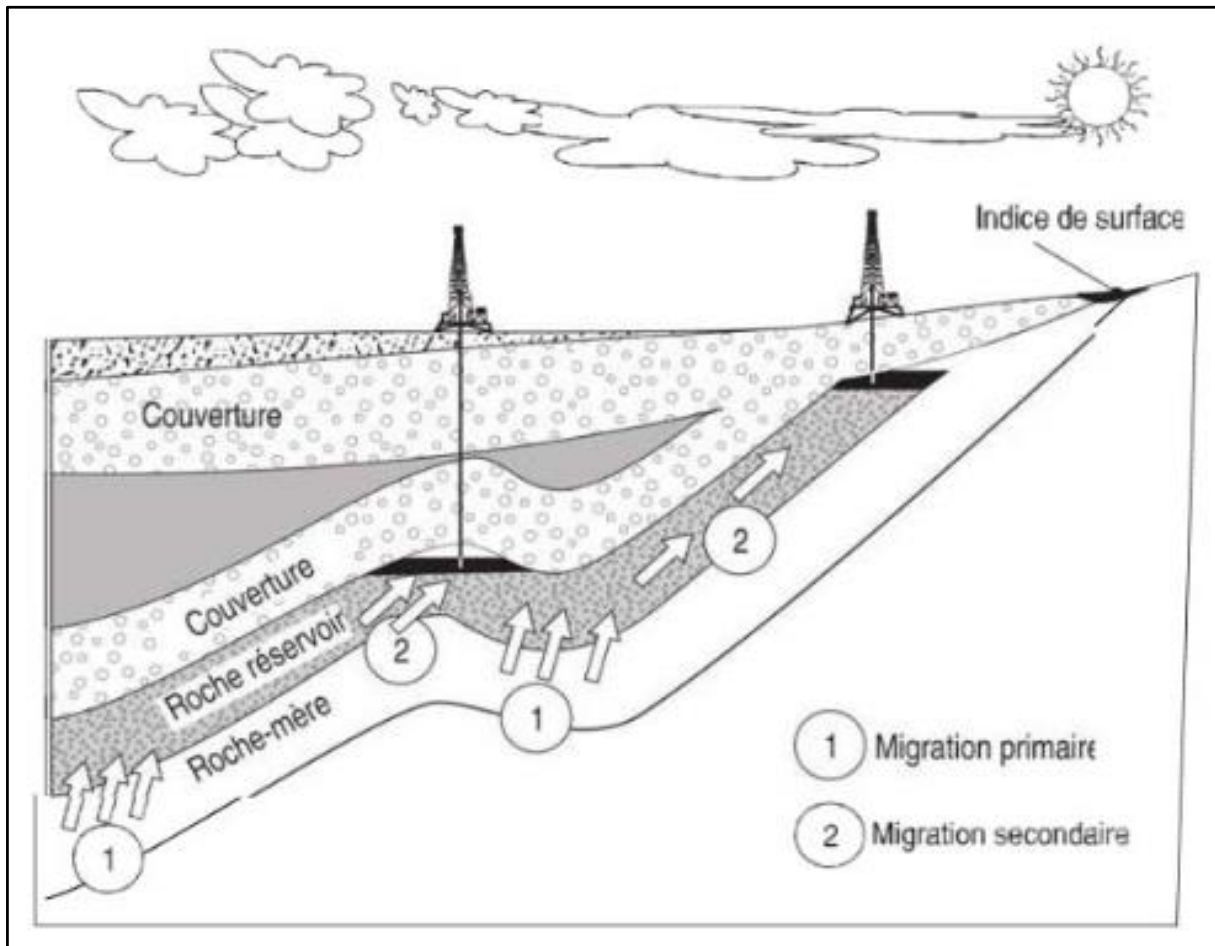


Figure 1 : Formation d'un gisement d'hydrocarbures (Université de Ouargla)

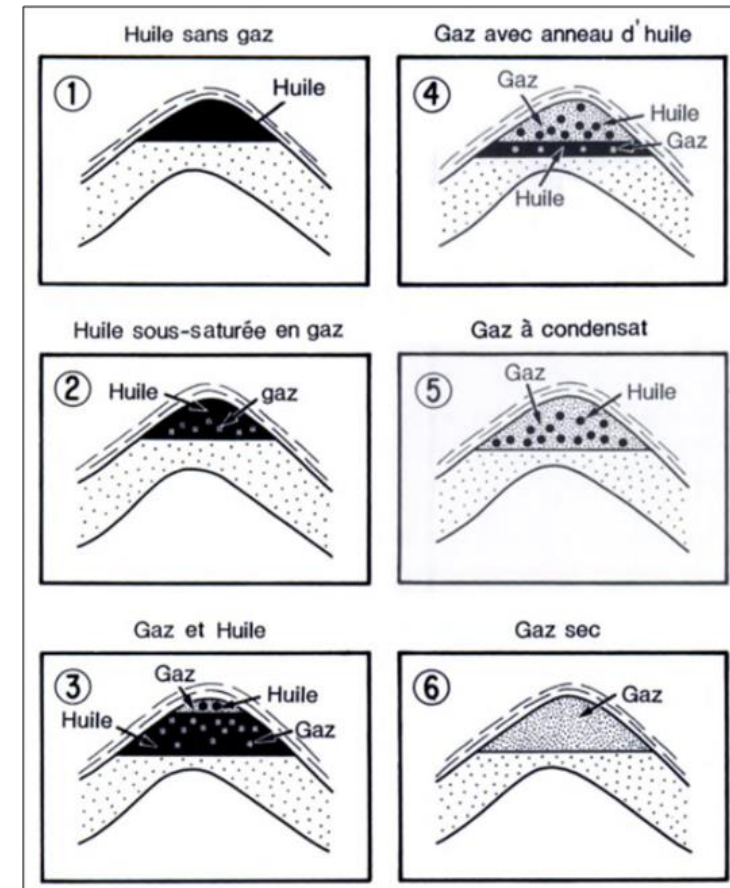
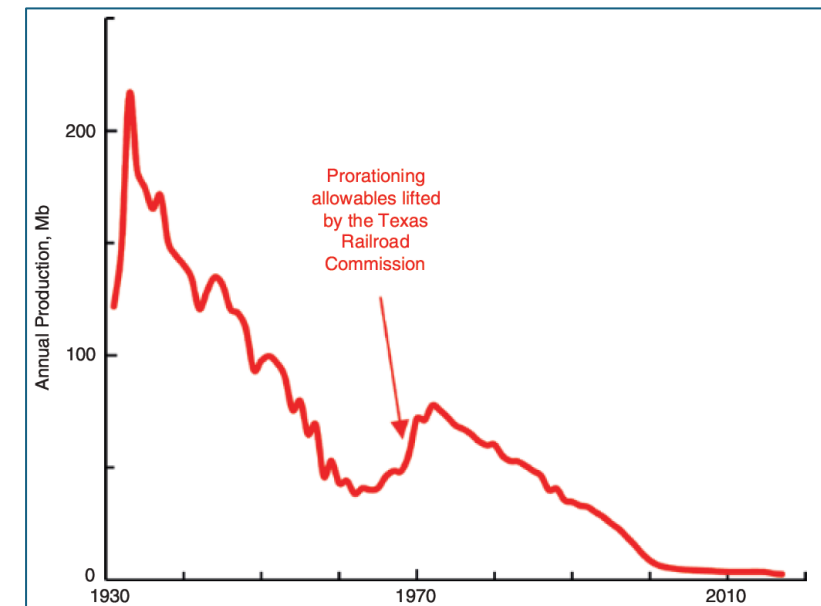
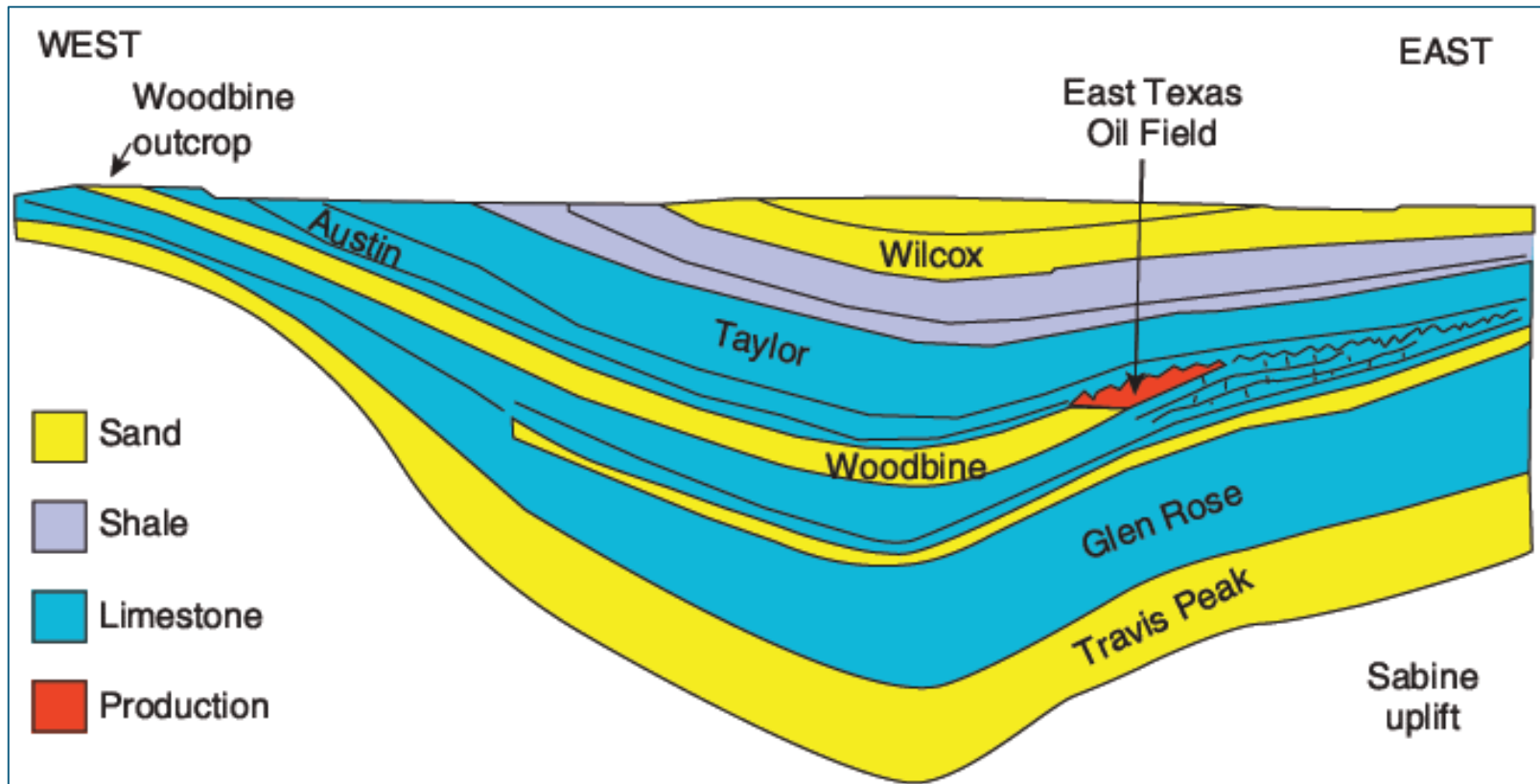
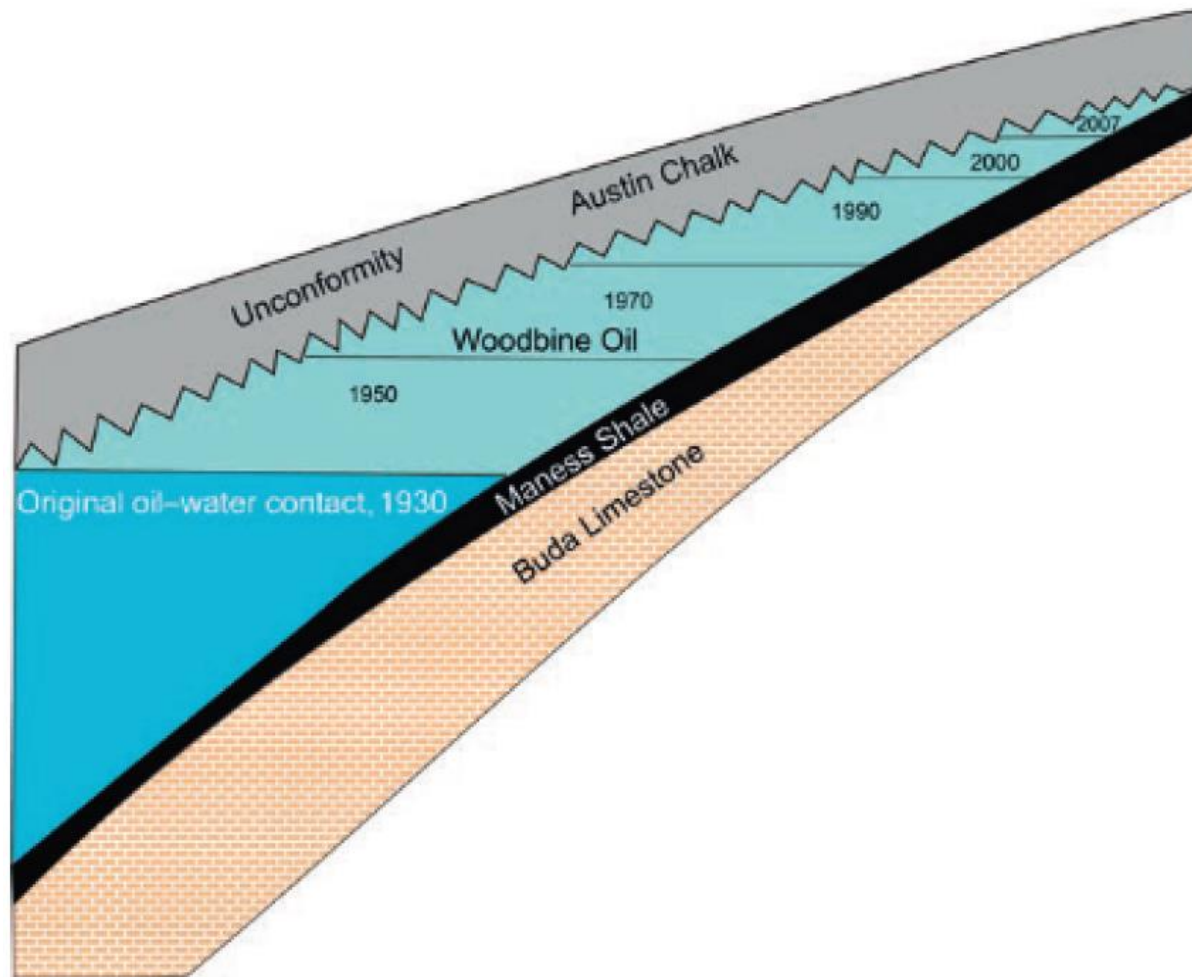


Figure 1 : Différentes relations entre pétrole et gaz dans les gisements d'hydrocarbures (Rojey, 1981)

Champ d'est texas

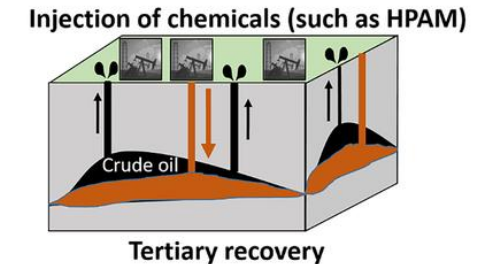
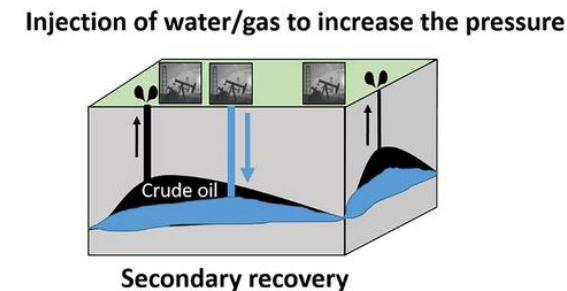
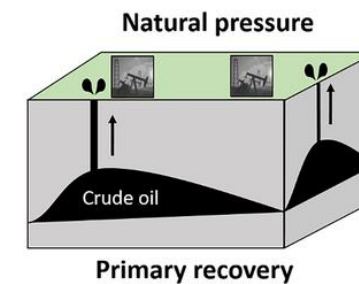
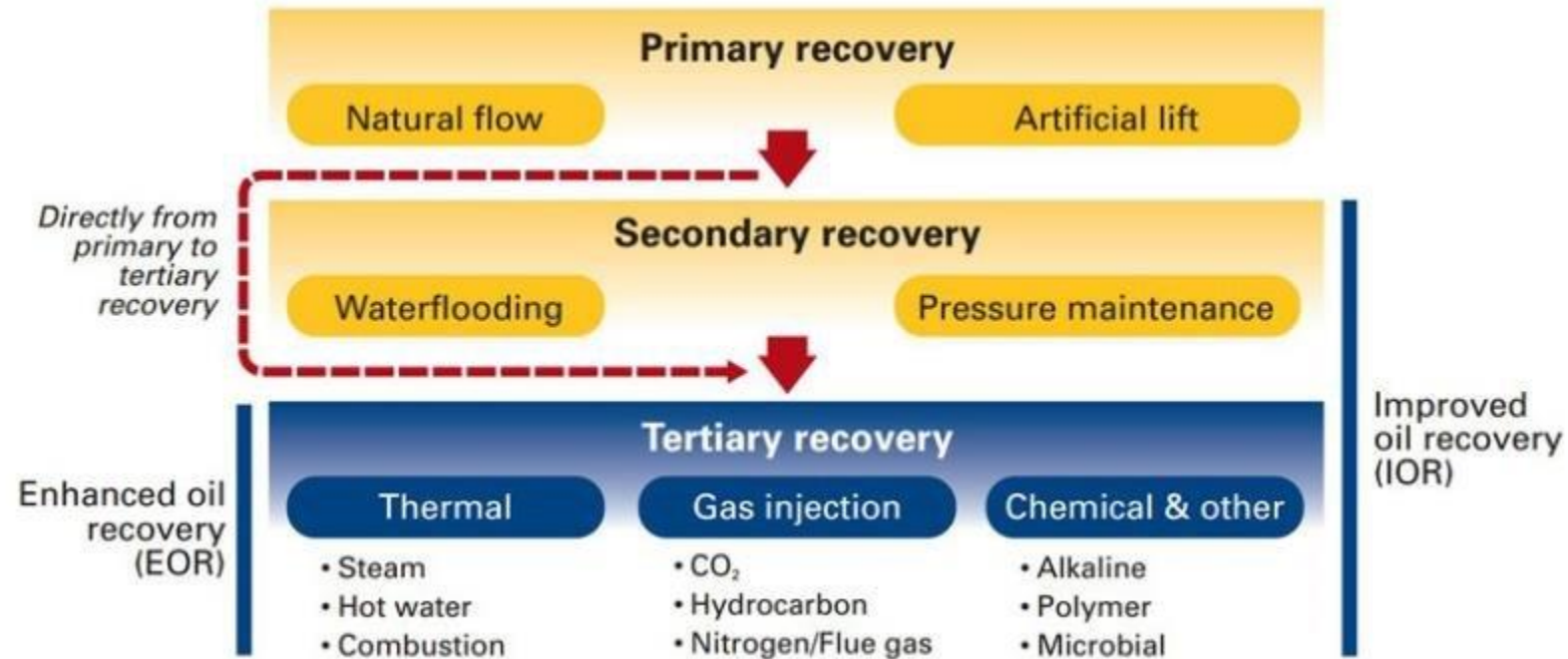


Exploitation d'east-texas



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

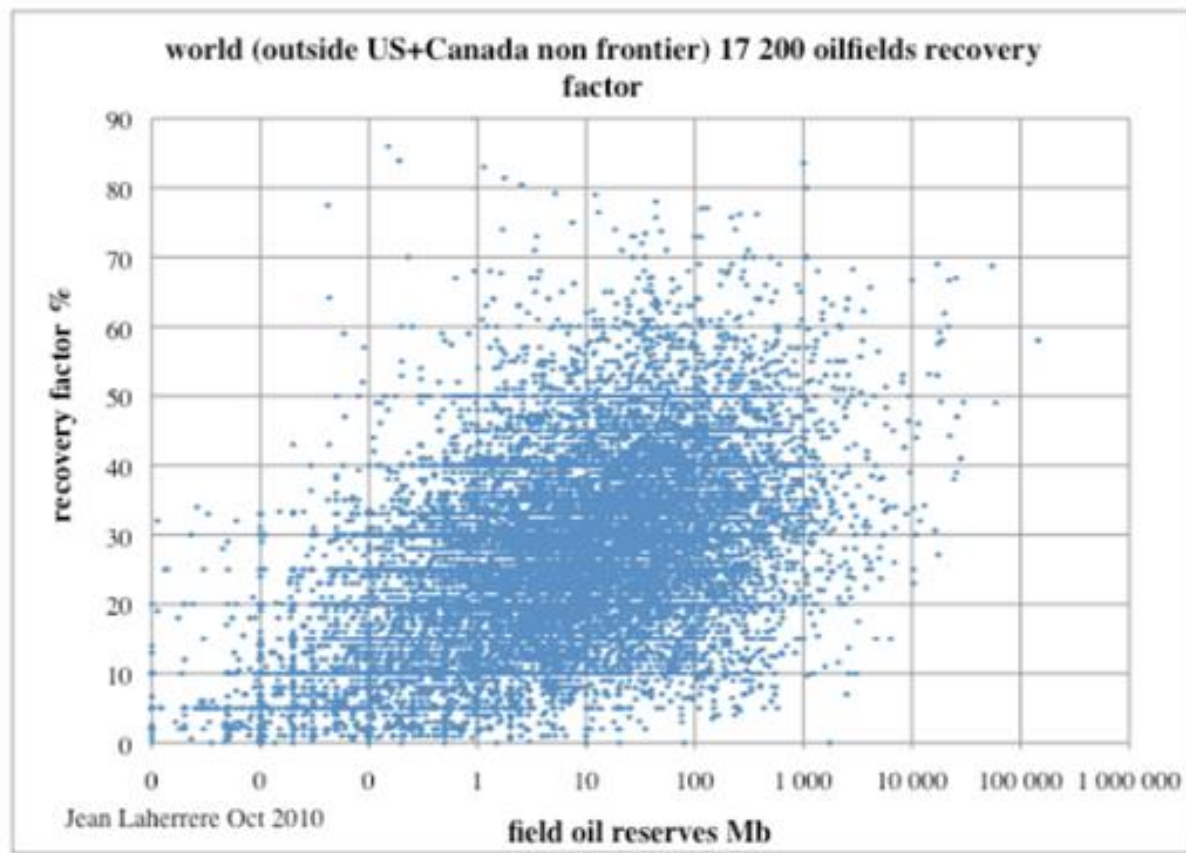


Figure 1 : Taux de récupération en fonction de la taille du champ pétrolier

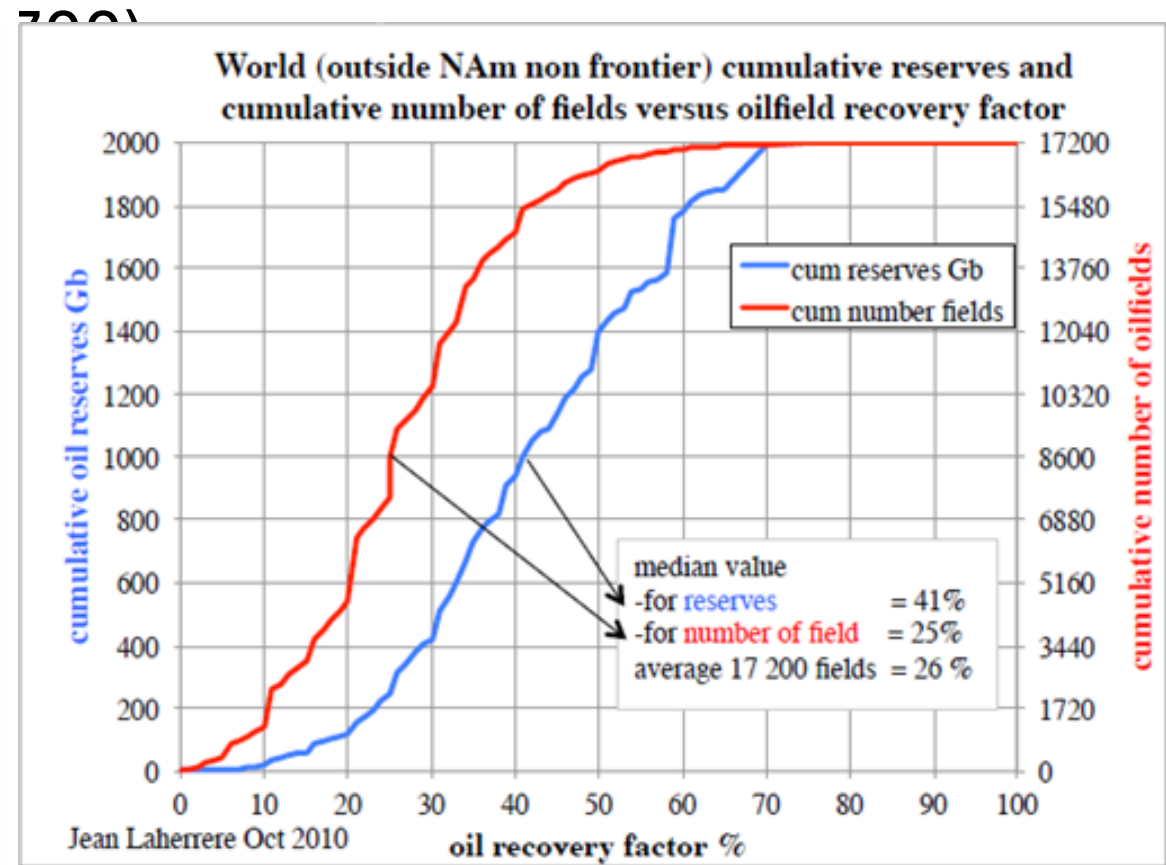
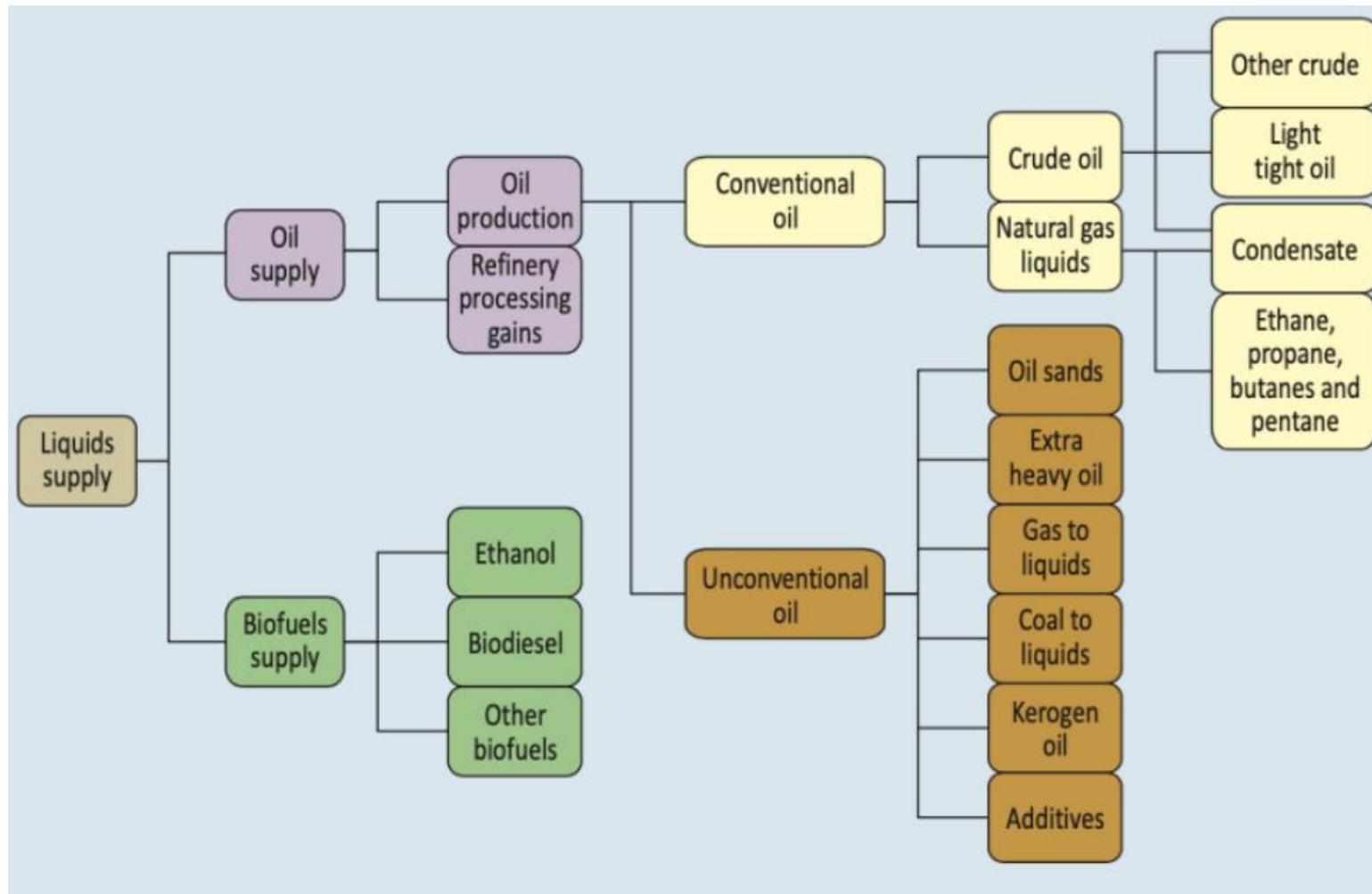


Figure 1 : Taux de récupération moyen et médian dans le monde selon le nombre de champs ou selon les réserves cumulées

Classification du pétrole



Pétrole conventionnel

→ 65% de la production mondiale

conventional crude oil - source IEA WEO

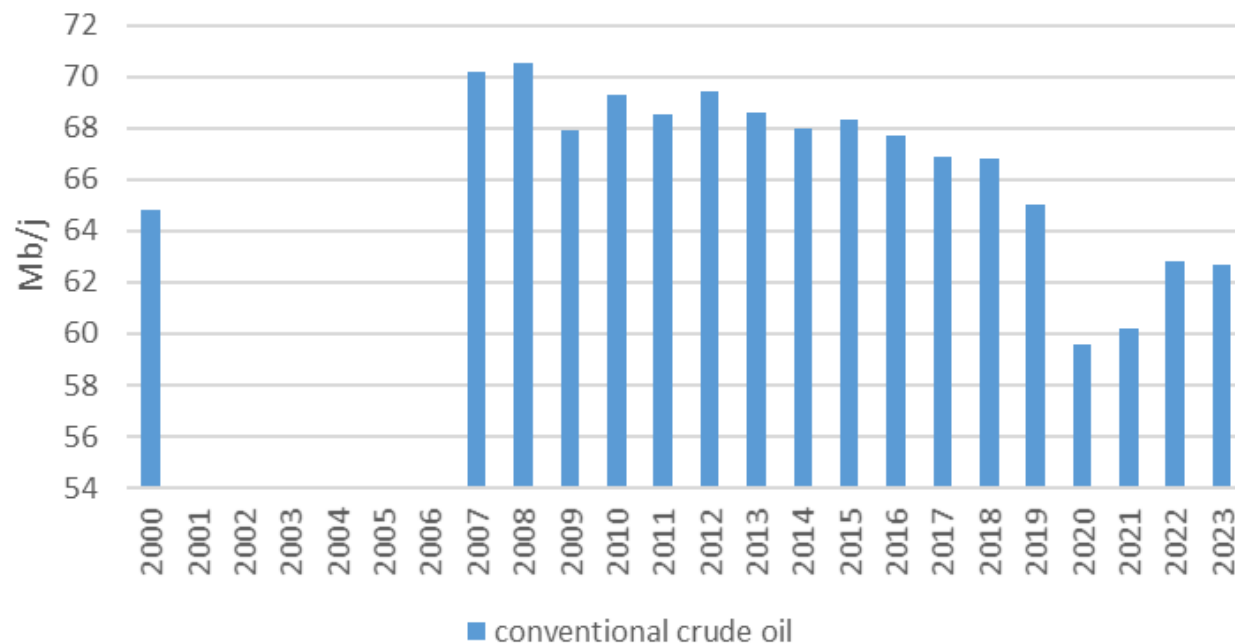
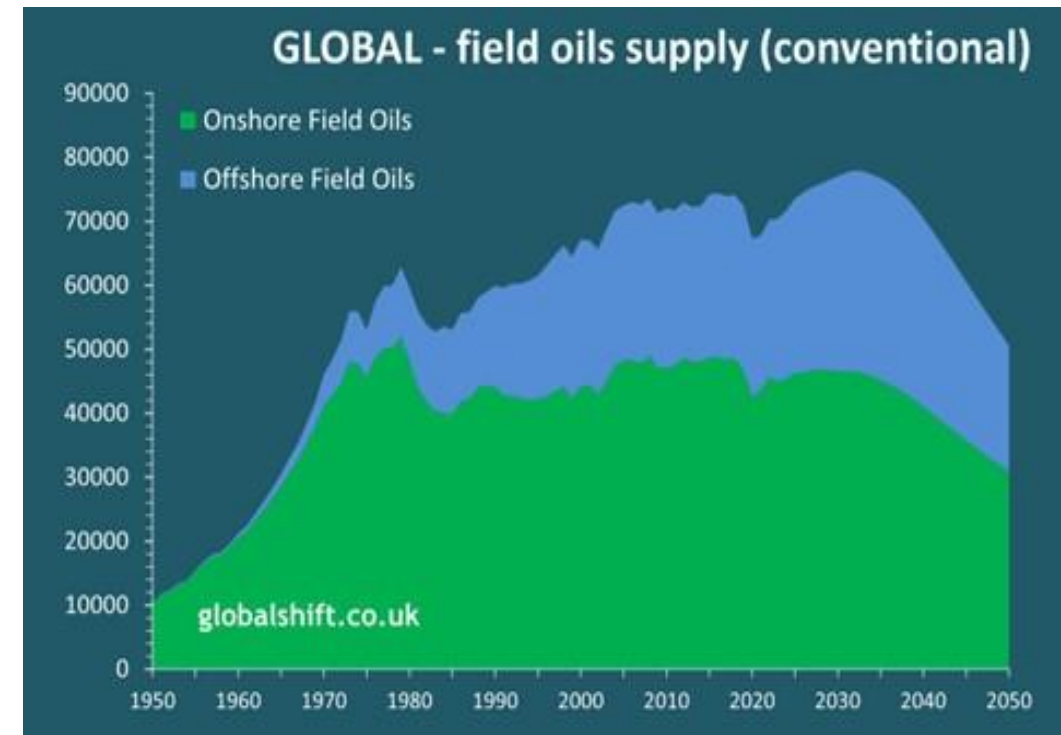
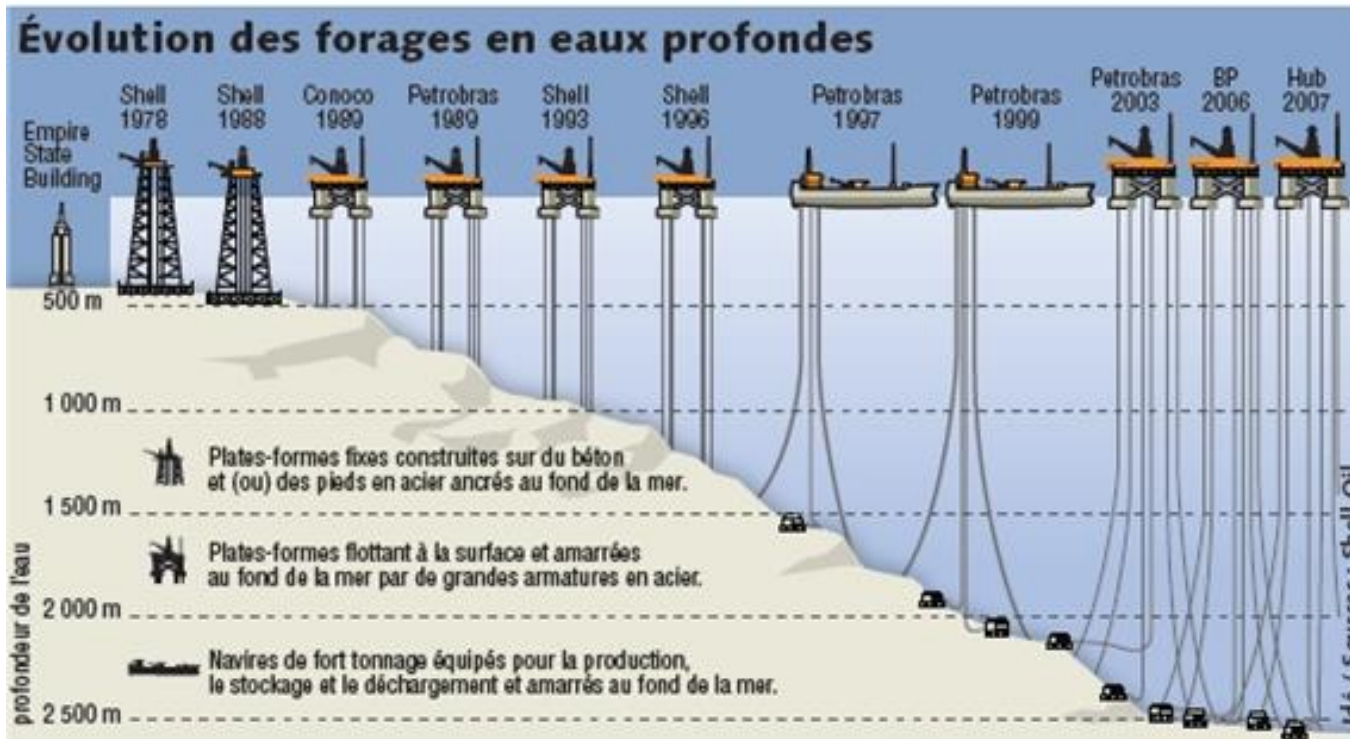


Table A.8: Oil production (mb/d)

| | 2010 | 2022 | 2023 | Stated Policies | | |
|---------------------------|------|------|------|-----------------|------|------|
| | | | | 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

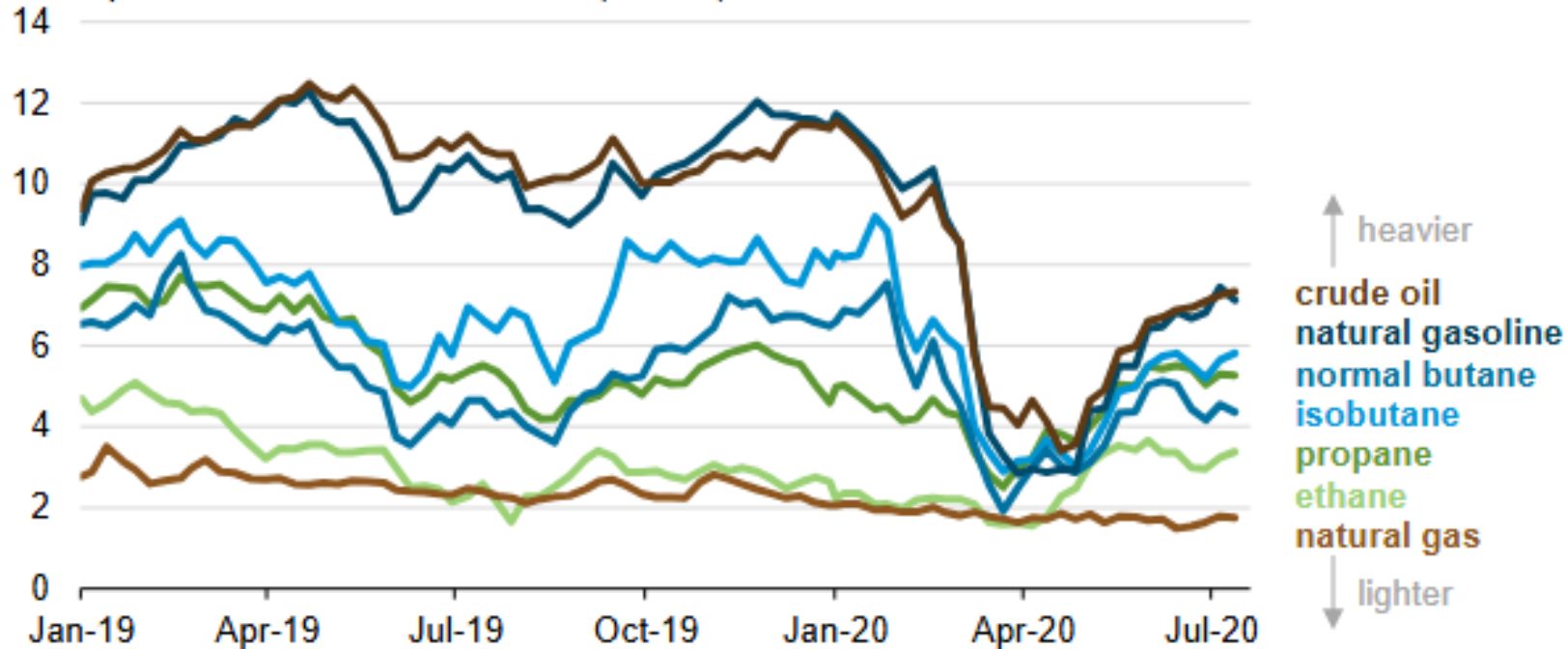
→ Progression de la production offshore : hausse de la profondeur d'extraction



Liquides de gaz

→ 21 % de la production mondiale

Weekly crude oil, hydrocarbon gas liquids, and natural gas spot prices
dollars per million British thermal units (MMBtu)



Pétrole de roche-mère

→ 9 % de la production mondiale

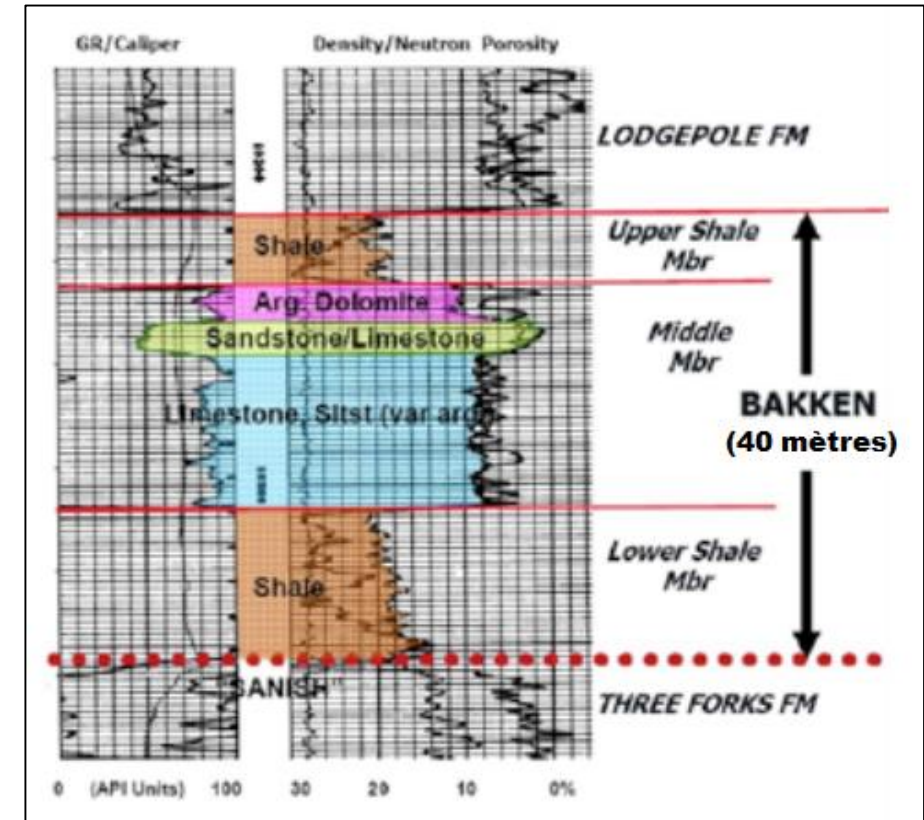
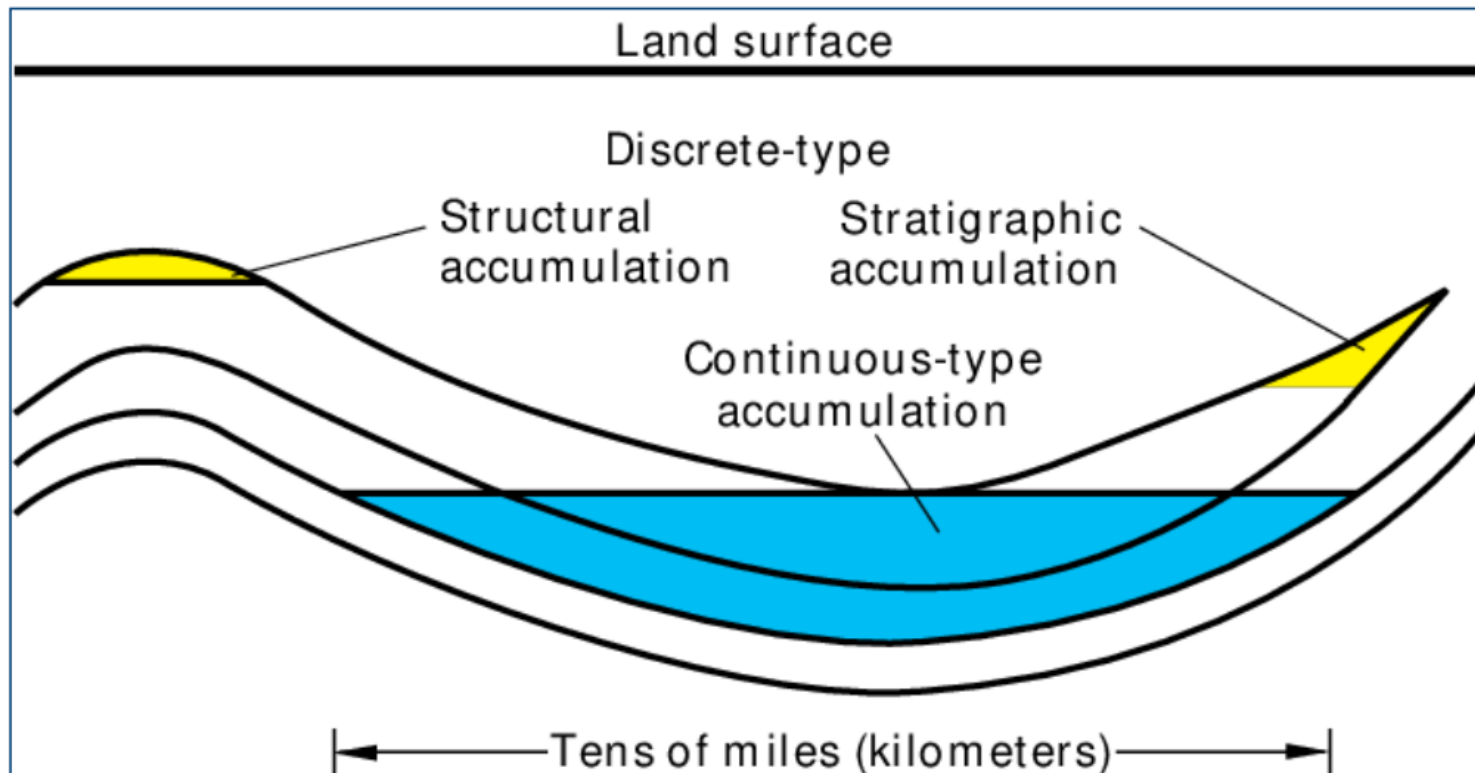


Figure 1: Forage exploratoire réalisée dans la formation du Bakken

Pétrole de roche-mère

→ 9 % de la production mondiale

EUR Map

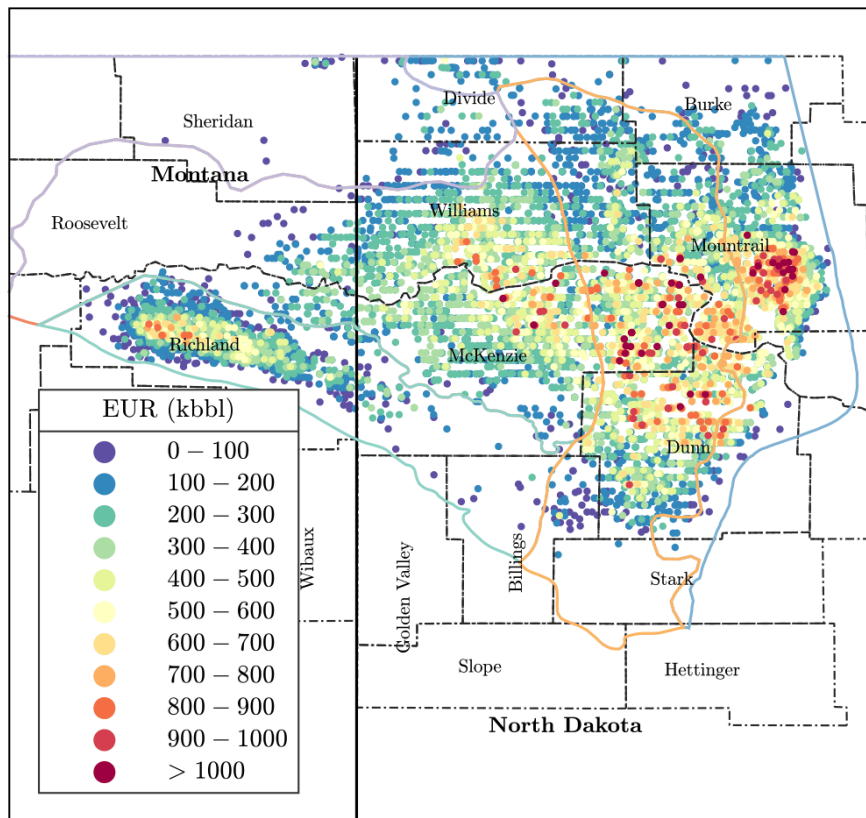
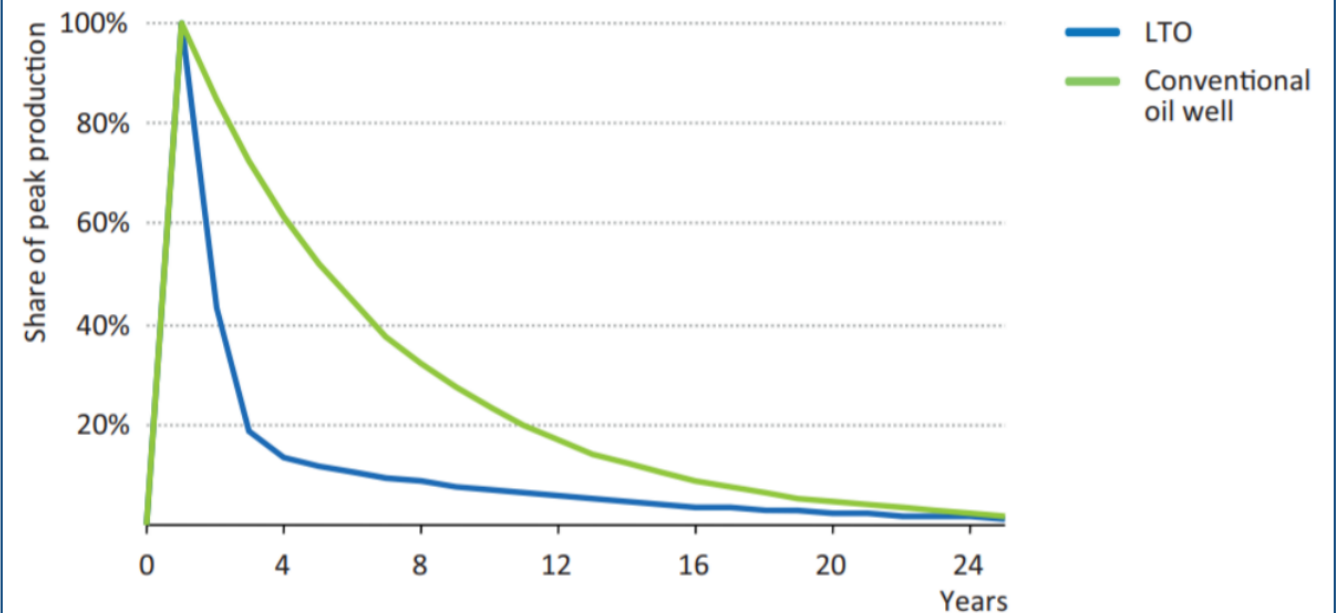
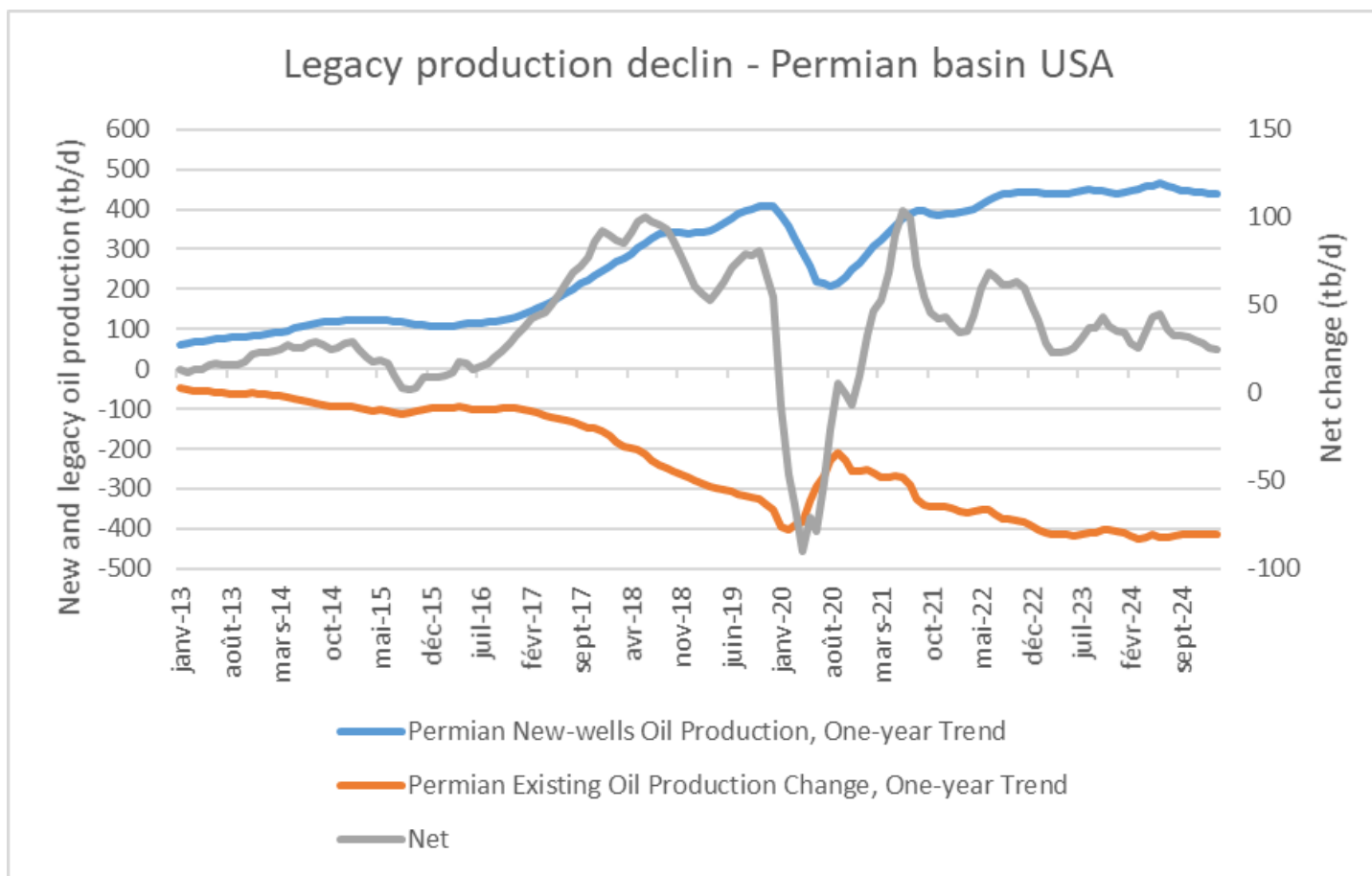


Figure 14.4 ▷ Typical production curve for a light tight oil well compared with a conventional oil well



Pétrole de roche-mère

« Legacy production » du bassin permien aux Etats-unis



Pétrole extra-lourd

→ 4 % de la production mondiale

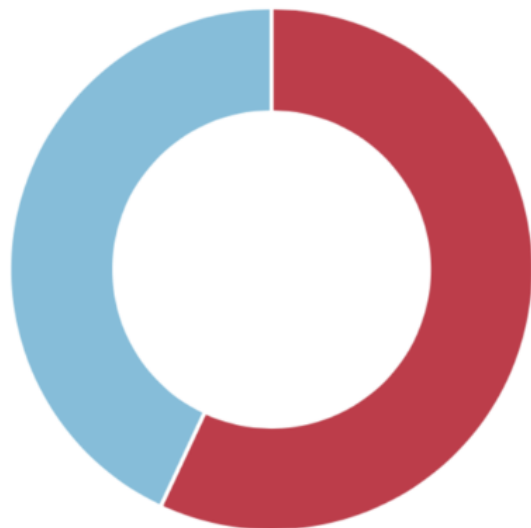


Pétrole extra-lourd

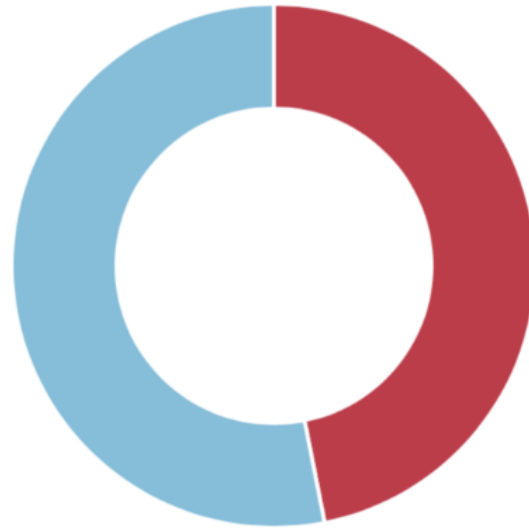
→ Deux techniques d'extraction du pétrole extra-lourd

BY THE NUMBERS: BITUMEN PRODUCTION FROM THE OIL SANDS

1999: 567 kbbl/day



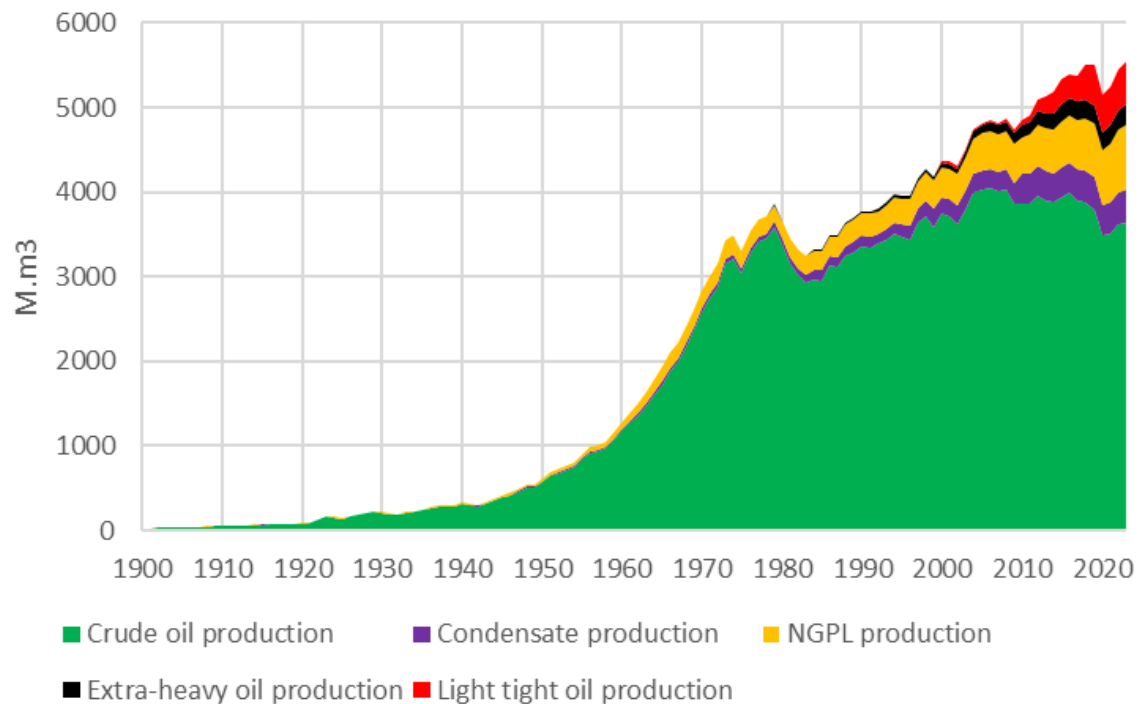
2015: 2,373 kbbl/day



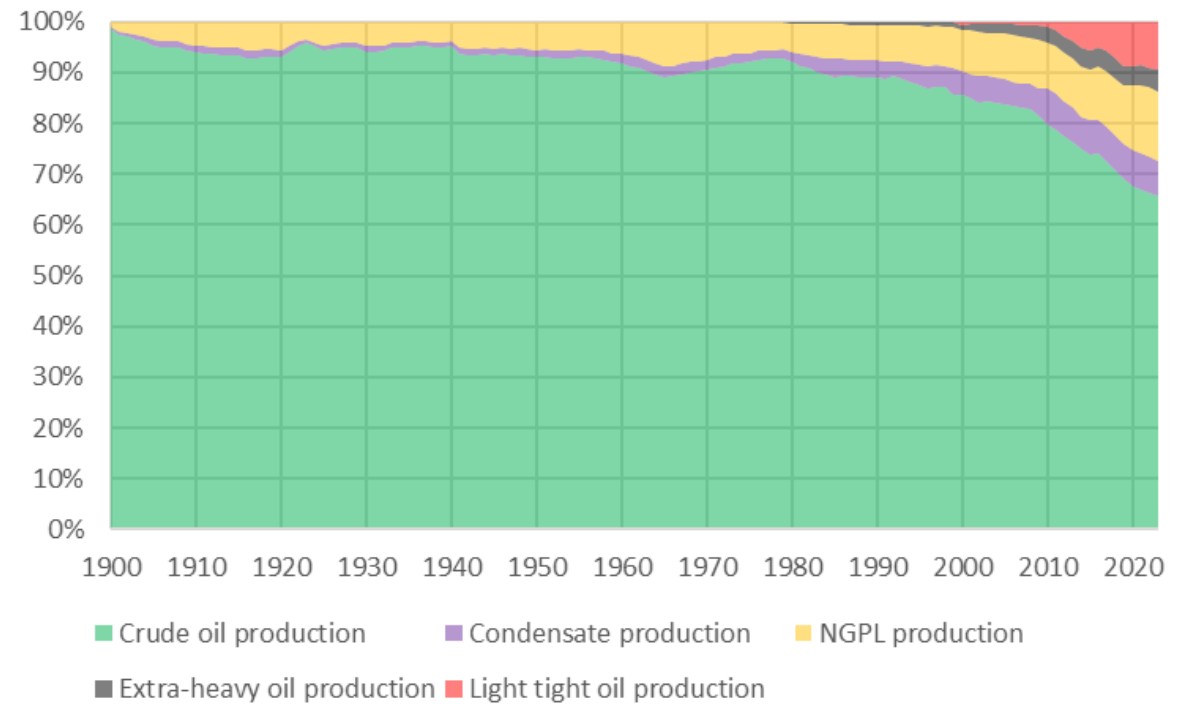
■ Mining
■ In-situ

Production mondiale par type

Production mondiale de pétrole



Production mondiale de pétrole



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.



CentraleSupélec

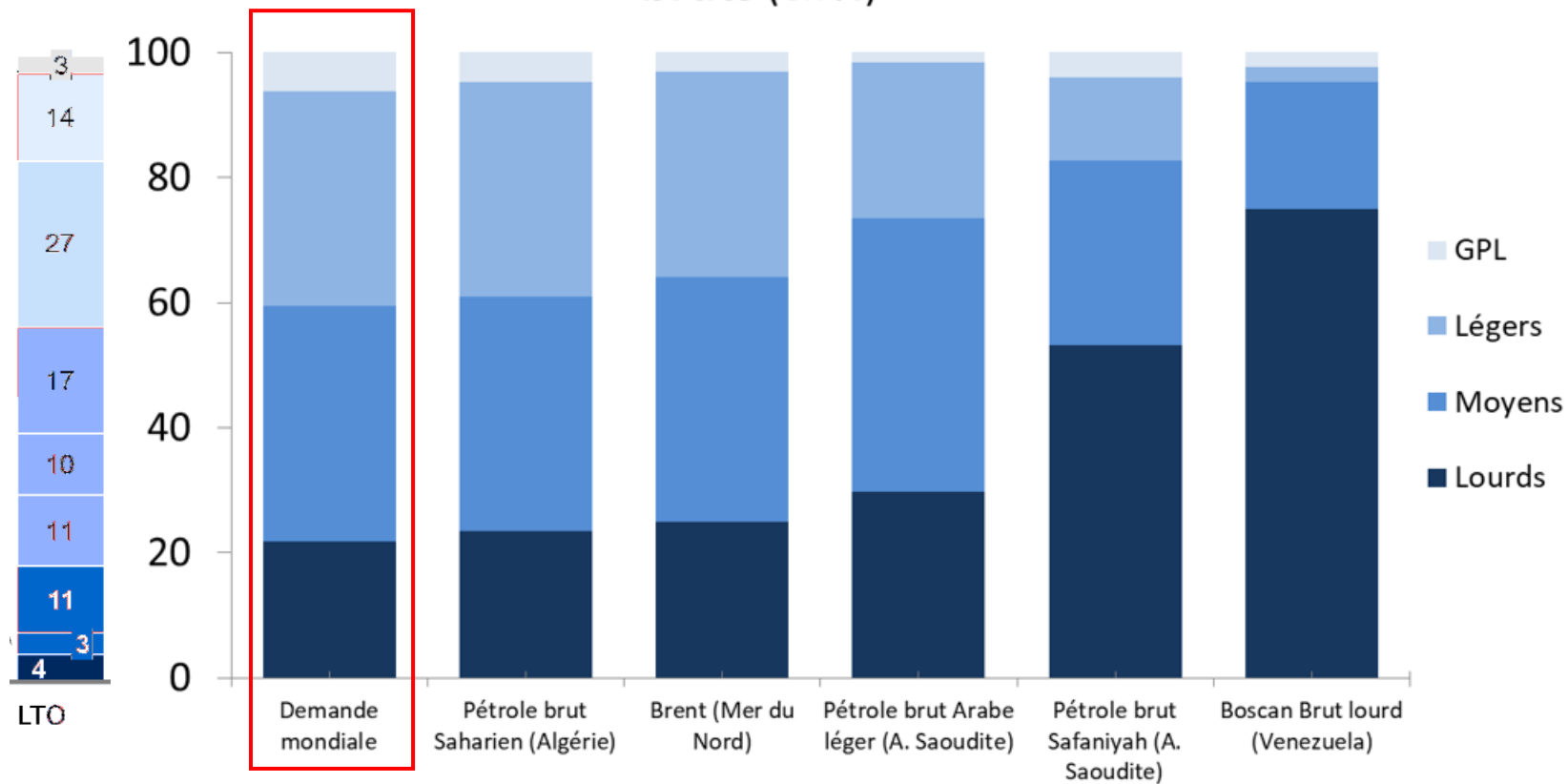
- I. Nature du pétrole
- II. Traitement et utilisation**
- III. Pétrole et économie
- IV. Finitude des ressources
- V. La situation européenne



ASPO France

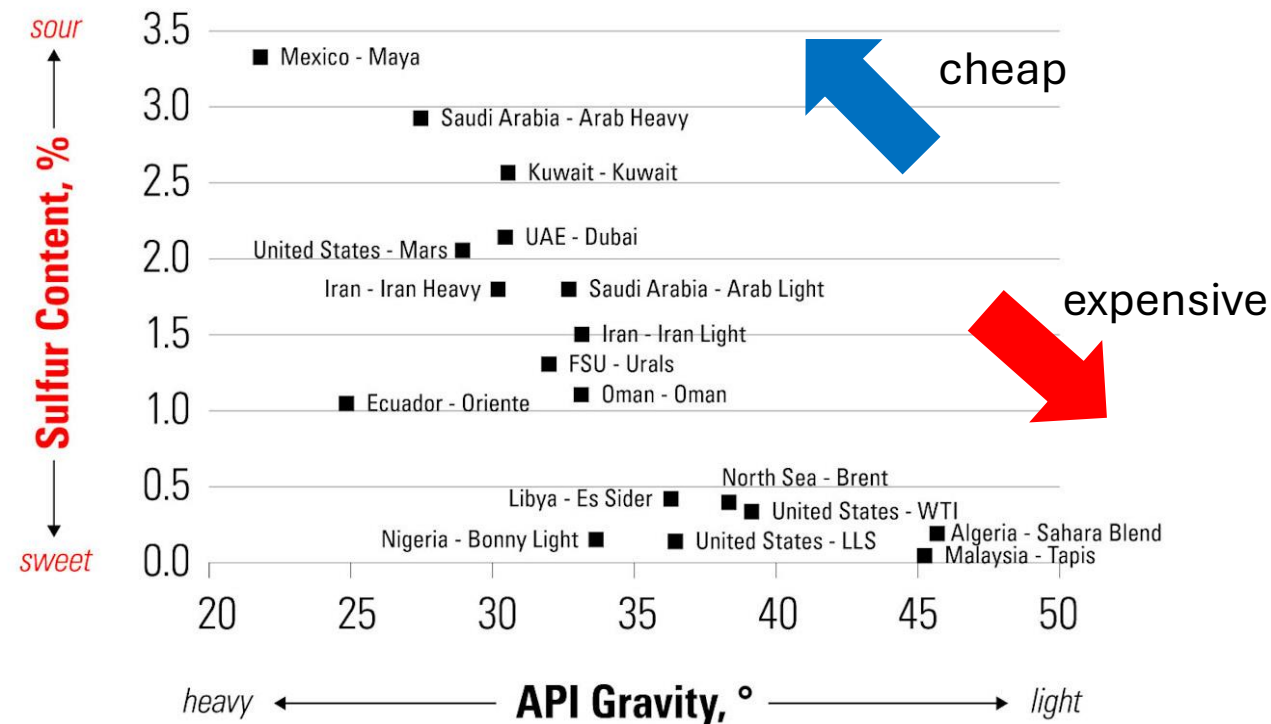
Coupes pétrolières

Coupes pétrolières offertes par différents pétroles bruts (en %)



Un prix dépendant de la qualité

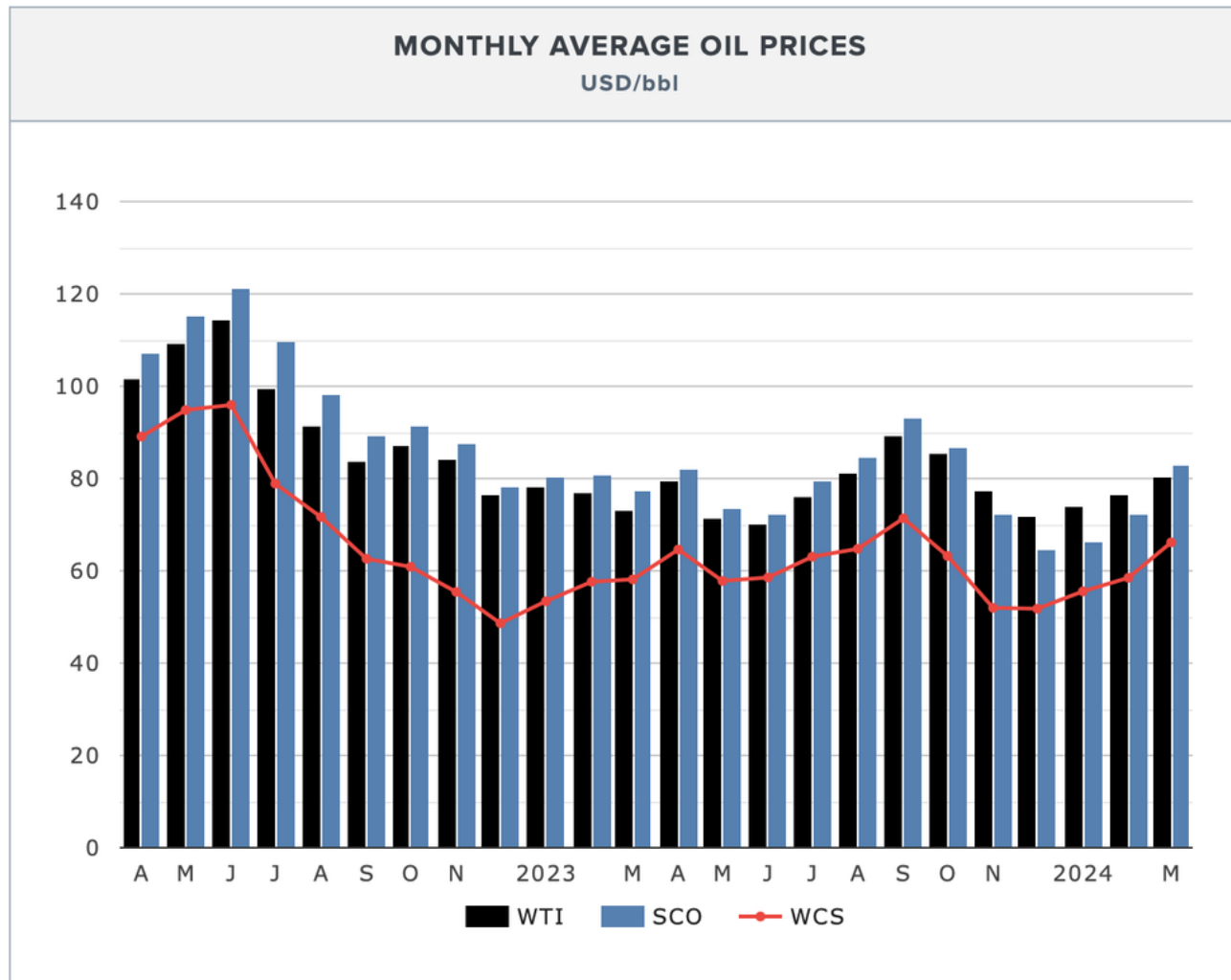
Density and Sulfur Content of Selected Crude Oils



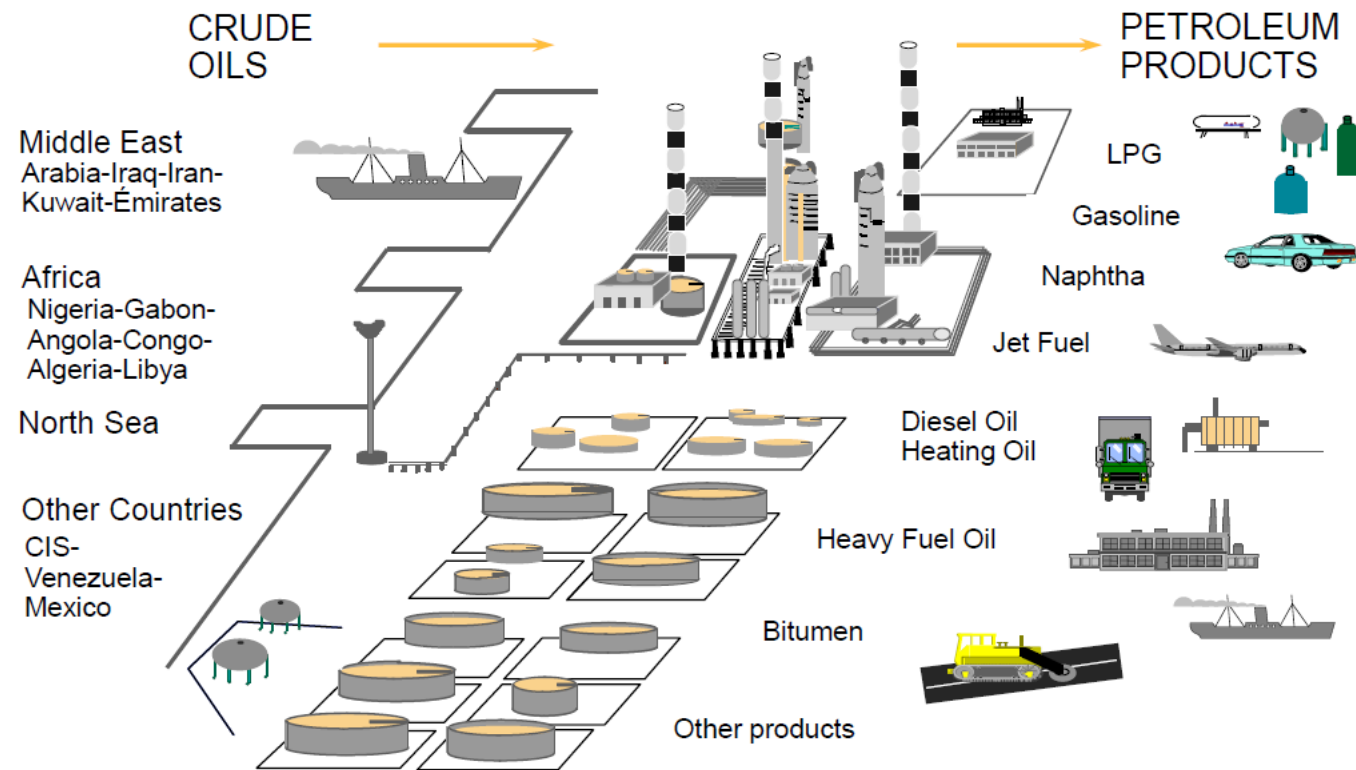
Source: U.S. Energy Information Administration, based on Energy Intelligence Group—International Crude Oil Market Handbook.

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

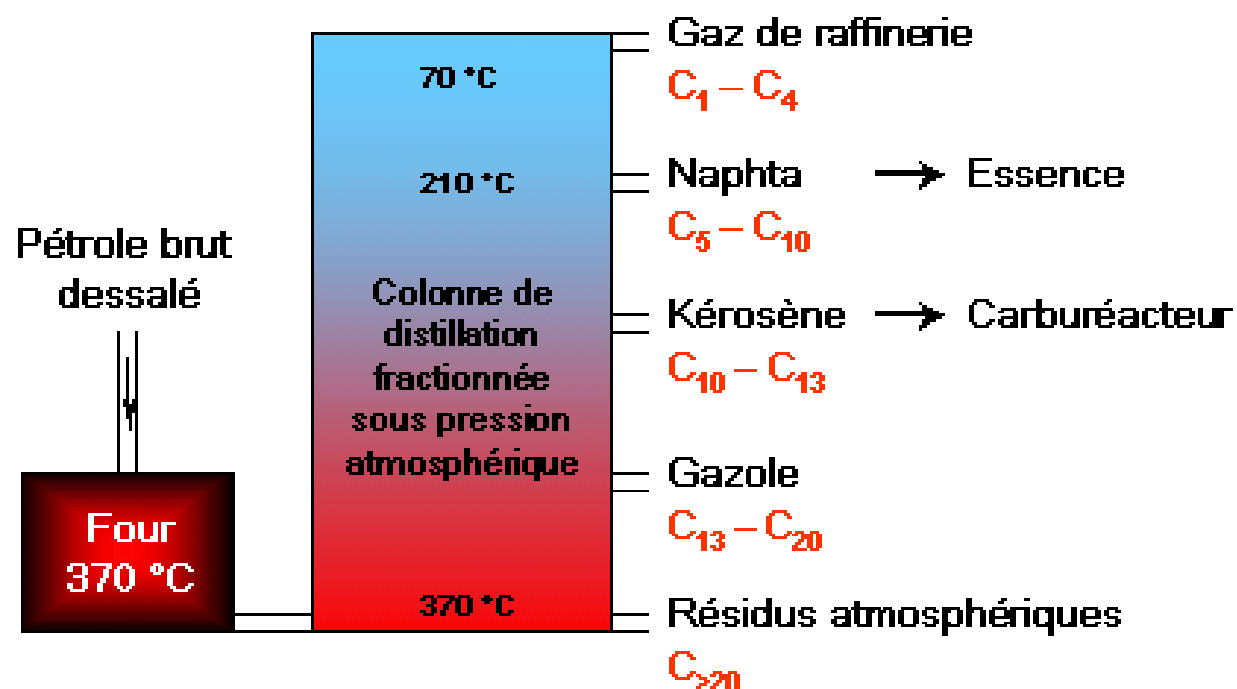


Complexe de raffinage



Distillation atmosphérique

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

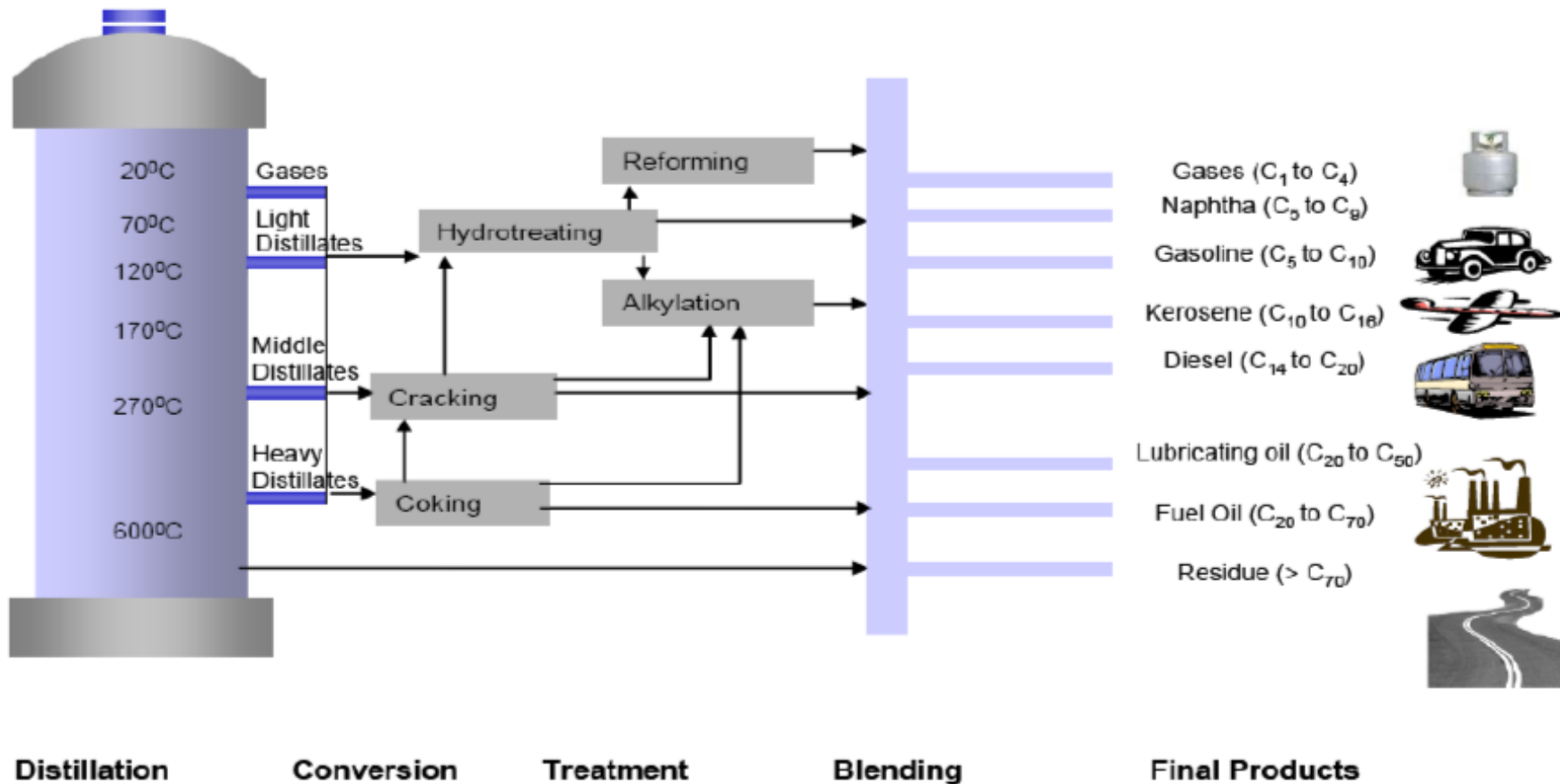


Exemple de distillation

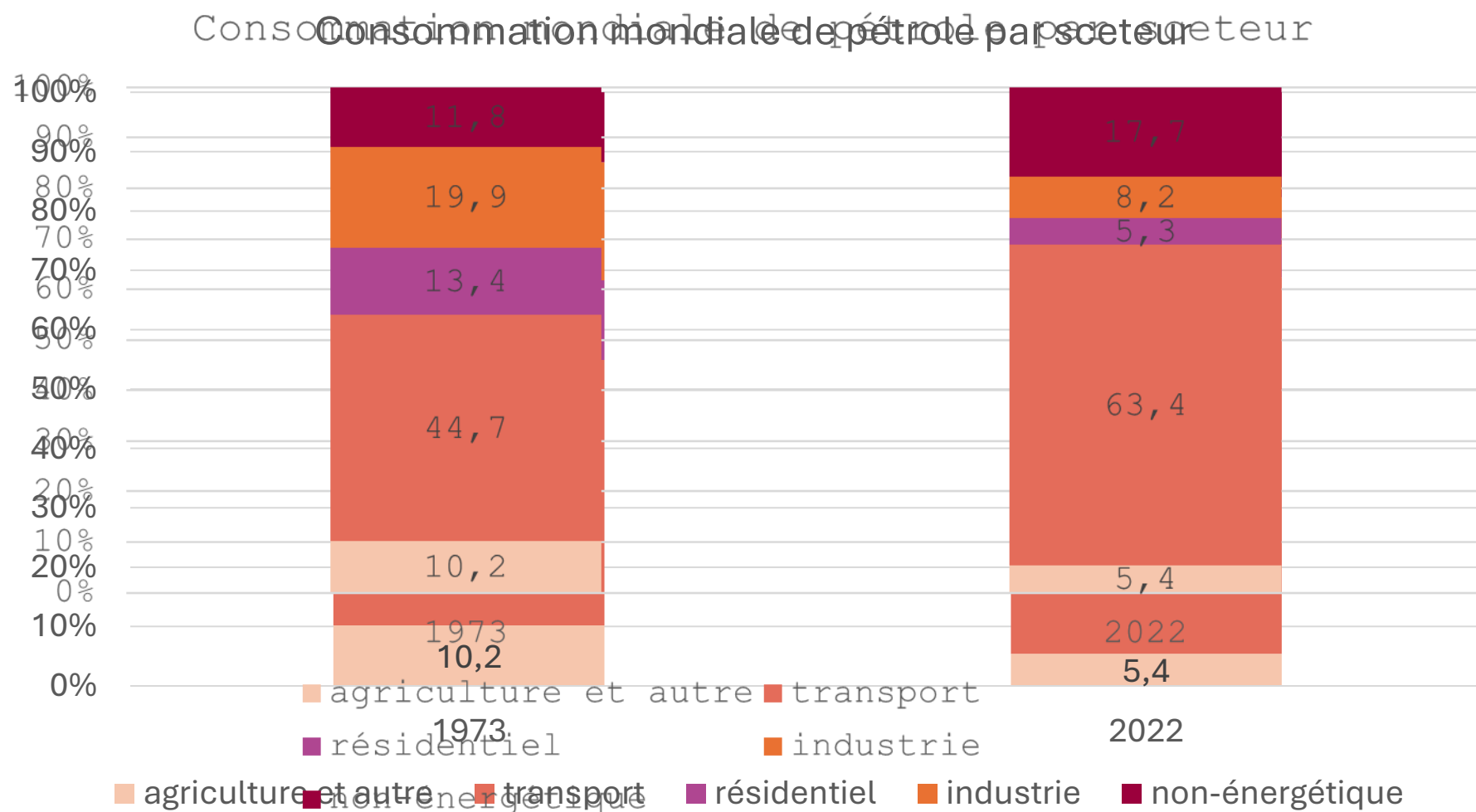
| Cut Data | | | Atmospheric Cuts | | | | | | | | | | Vacuum Cuts | | | |
|-------------------------|-------|-----|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------------|-------|-------|-------|
| Start (°C) | IBP | IBP | C5 | 65 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 370 | | 370 | 450 | 500 | 550 |
| End (°C) | FBP | C4 | 65 | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 370 | FBP | | 450 | 500 | 550 | FBP |
| 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 |

| Cut Data | | | Atmospheric Cuts | | | | | | | | | | Vacuum Cuts | | | |
|--------------------------|--------|-------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|-------|-------------|-------|-------|--|
| Start (°F) | IBP | C5 | 149 | 212 | 302 | 392 | 482 | 572 | 662 | 698 | | 698 | 842 | 932 | 1022 | |
| End (°F) | FBP | 149 | 212 | 302 | 392 | 482 | 572 | 662 | 698 | FBP | | 842 | 932 | 1022 | 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



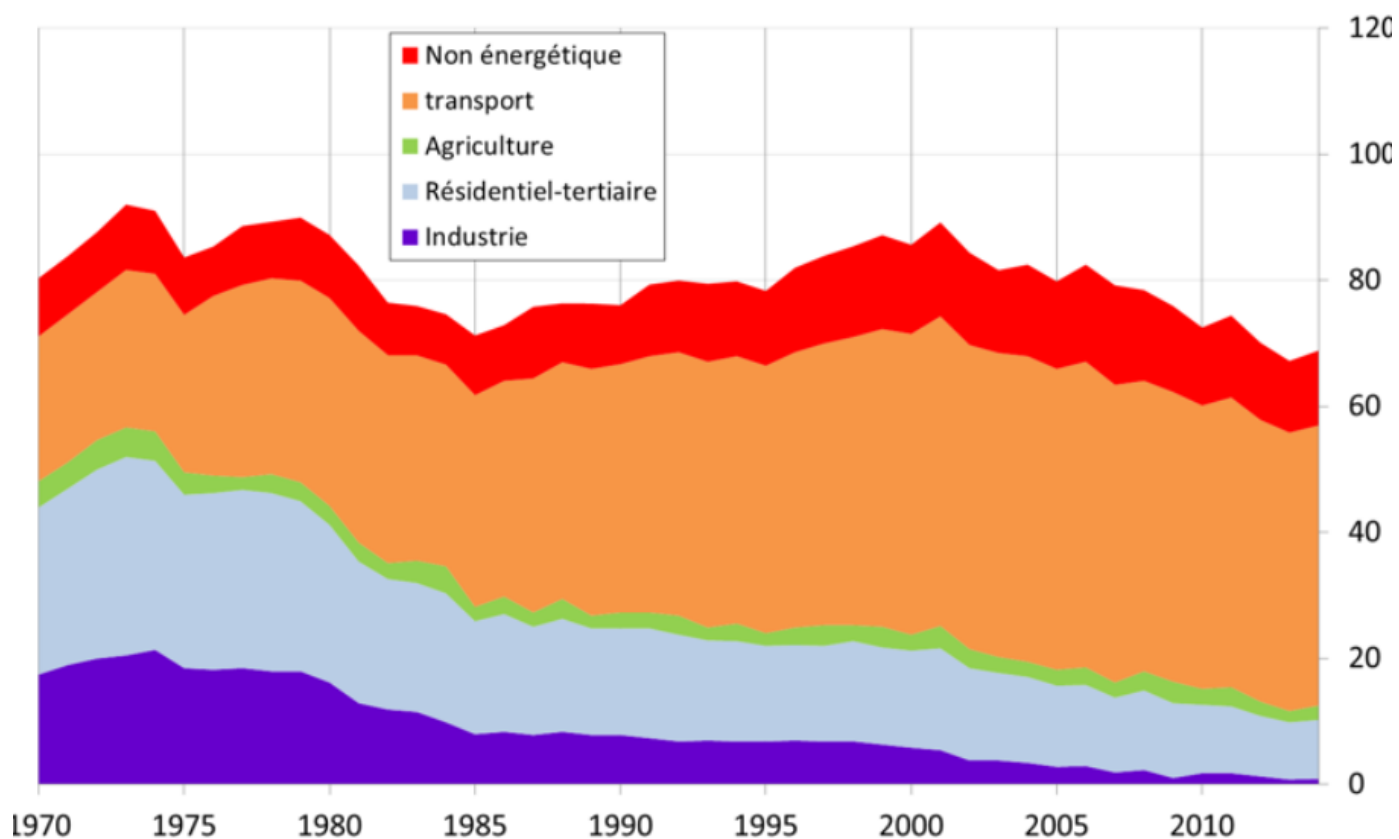
Usages du pétrole dans le monde



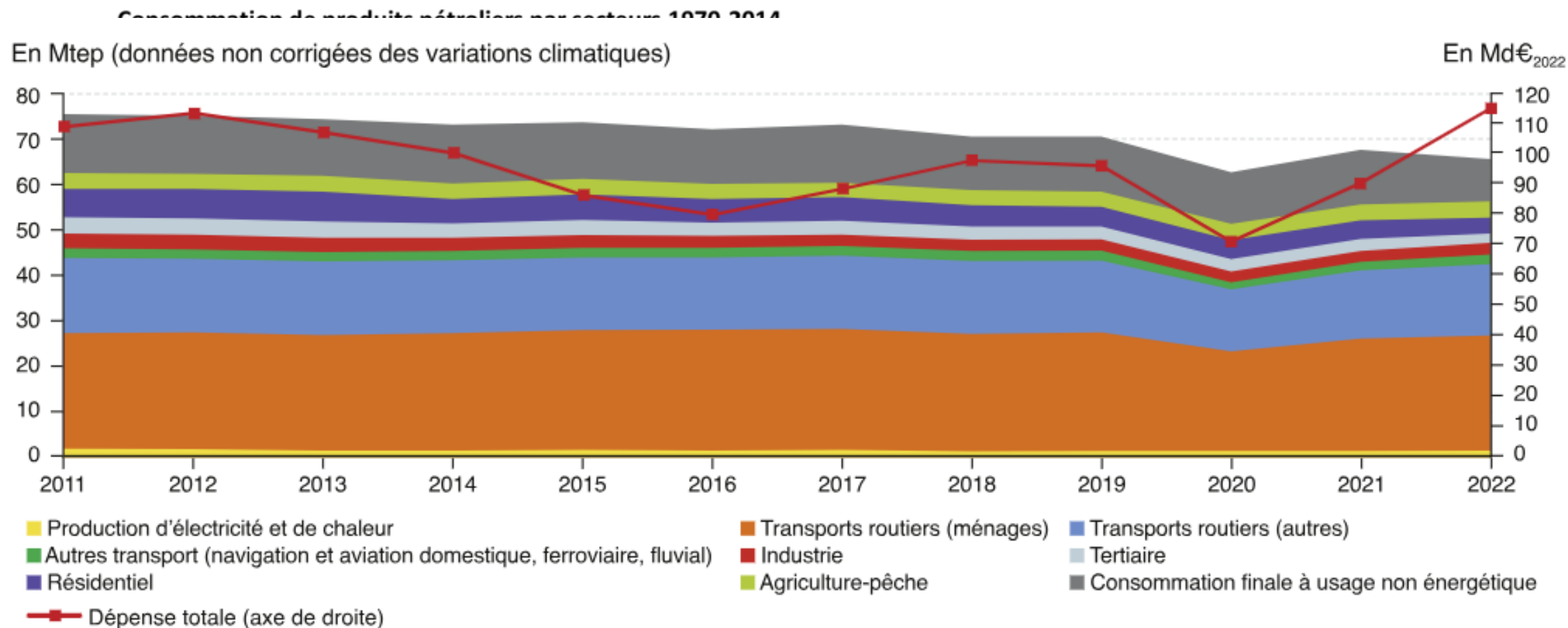
Usages du pétrole en France

Consommation de produits pétroliers par secteurs 1970-2014

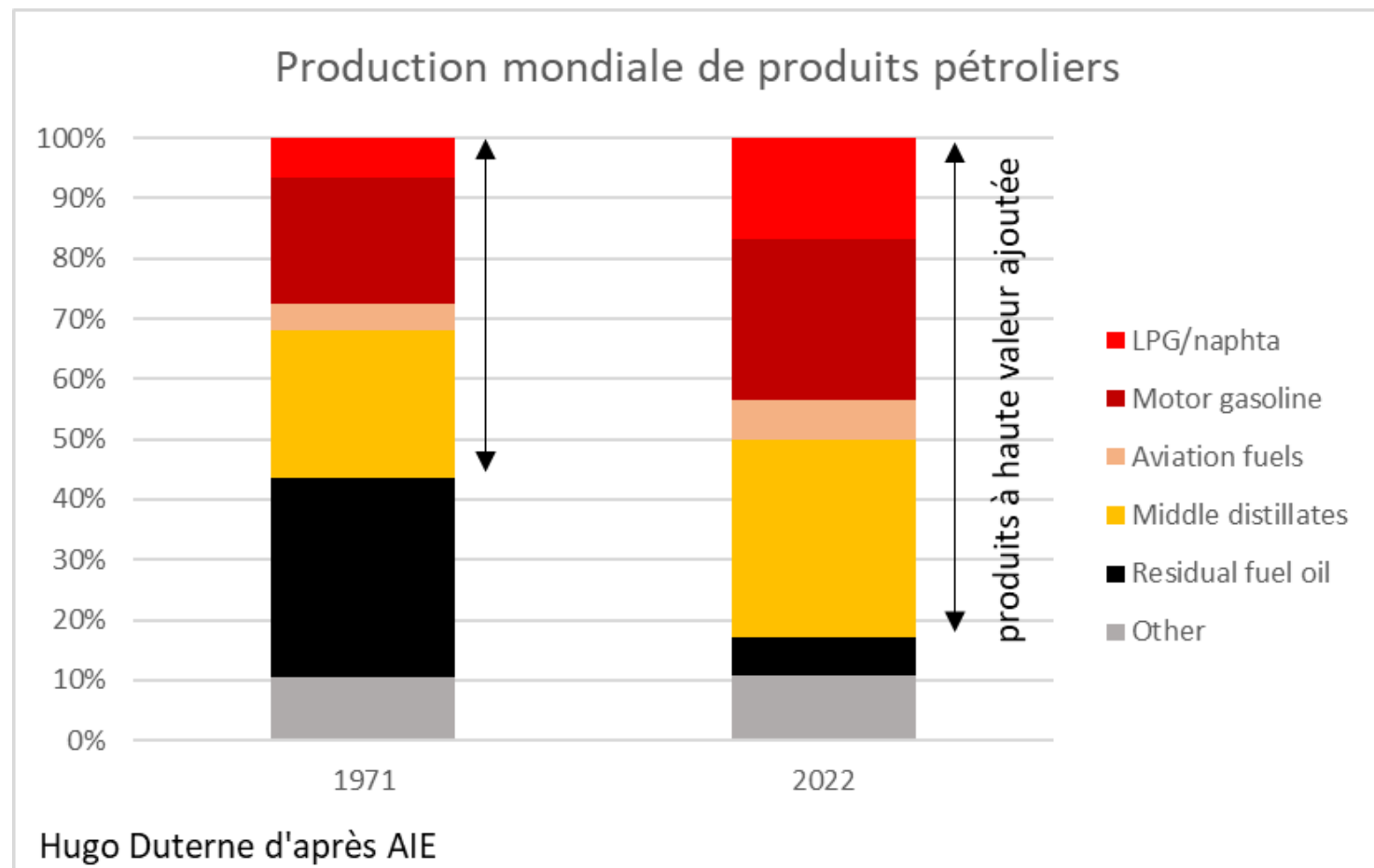
(en millions de tonnes équivalent pétrole) (Source : Ministère de l'environnement)



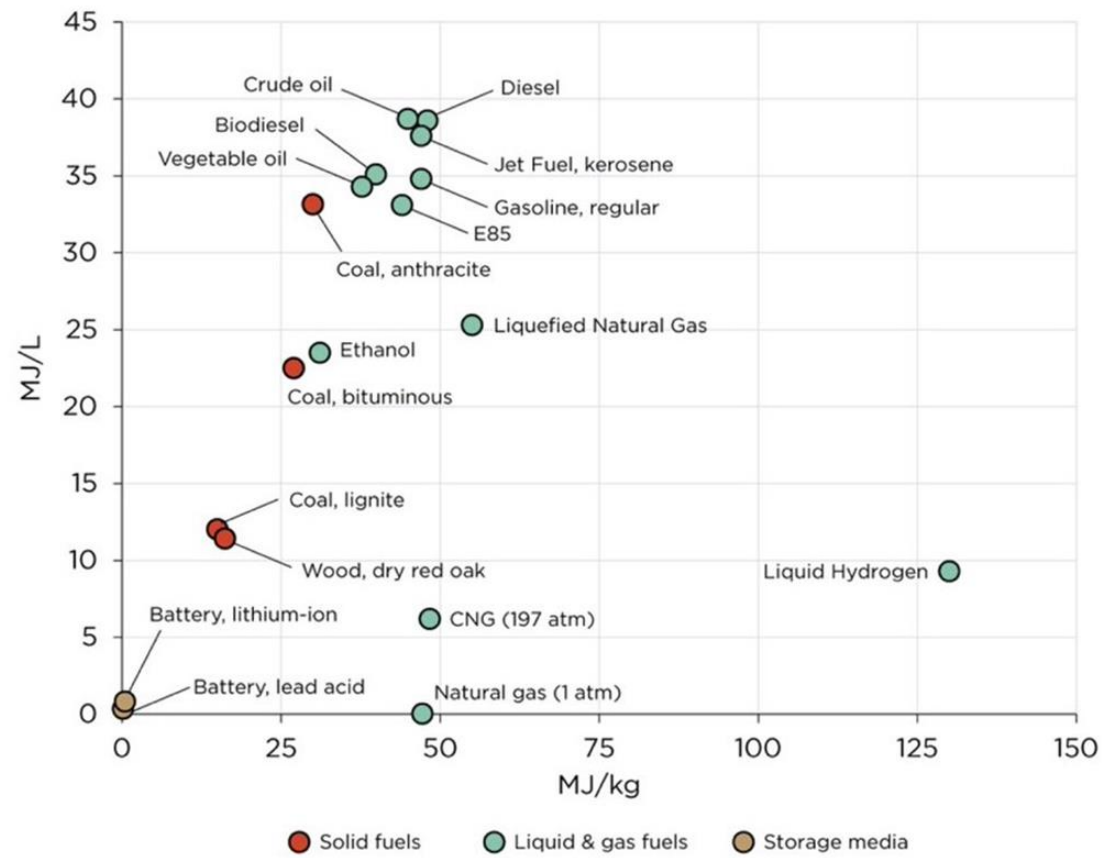
Usages du pétrole en France



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 ?

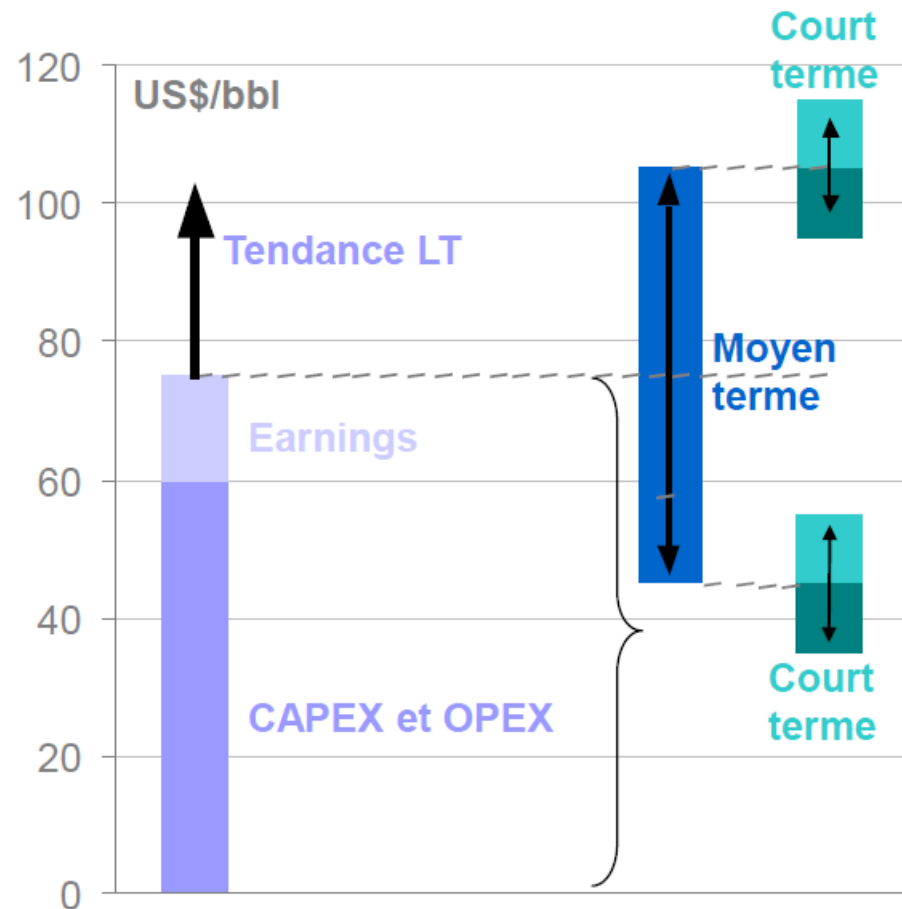
Conclusion fil rouge : La diversification des sources d'approvisionnement en pétrole face au resserrement de la demande à des secteurs d'activités spécifiques (carburants) force le raffinage pétrolier à des adaptations structurelles majeures. Quel impact sur les prix ?



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

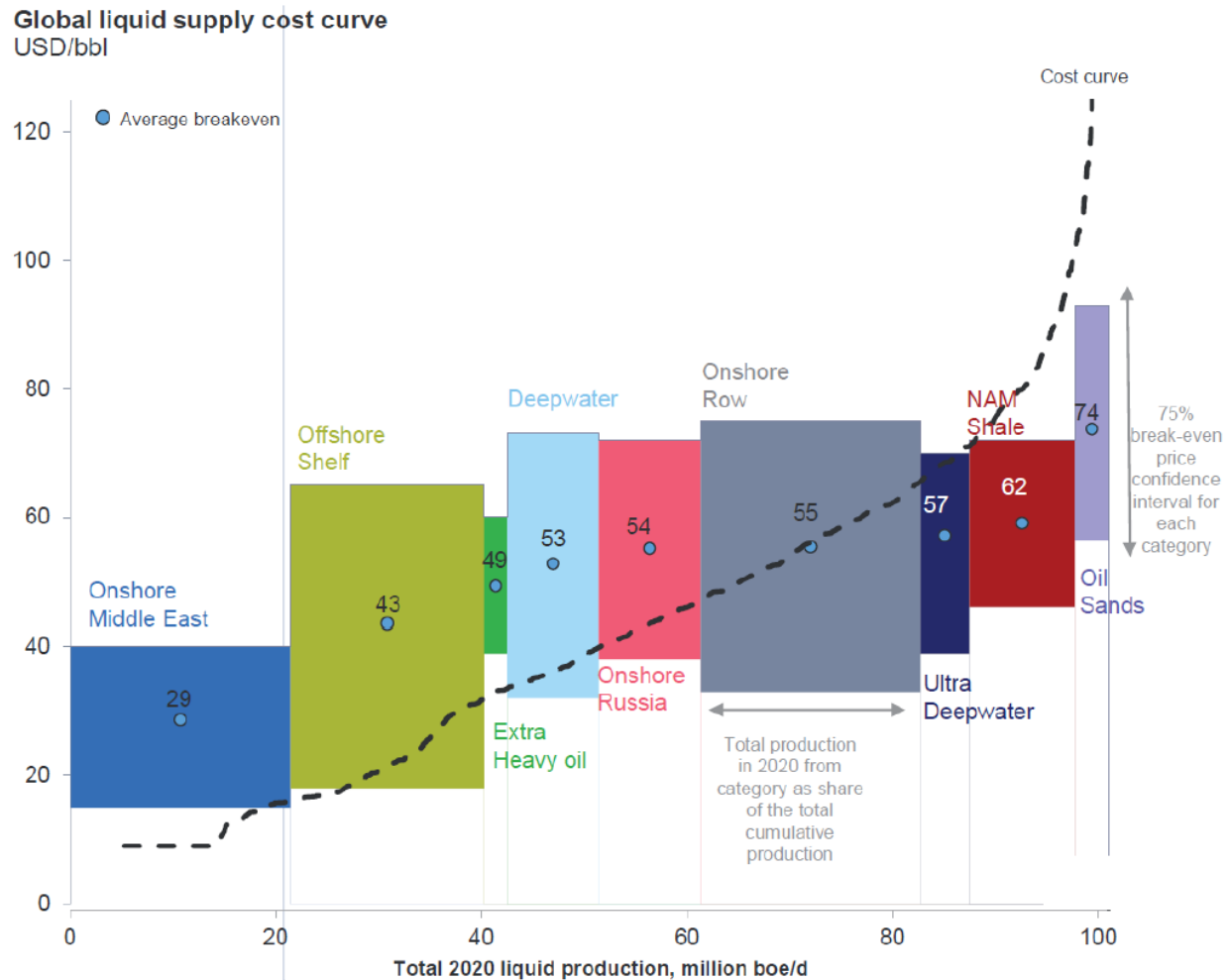
- Sous-capacités versus élasticité demande
- Surcapacités versus stratégie de l'acteur dominant

Composante long terme

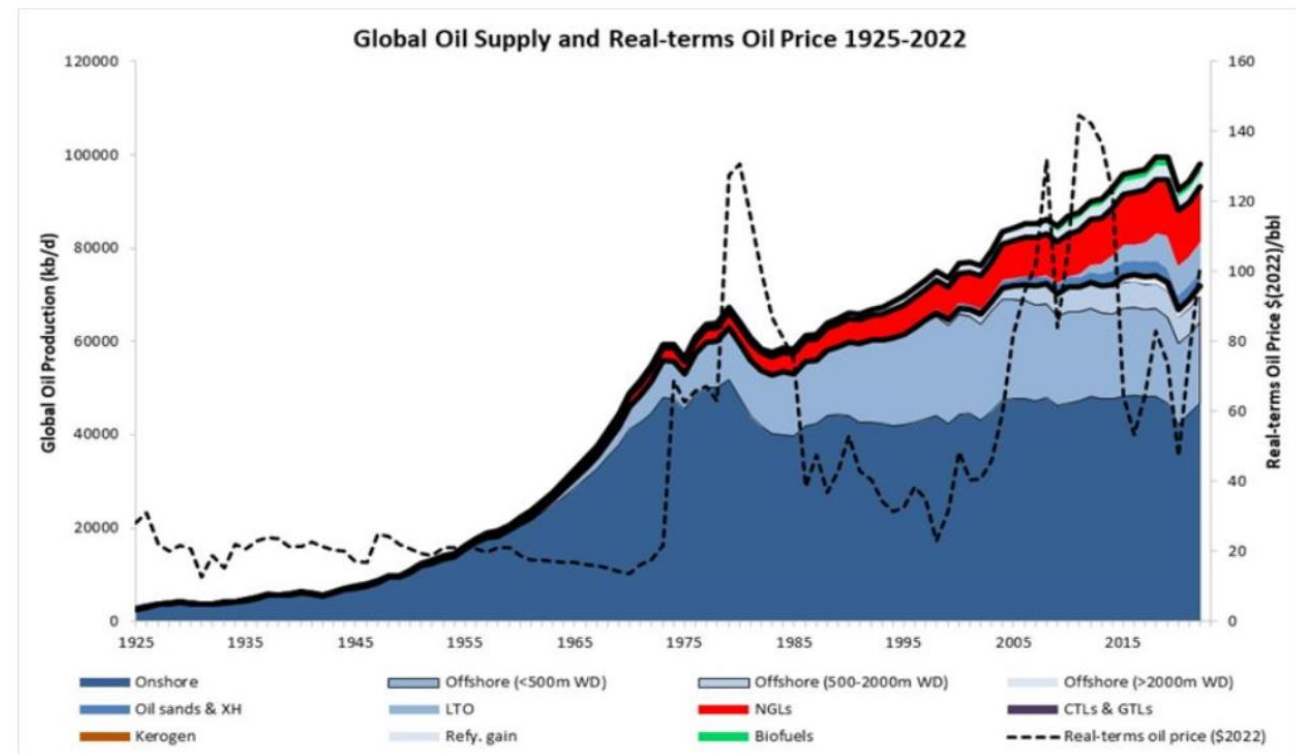
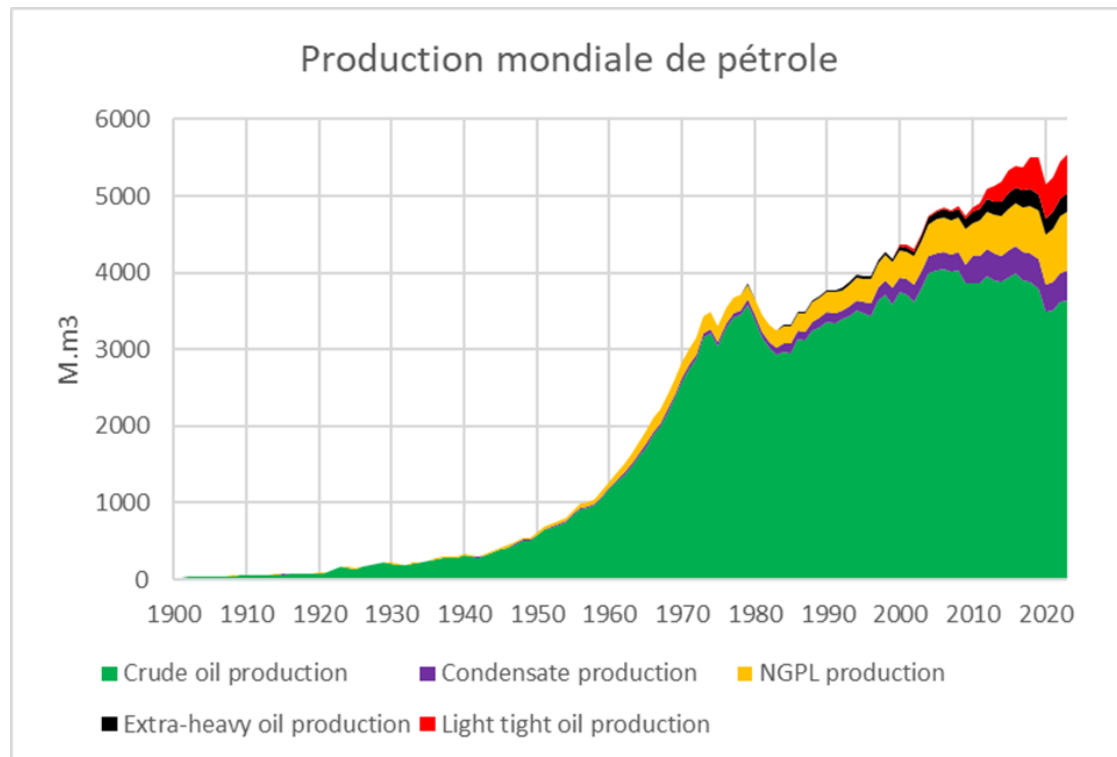
Coût marginal d'extraction

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

Composante de long terme



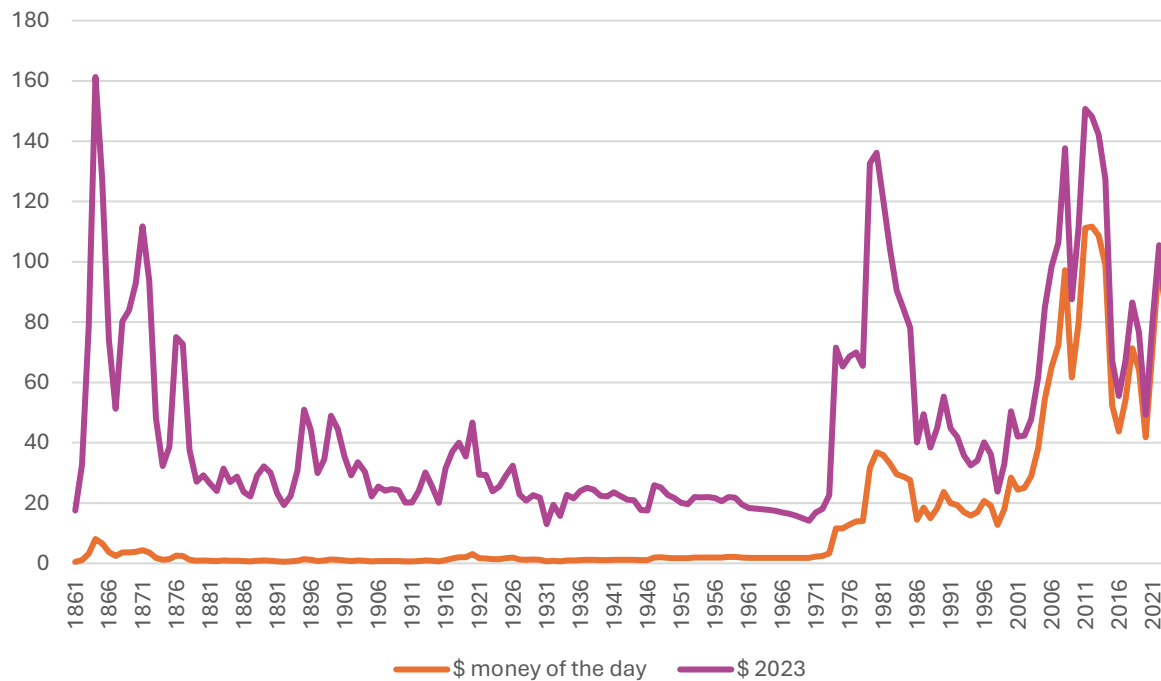
Composante de long terme



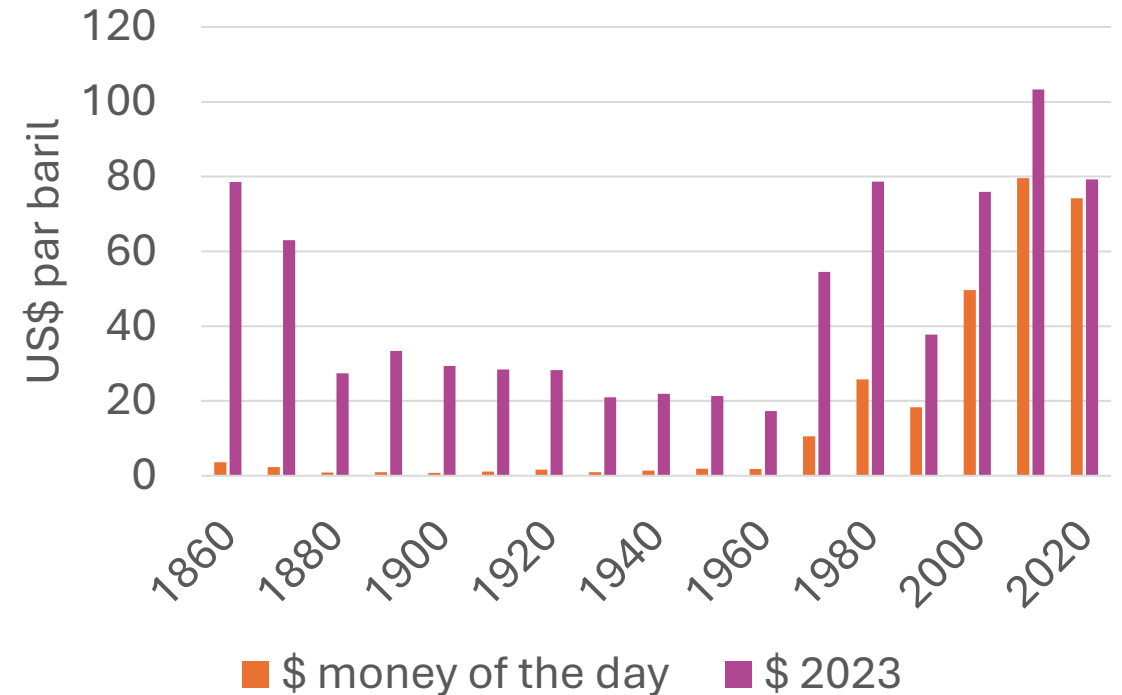
Source : ASPOdata

Hausse structurelle des prix

Prix du pétrole (\$/baril)

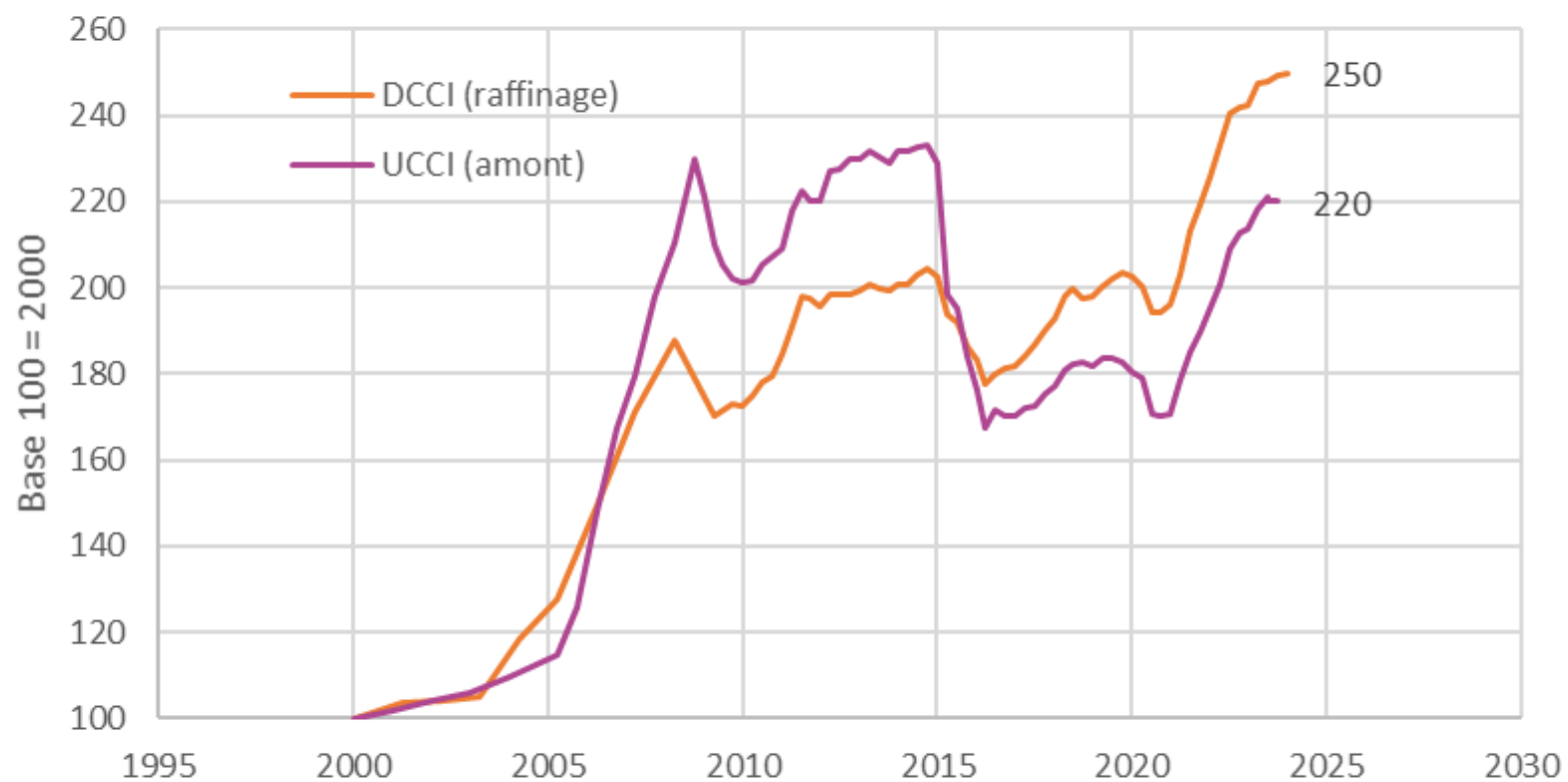


Prix du pétrole par décennie



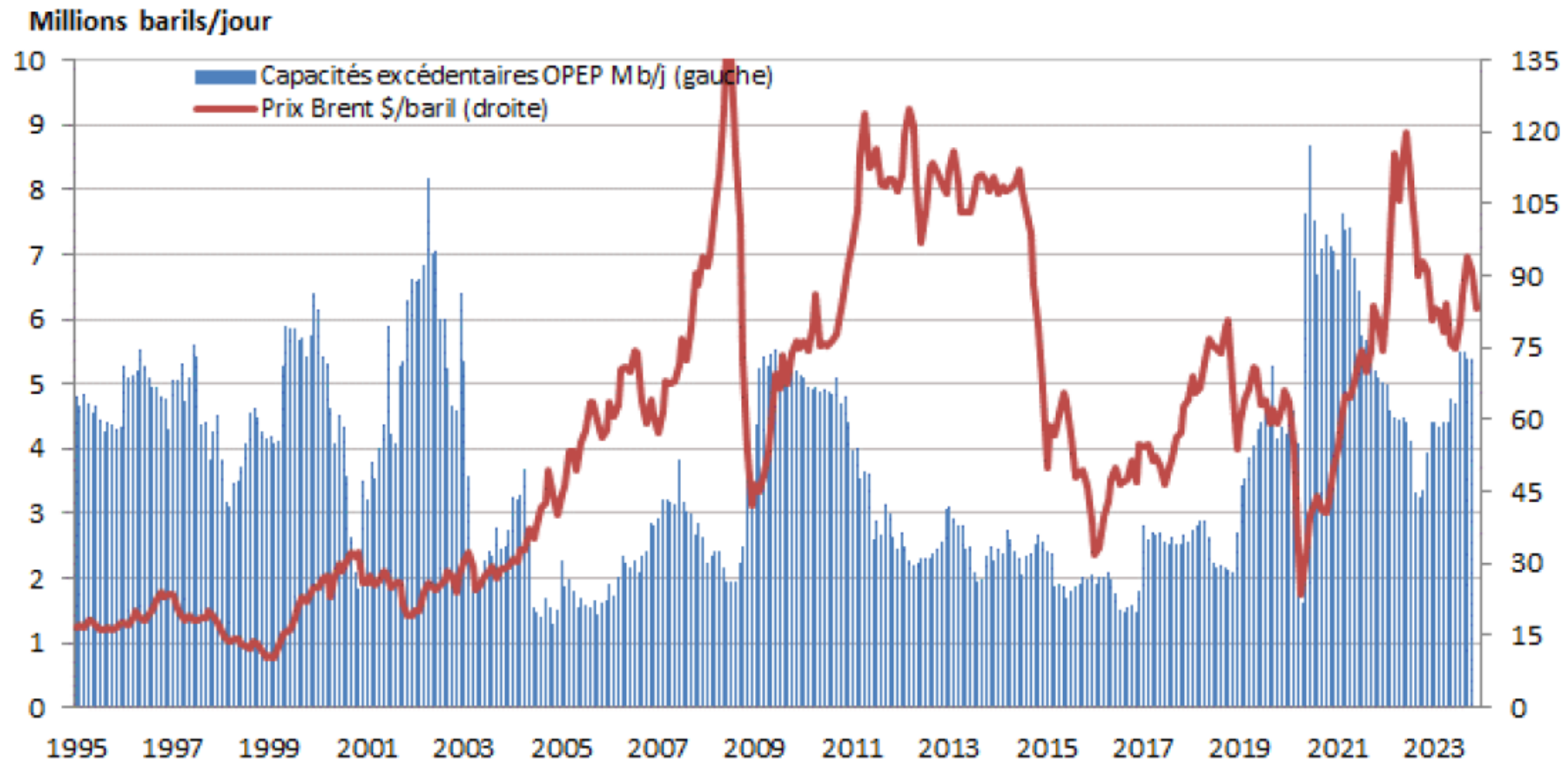
Prix du produit final

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



Hugo DUTERNE d'après S&P

Composante moyen-terme

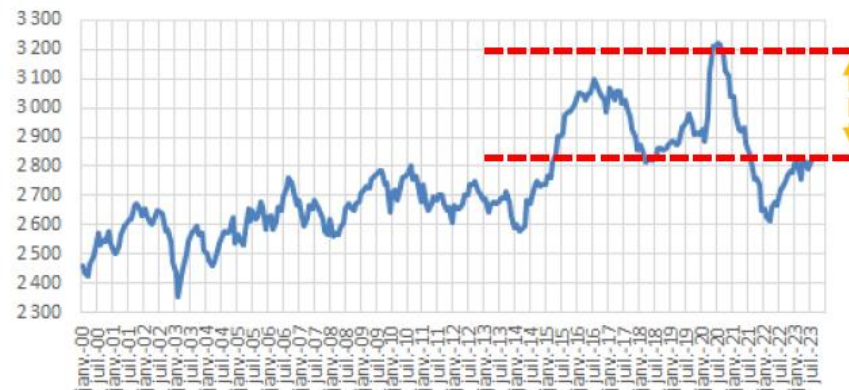


Source of data : IEA Oil Market Report, estimations O Rech.

Composante court terme

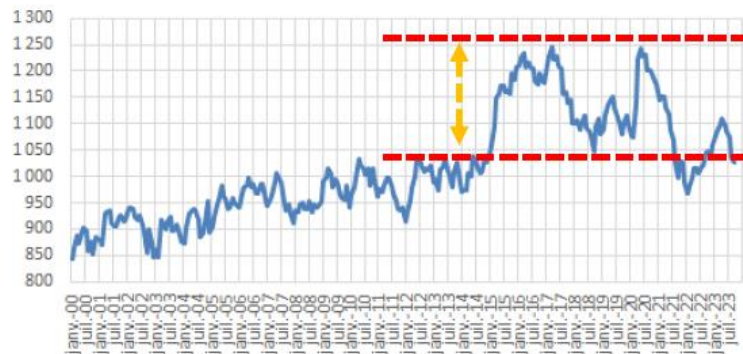
LES STOCKS - LA COMPOSANTE DE COURT TERME DU PRIX: UN SIGNAL FORTEMENT VOLATILE DEPUIS 2014...

Stocks industrie totaux - OCDE (Mb)

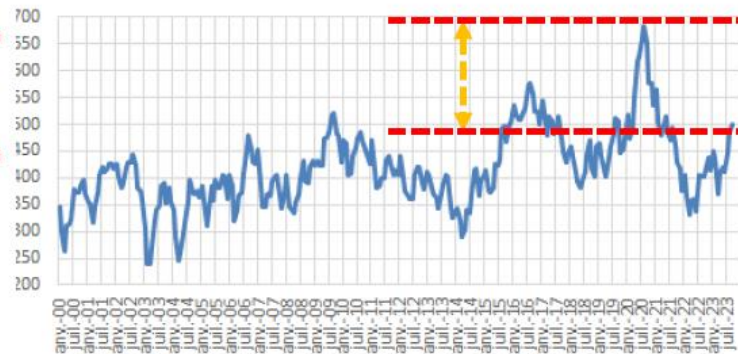


Source of data : IEA Oil Market Report

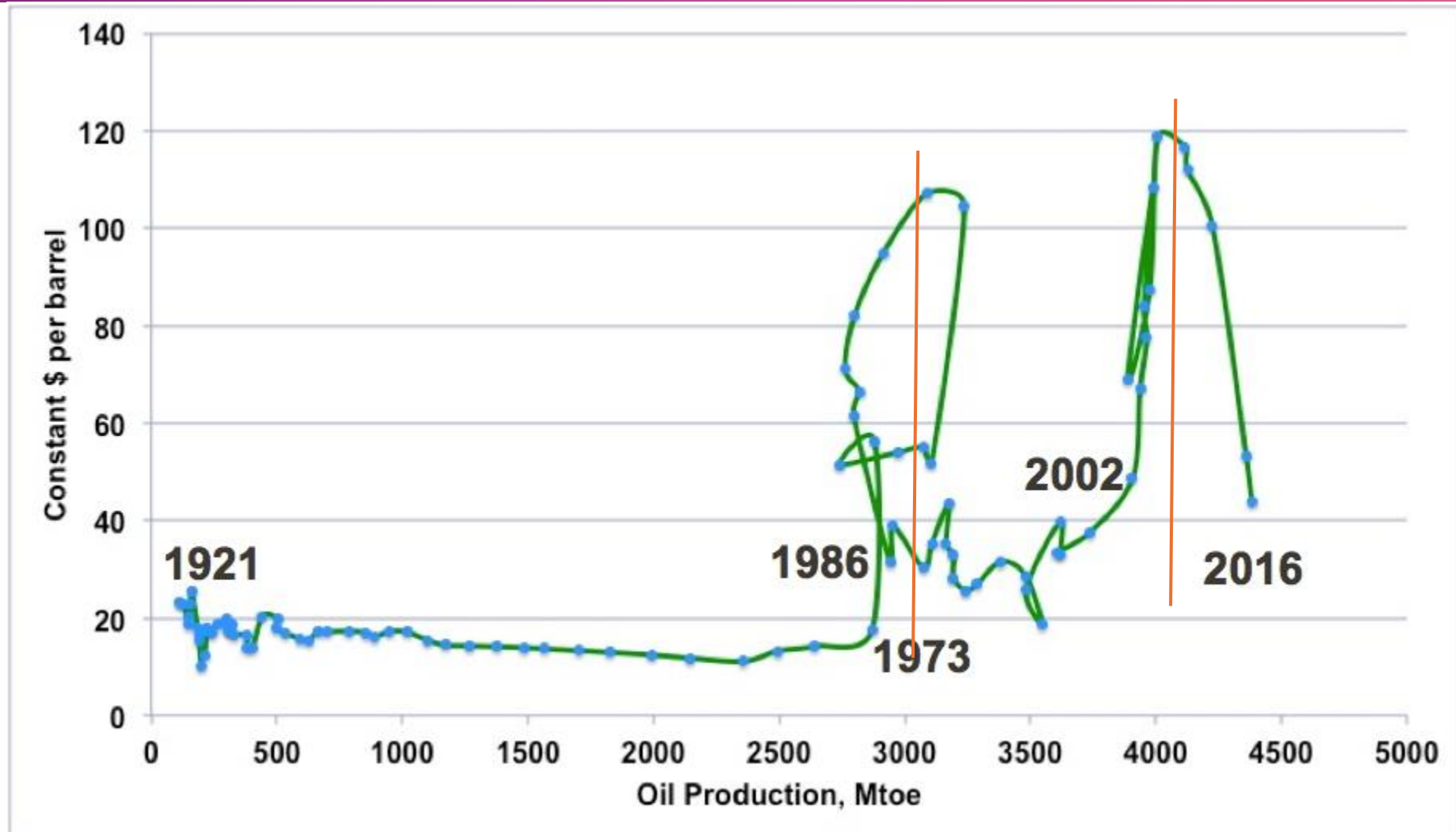
Stocks industrie pétrole brut - OCDE (Mb)



Stocks total produits - OCDE (Mb)

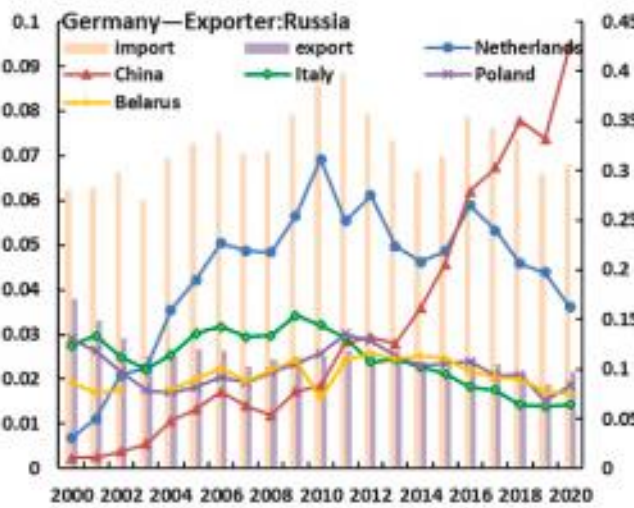
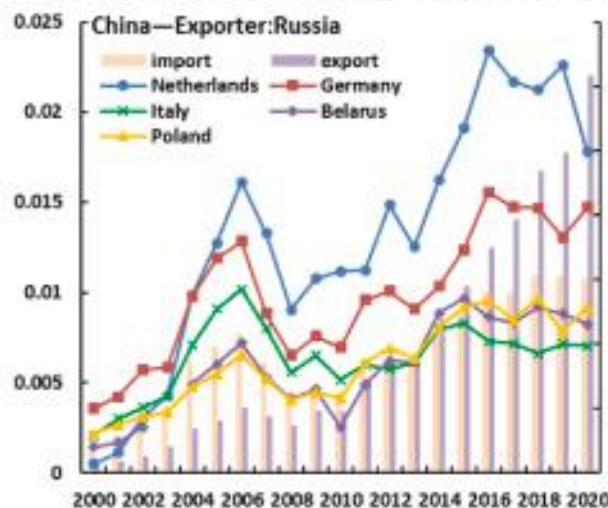
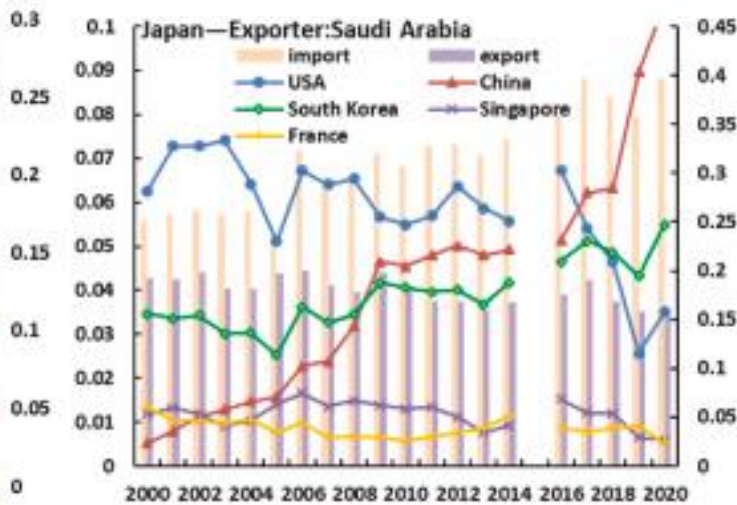


Hausse de la volatilité



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)

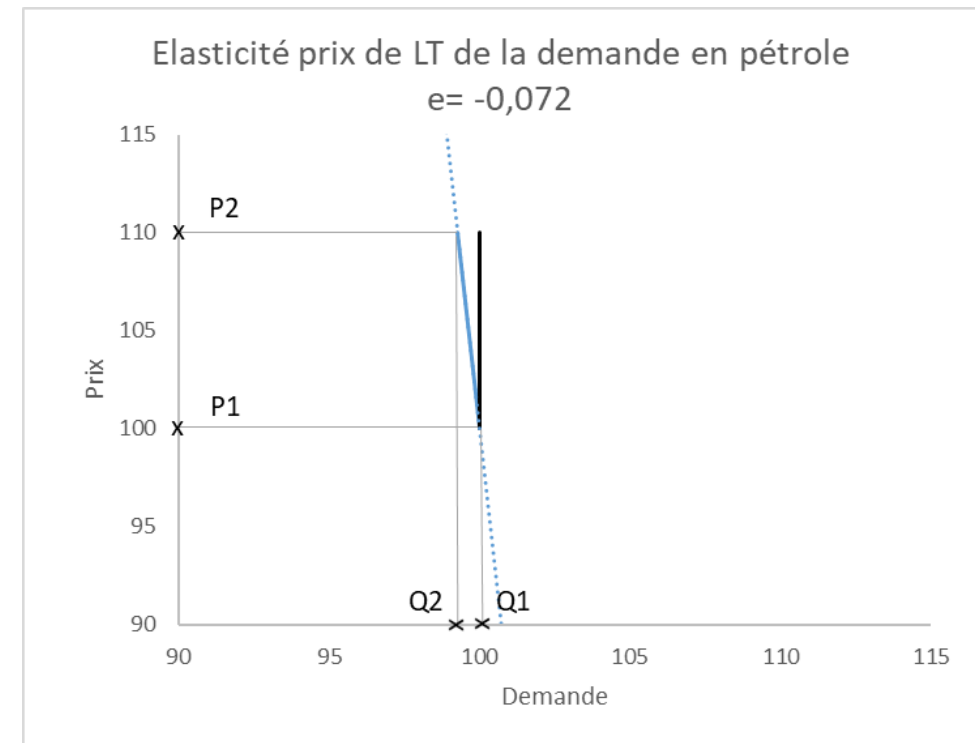
| | Short-Term Elasticity | | Long-Term Elasticity | |
|---|----------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
| | Price | Income | Price | Income |
| Combined OECD ¹ and Non-OECD | -0.019 [-0.028, -0.009] | 0.685 [0.562, 0.808] | -0.072 [-0.113, -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.

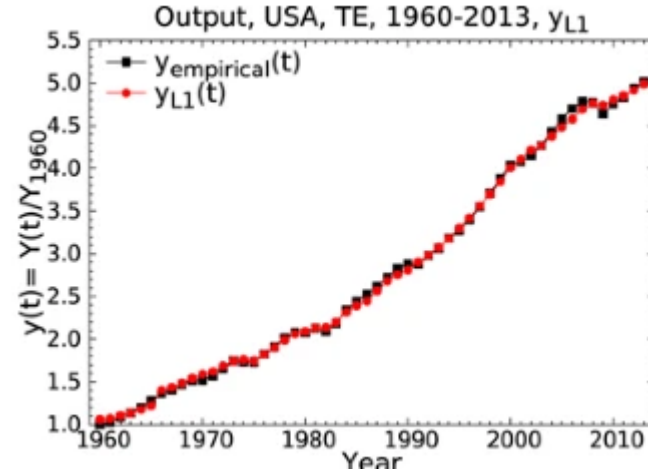
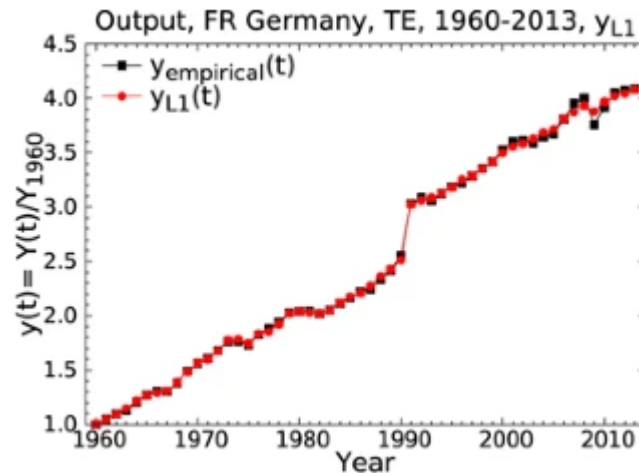
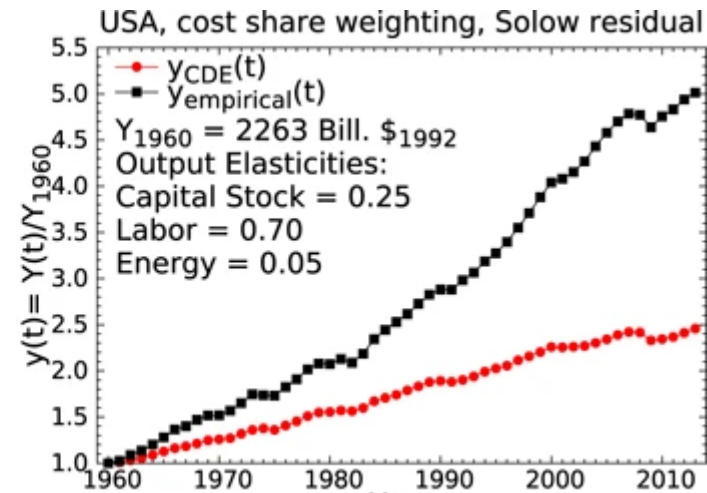
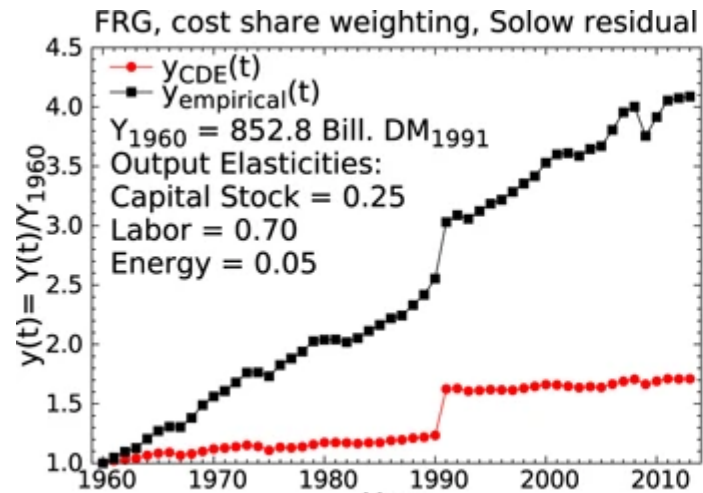
Note: Median elasticities and confidence intervals showing 10th and 90th percentile of the distribution in brackets are estimated by Monte Carlo simulations. Long-term elasticities are calculated using a 20-year horizon.

¹OECD = 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.

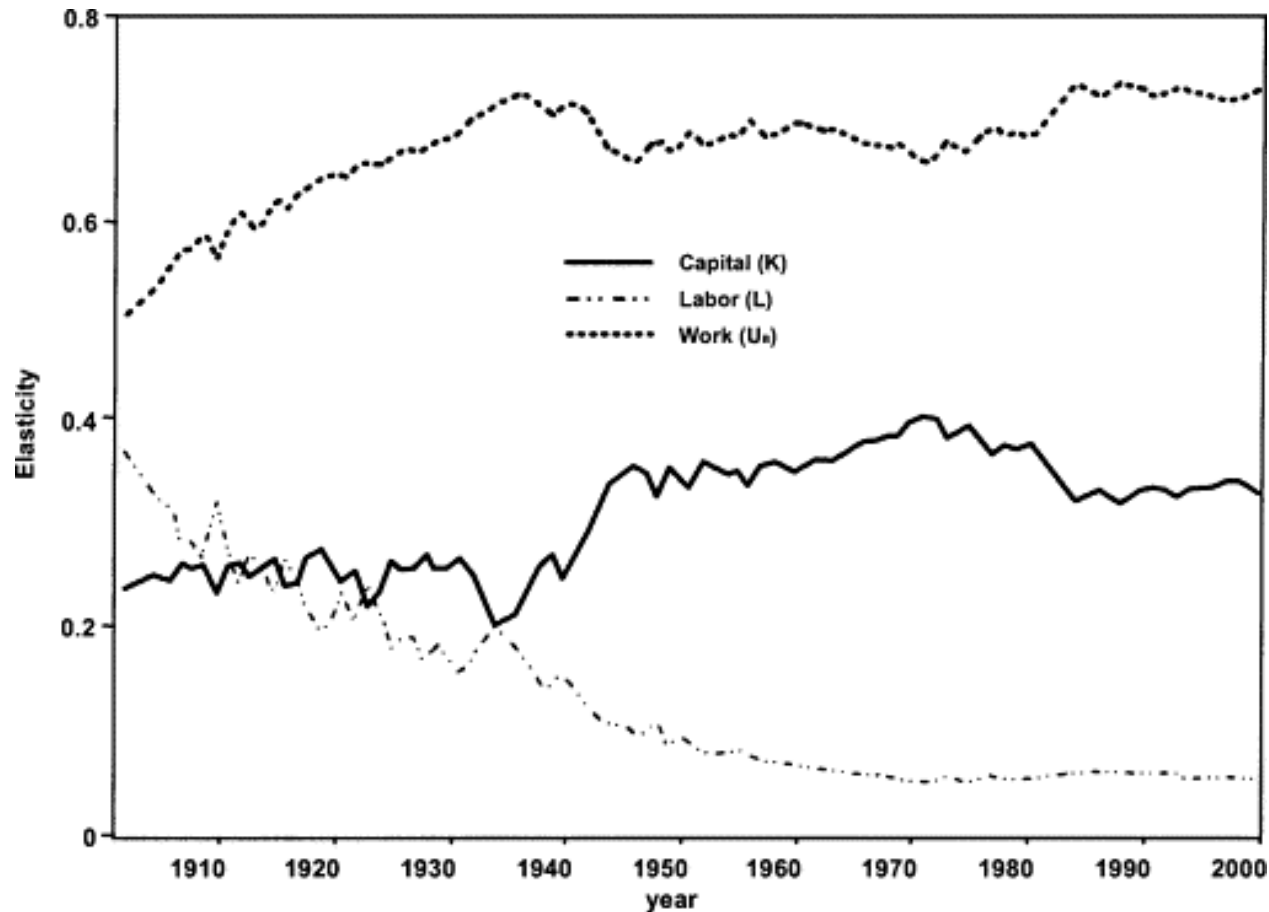


L'offre pétrolière comme facteur de production



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 contraint 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.

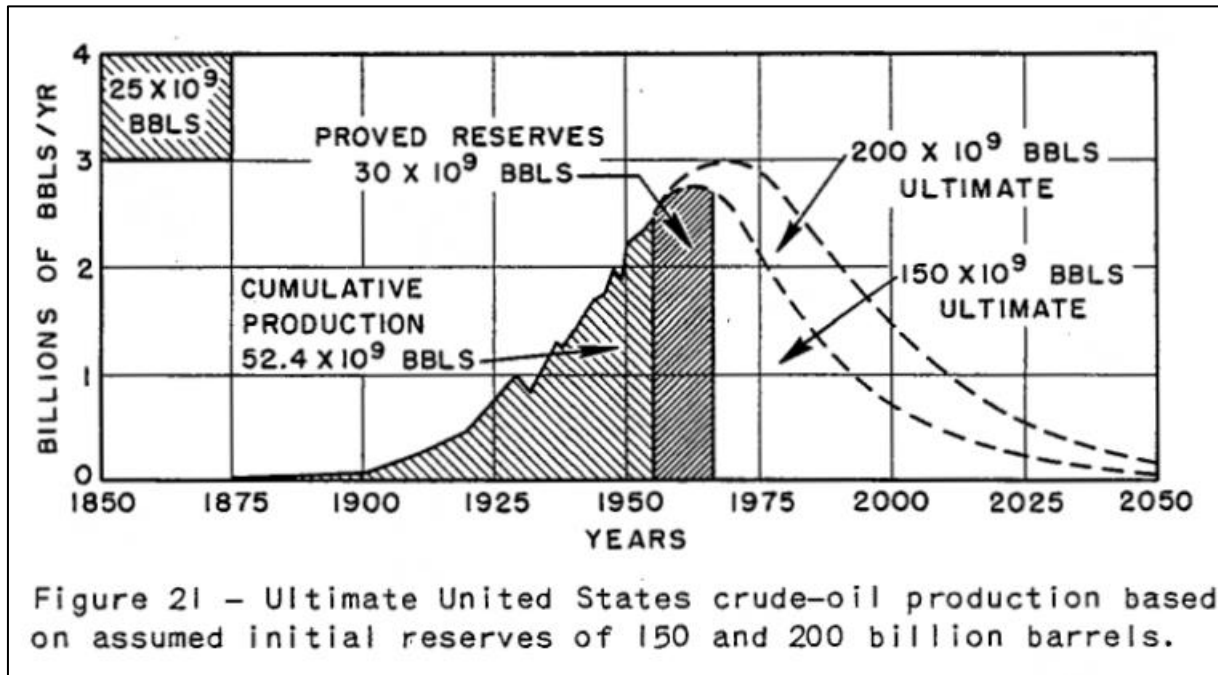
Conclusion fil rouge : Le pétrole est une ressource limitée (partie 1) dont l'extraction et l'utilisation s'avère toujours plus coûteuse (partie 2 et 3) mais dont la demande semble toujours plus forte. Si la fin du pétrole ne vient pas d'un manque de demande faut-il regarder du côté d'un manque d'offre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



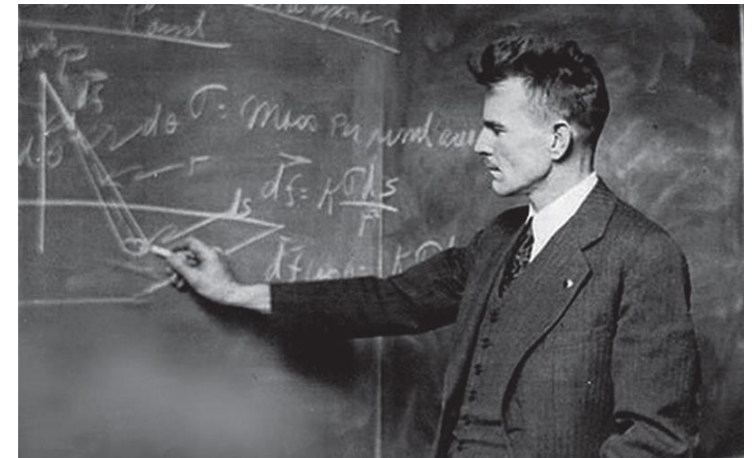
CentraleSupélec

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

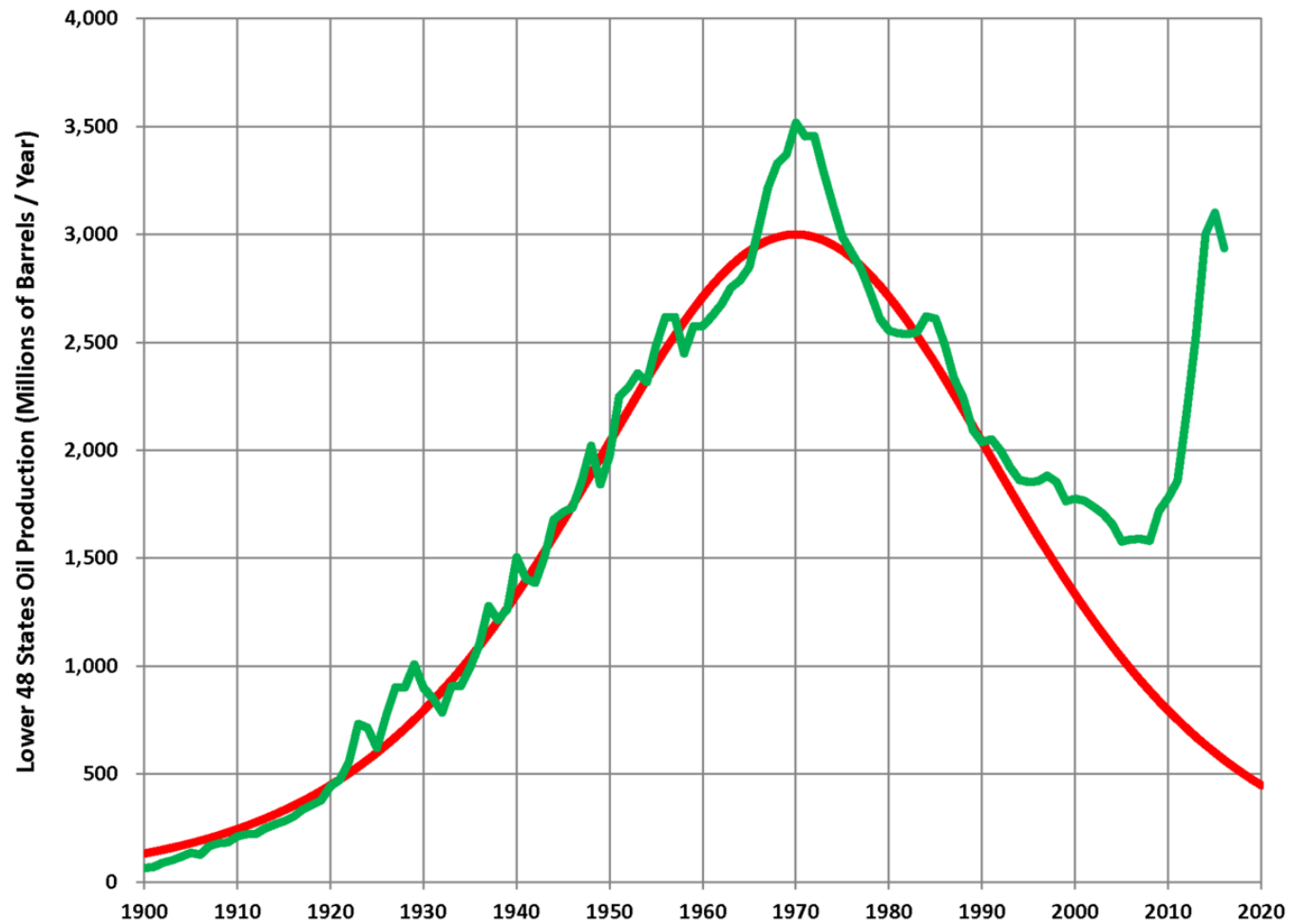
Le débat sur le peak oil



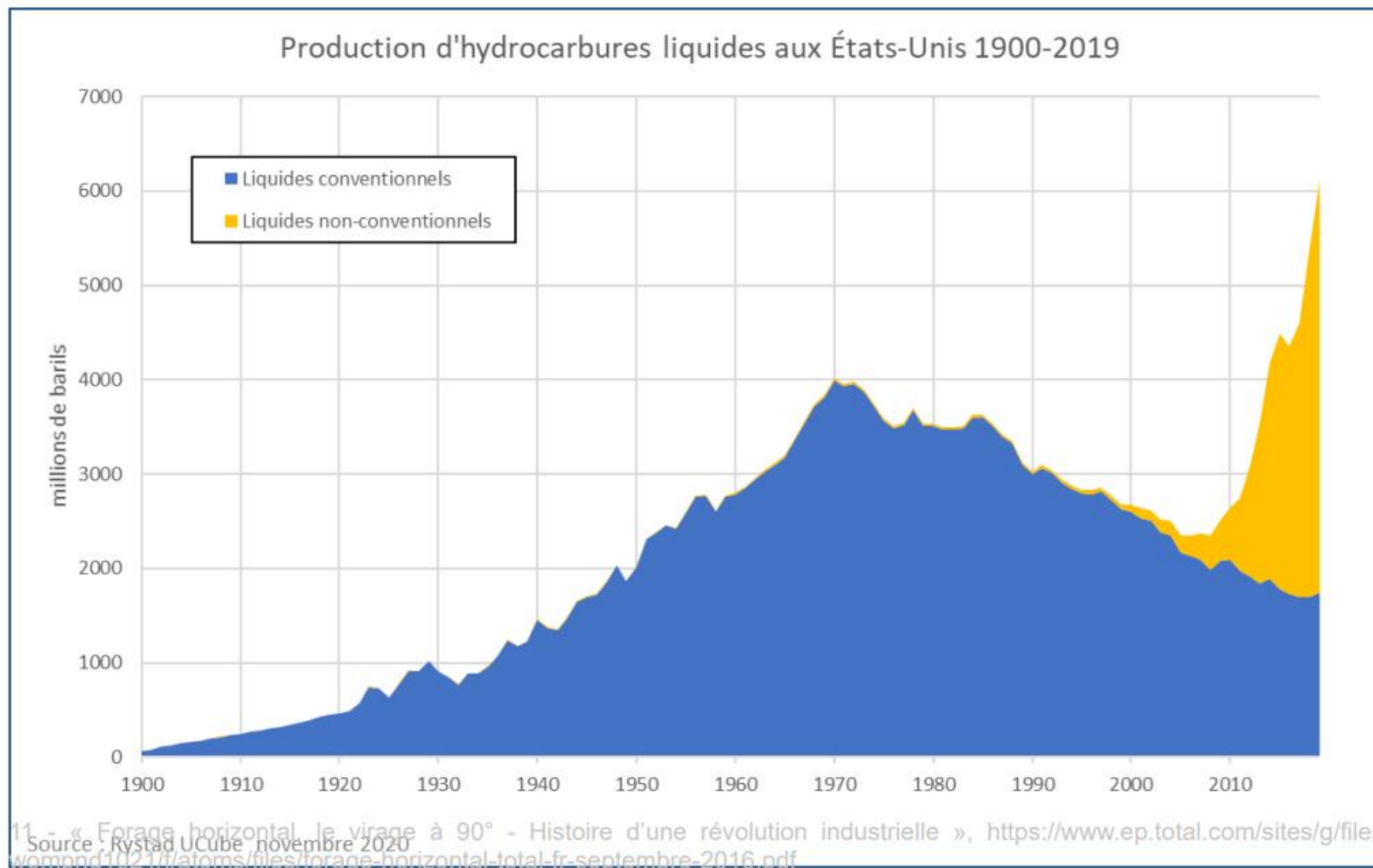
Modèle présenté par King Hubbert en 1956, lors d'un meeting de l'American Petroleum Institute à San Antonio, au Texas,



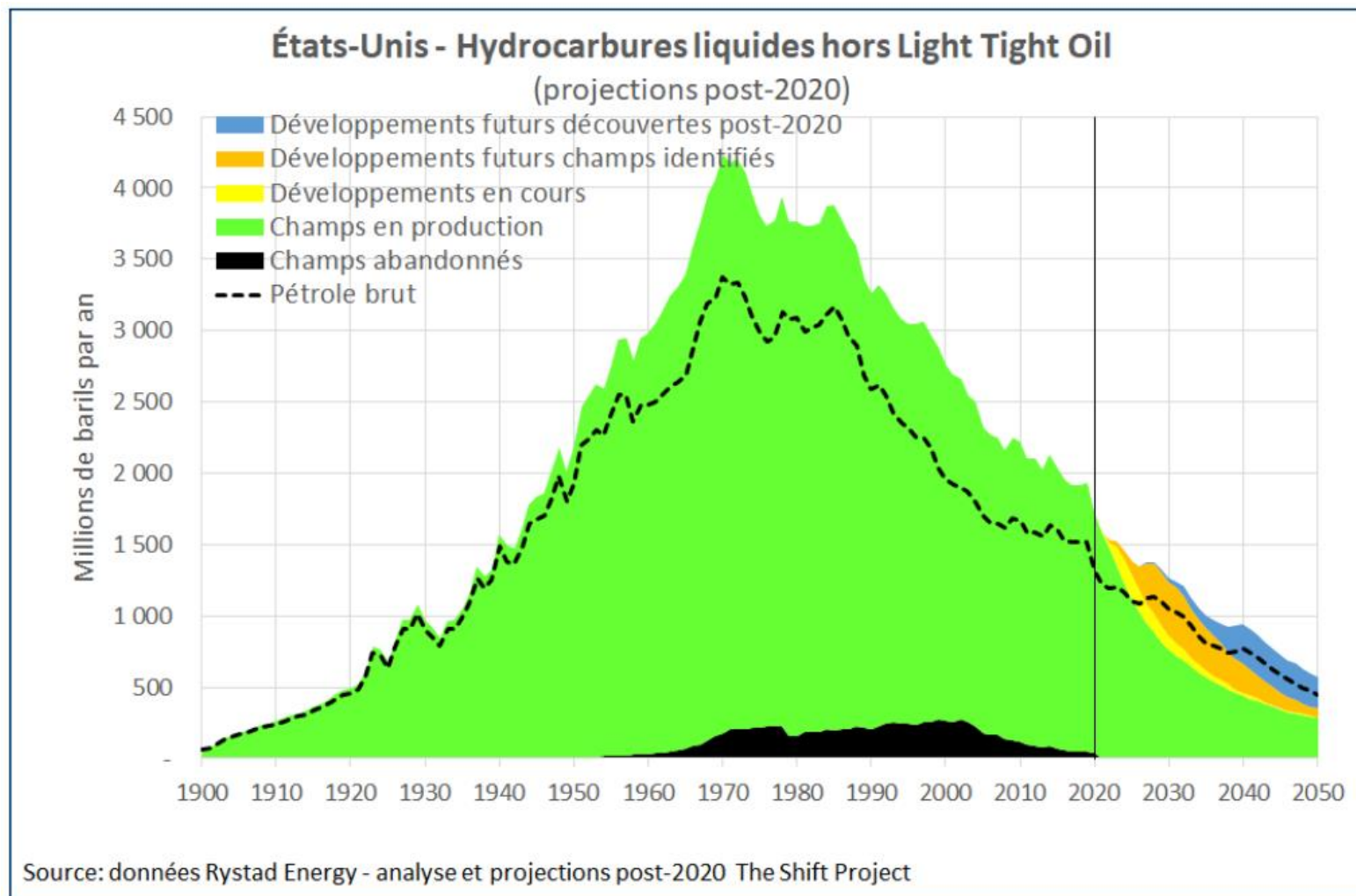
Le débat sur le peak oil



Le débat sur le peak oil



Le débat sur le peak oil

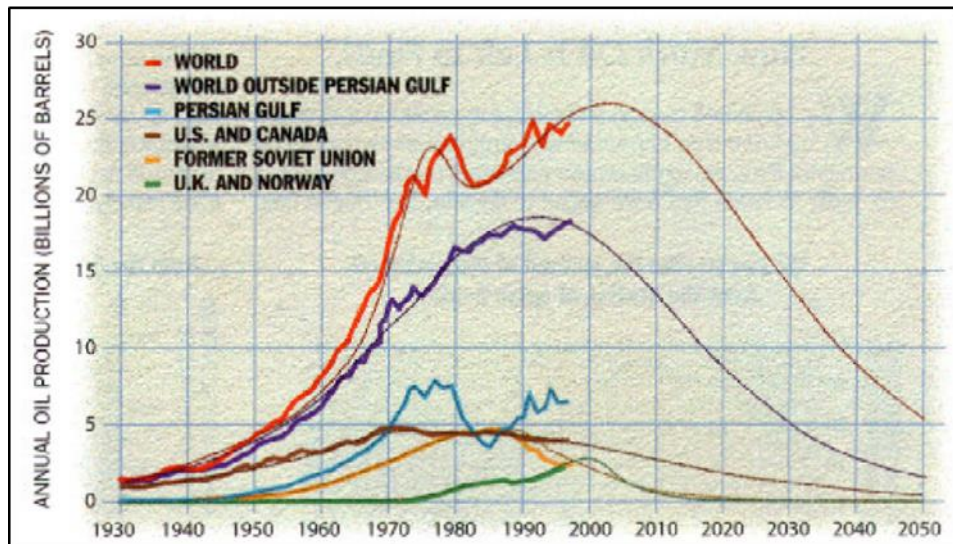


Le débat sur le peak oil

The End of Cheap Oil

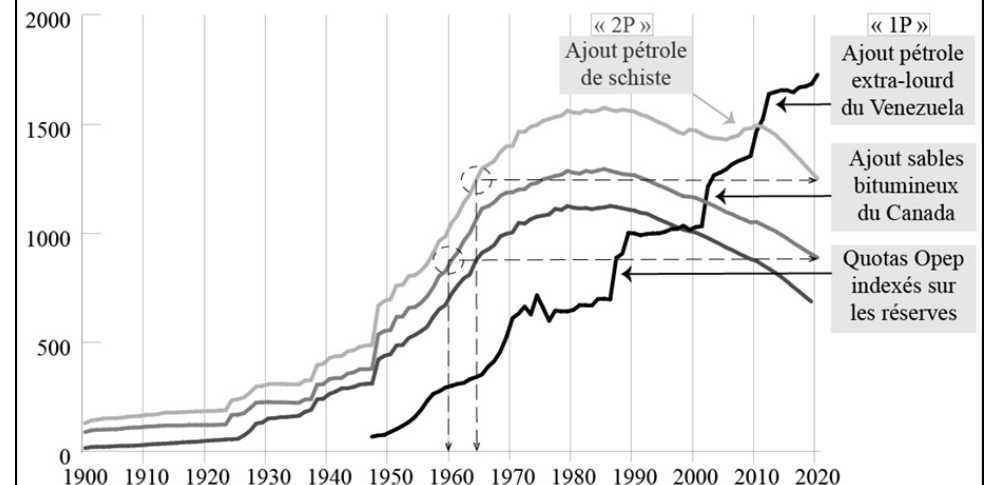
Global production of conventional oil will begin to decline sooner than most people think, probably within 10 years

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 »

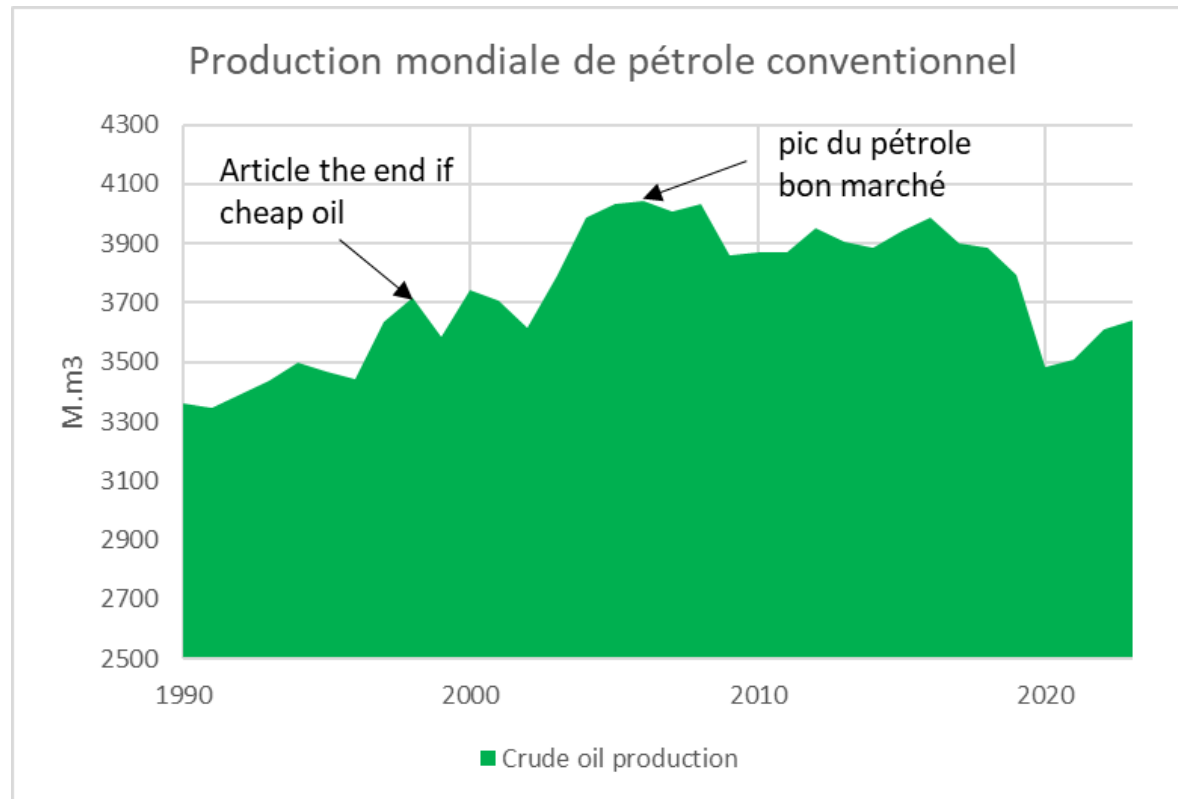
— Pétroles conventionnel et non conventionnels. Source : Rystad Energy, 2020

— Pétrole conventionnel. Source : Rystad Energy, 2020

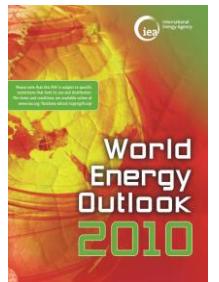
— Pétrole conventionnel. Source : Jean Laherrère 2020 (Petroconsultants, IHS, USDOE, CAPP, API)

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.

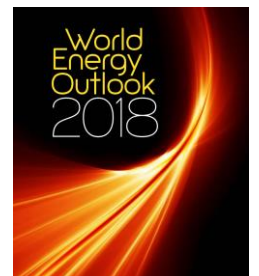
Le débat sur le peak oil



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

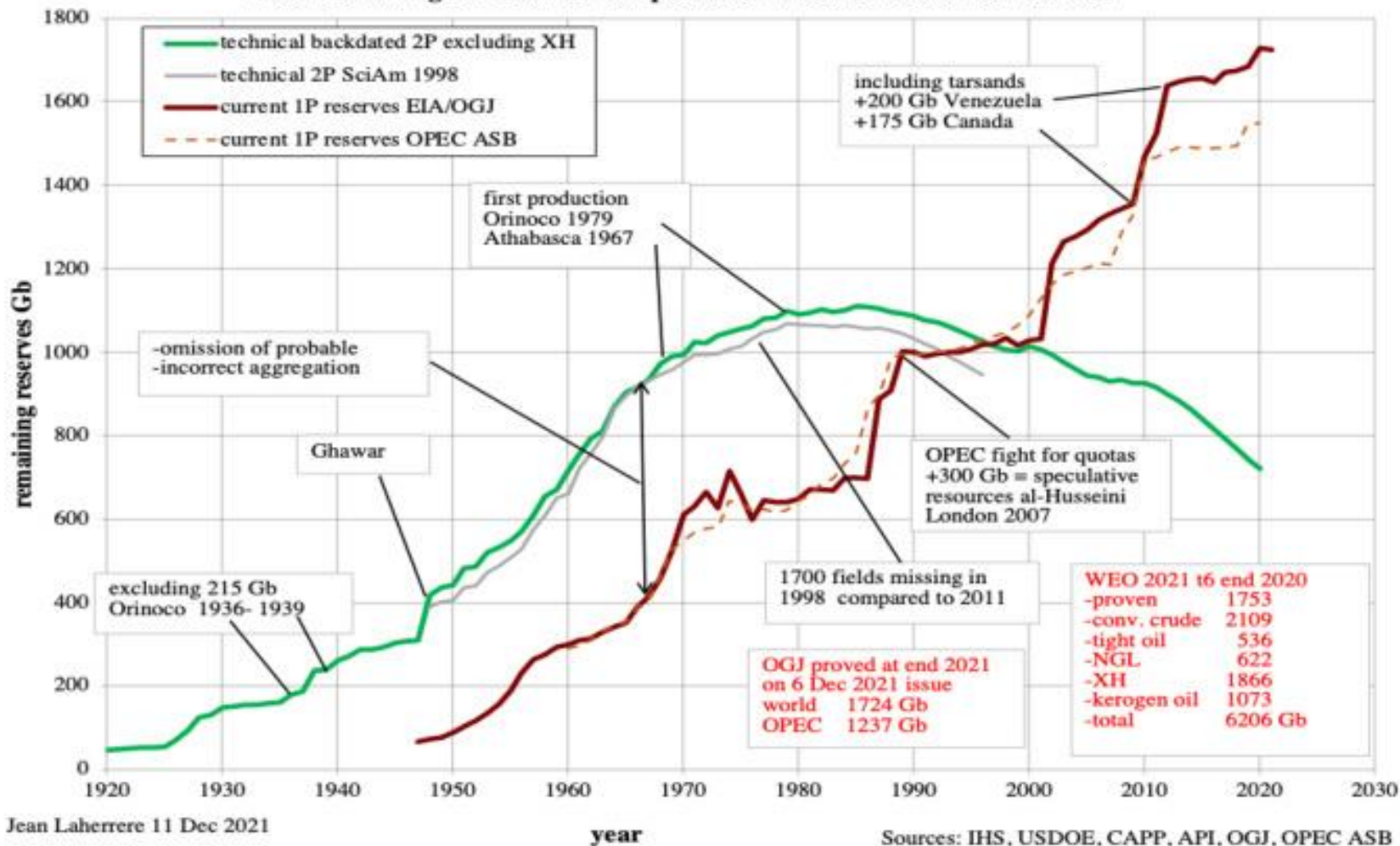


Global conventional crude oil production peaked in 2008 at 69 mb/d and has since fallen by just over 2.5 mb/d. In the New Policies Scenario, it drops by a further 3 mb/d by 2040 and its share in the global supply mix falls from 72% today to 62% in 2040 (Figure 3.6).



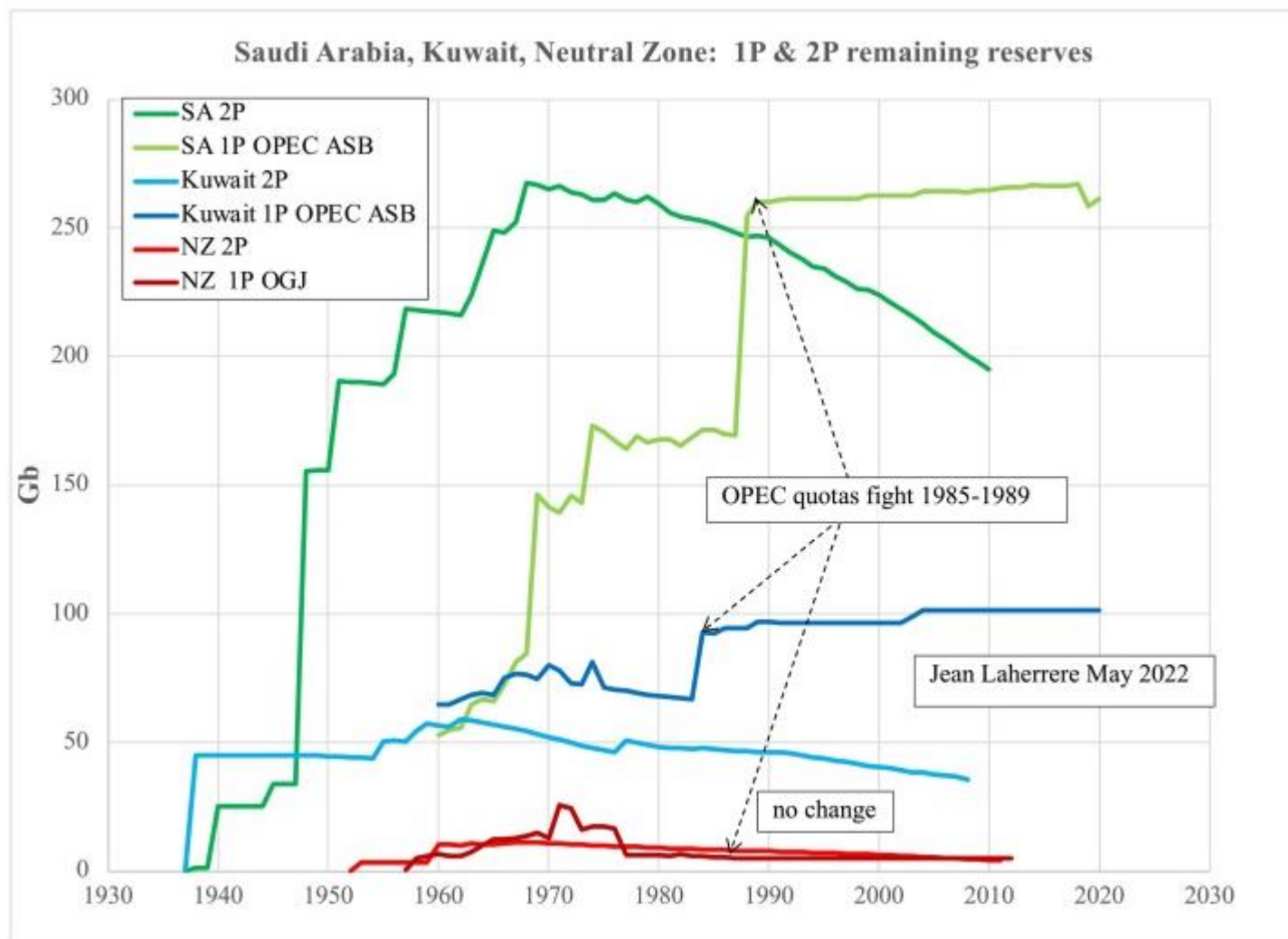
Chiffrer les réserves

World remaining oil reserves from political/financial and technical sources



Chiffres publics vs chiffres techniques

Chiffrer les réserves



Estimation des réserves

Estimation pour un champ :

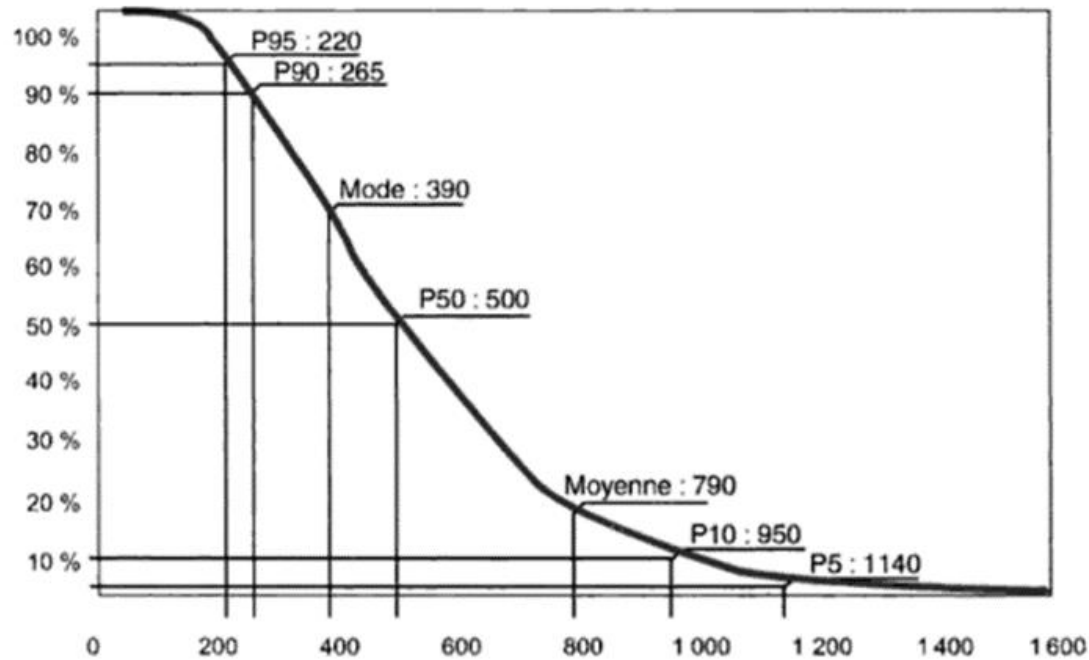


Figure 3.2 Fonction de répartition d'une loi LogNormale modélisant la distribution de la taille d'un champ de pétrole.

Estimation pour un ensemble de champ :

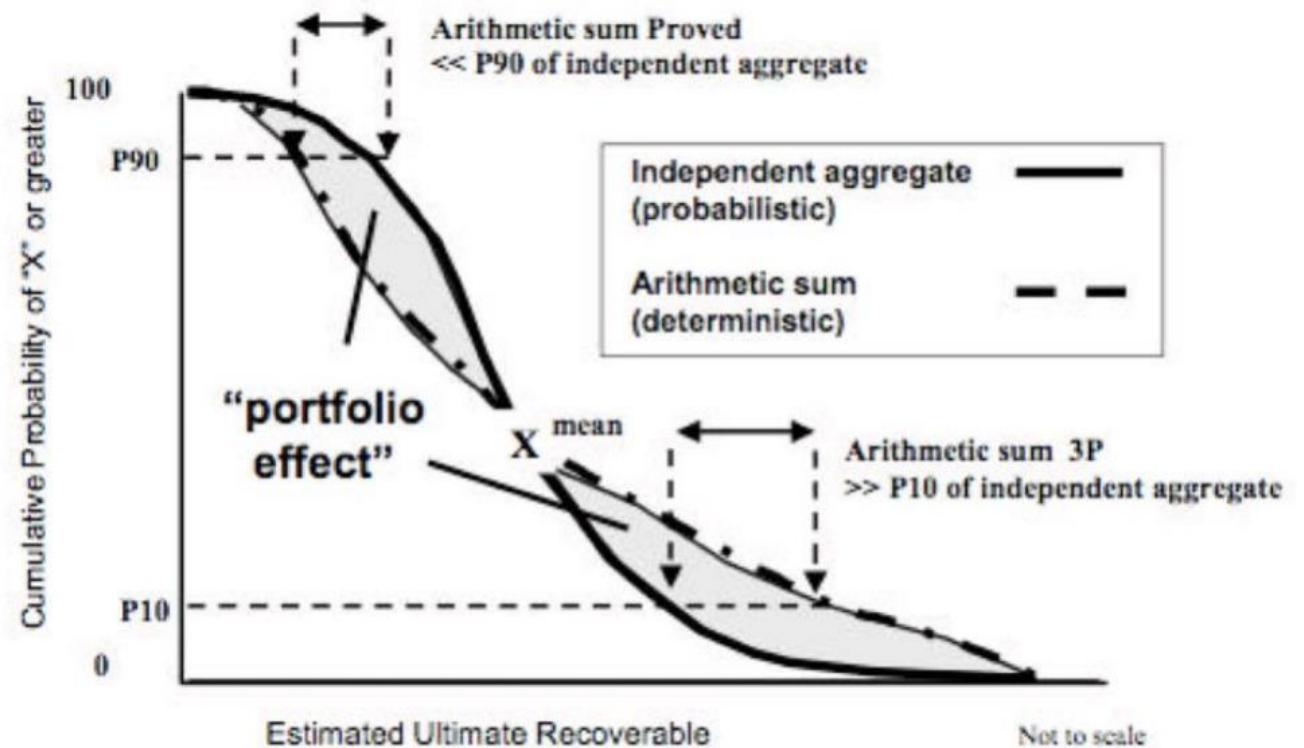
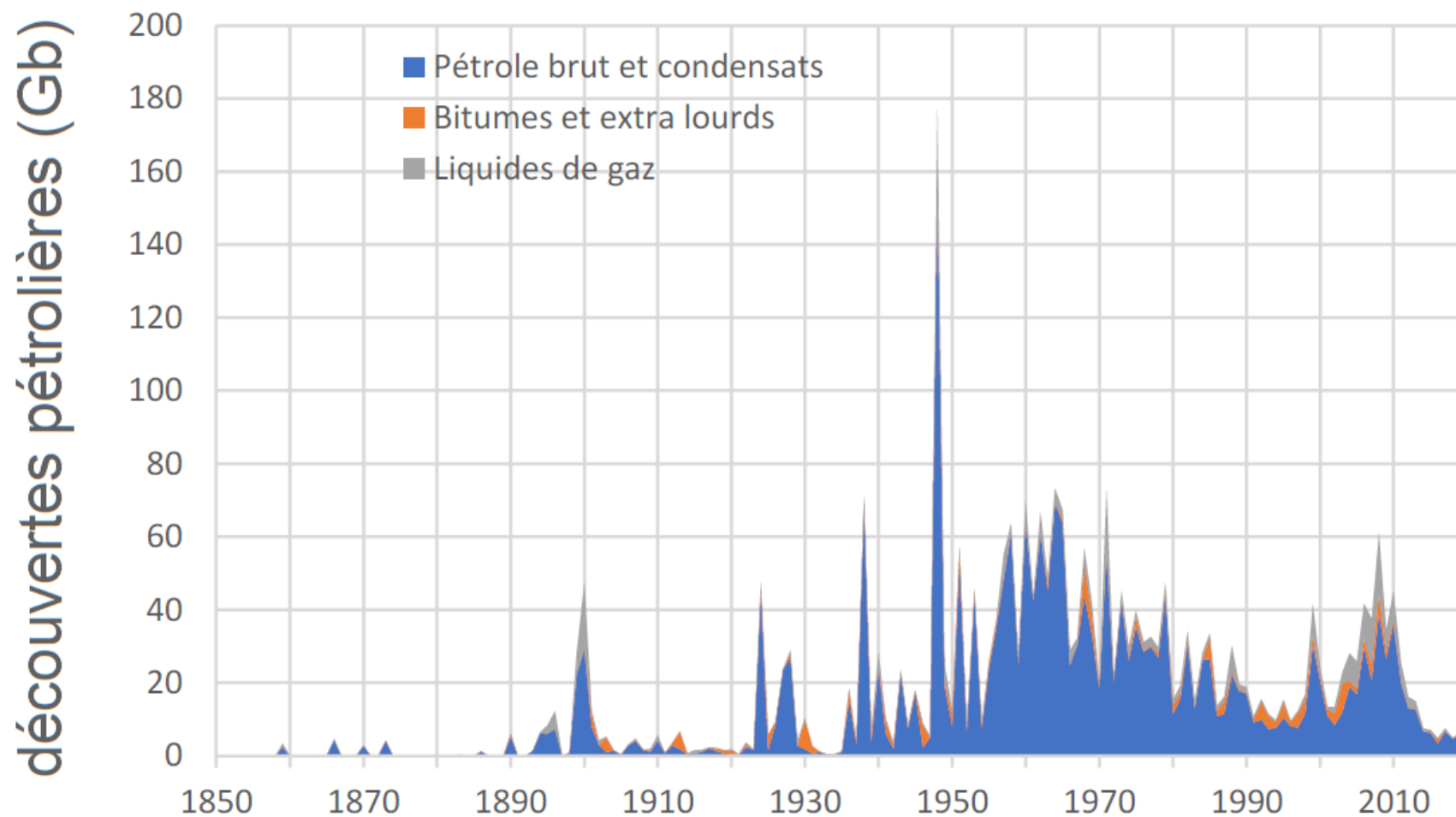


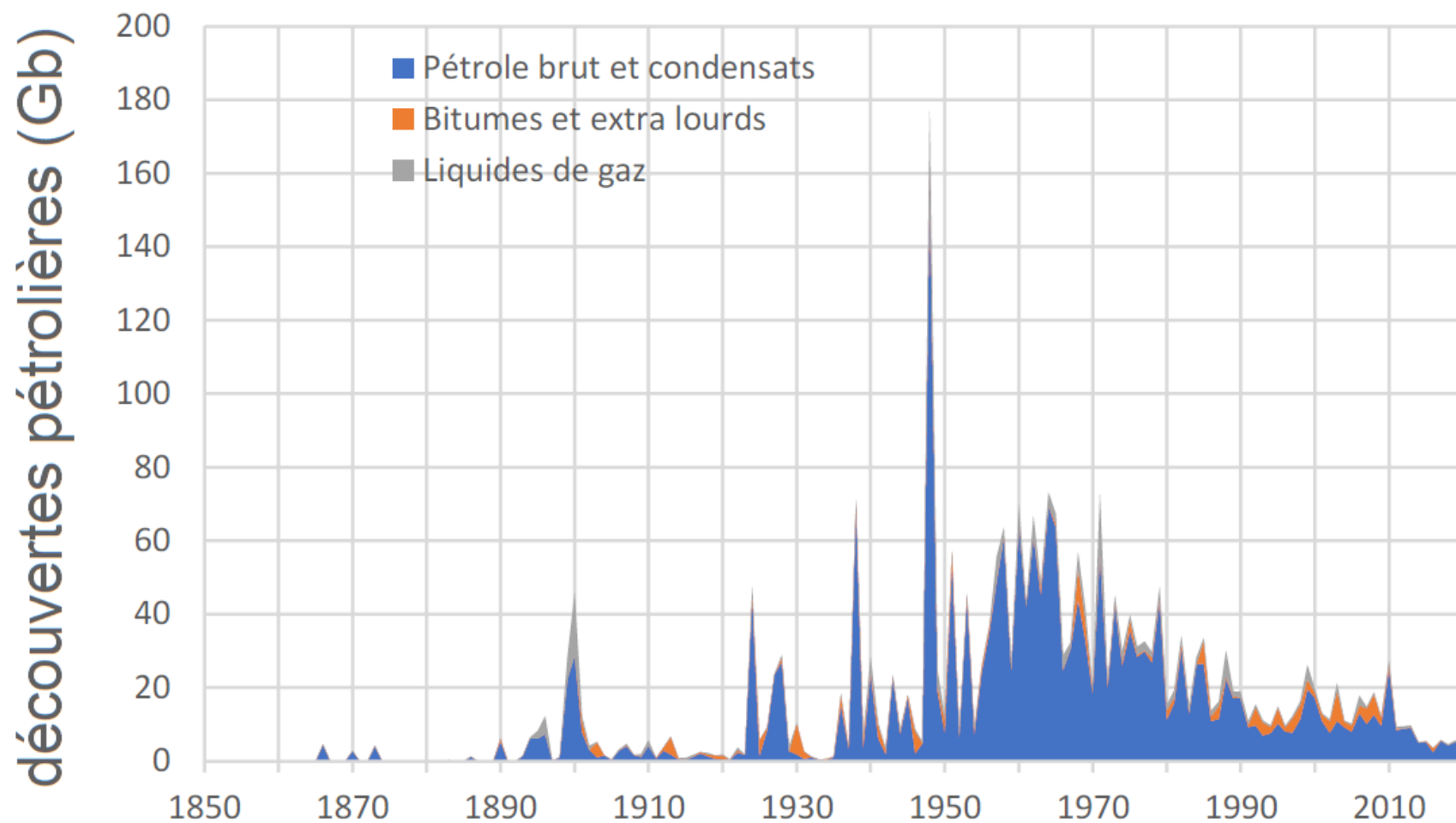
Figure 3-2: Deterministic versus Probabilistic Aggregation

Découvertes 2P en déclin



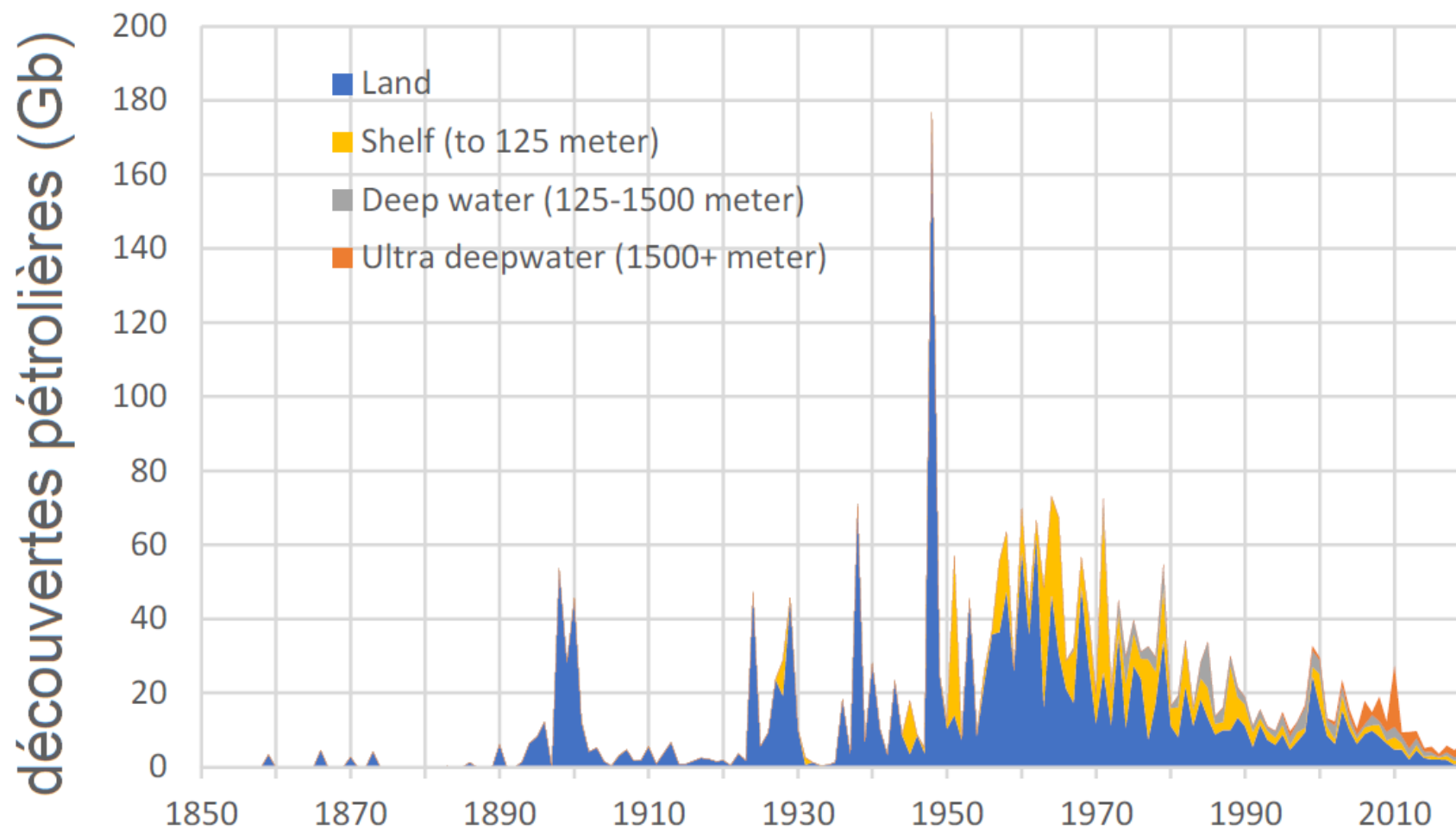
Source : Shift Project d'après Rystad Energy

Découvertes hors LTO



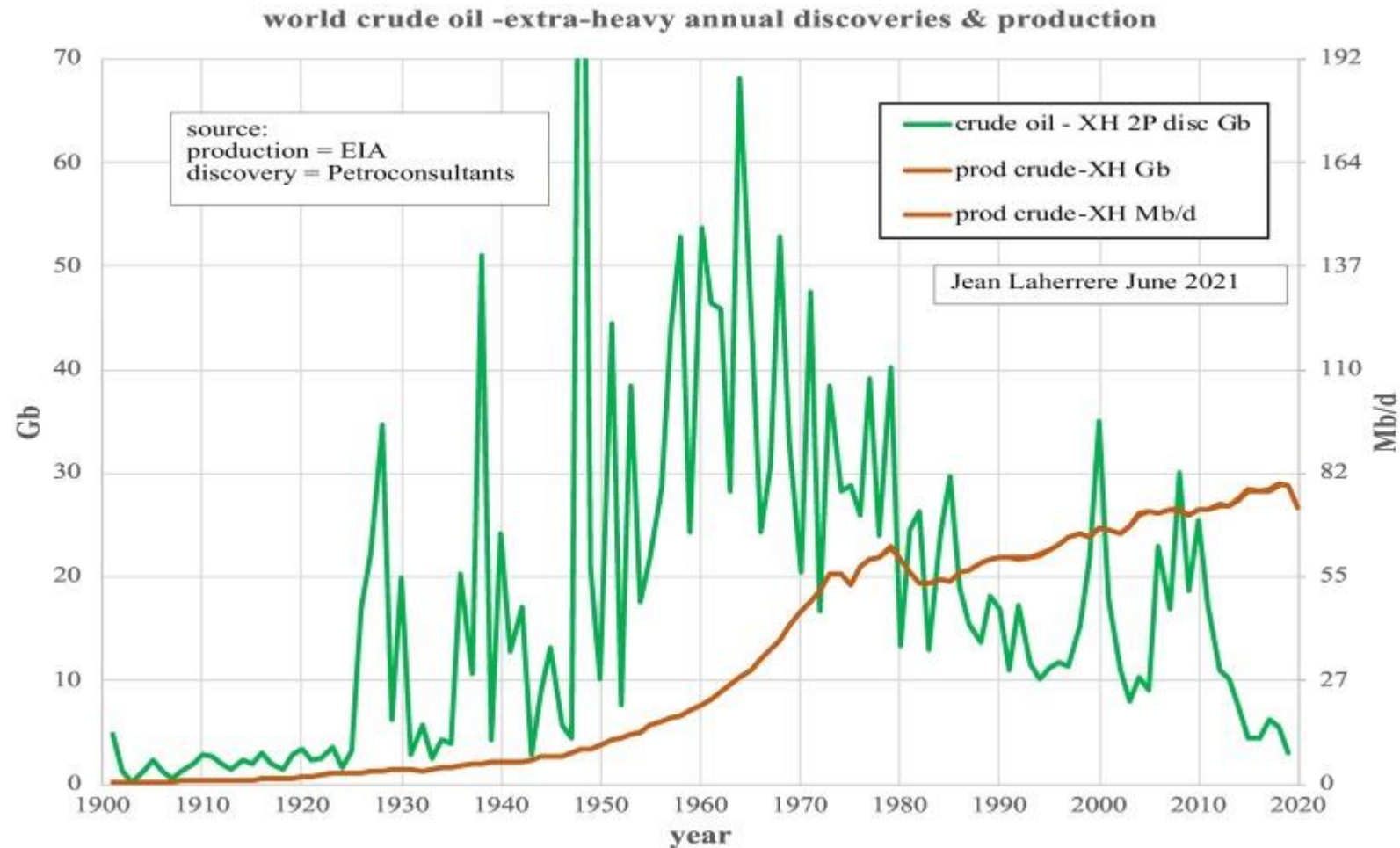
Source : Shift Project d'après Rystad Energy

Découvertes offshore

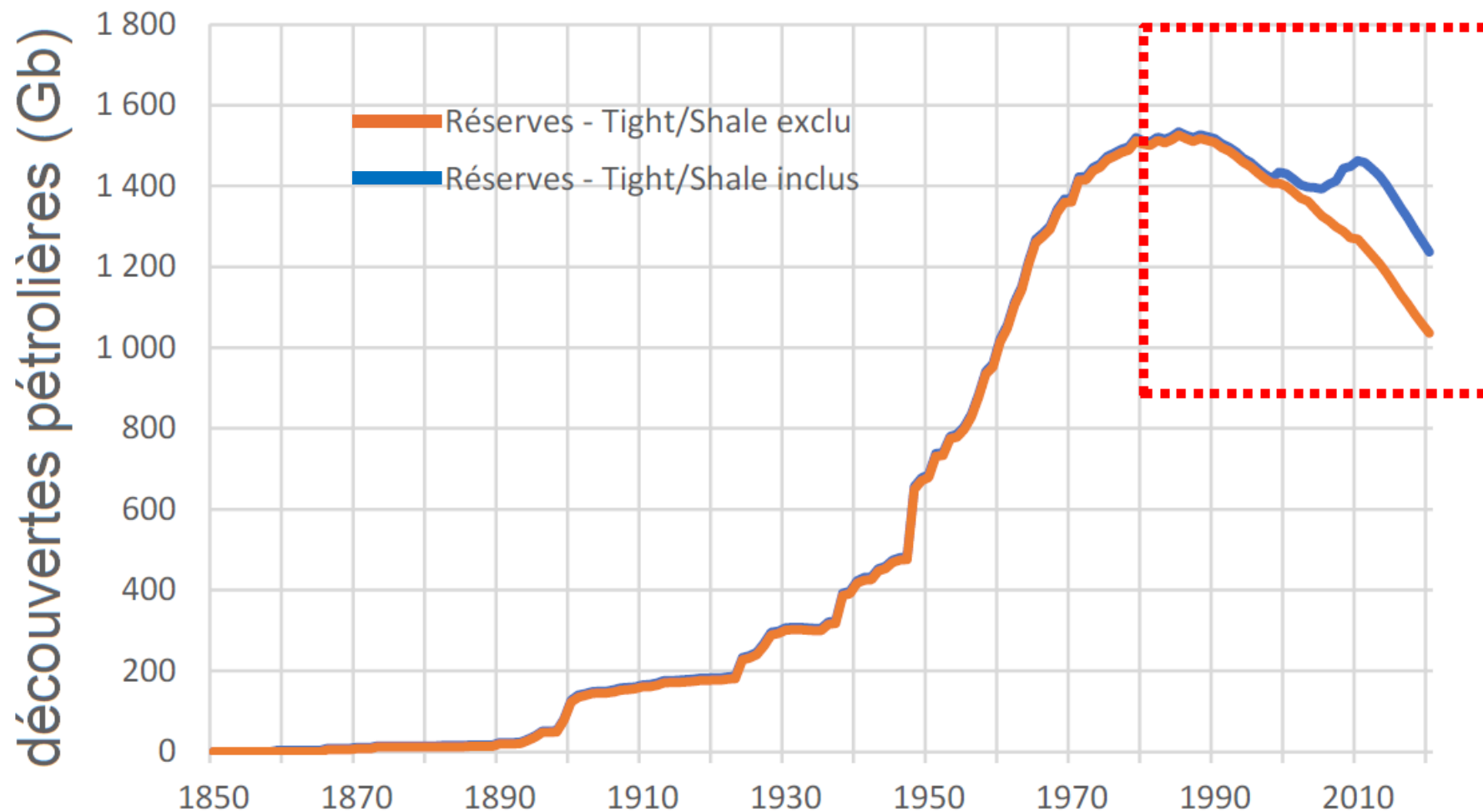


Source : Shift Project d'après Rystad Energy

Croisement découvertes-production



Déclin des réserves



Source : Shift Project d'après Rystad Energy

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 ?



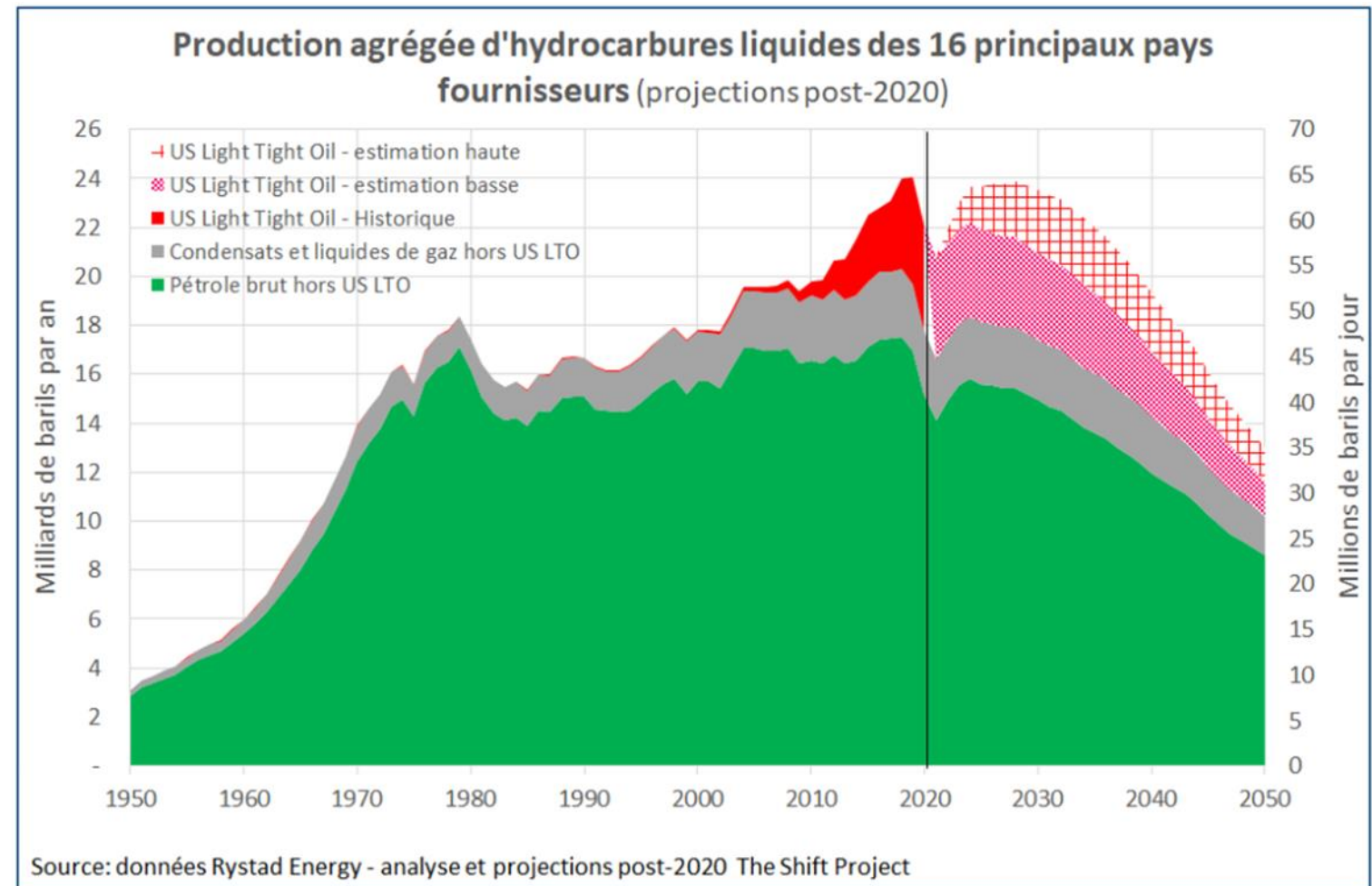
CentraleSupélec

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



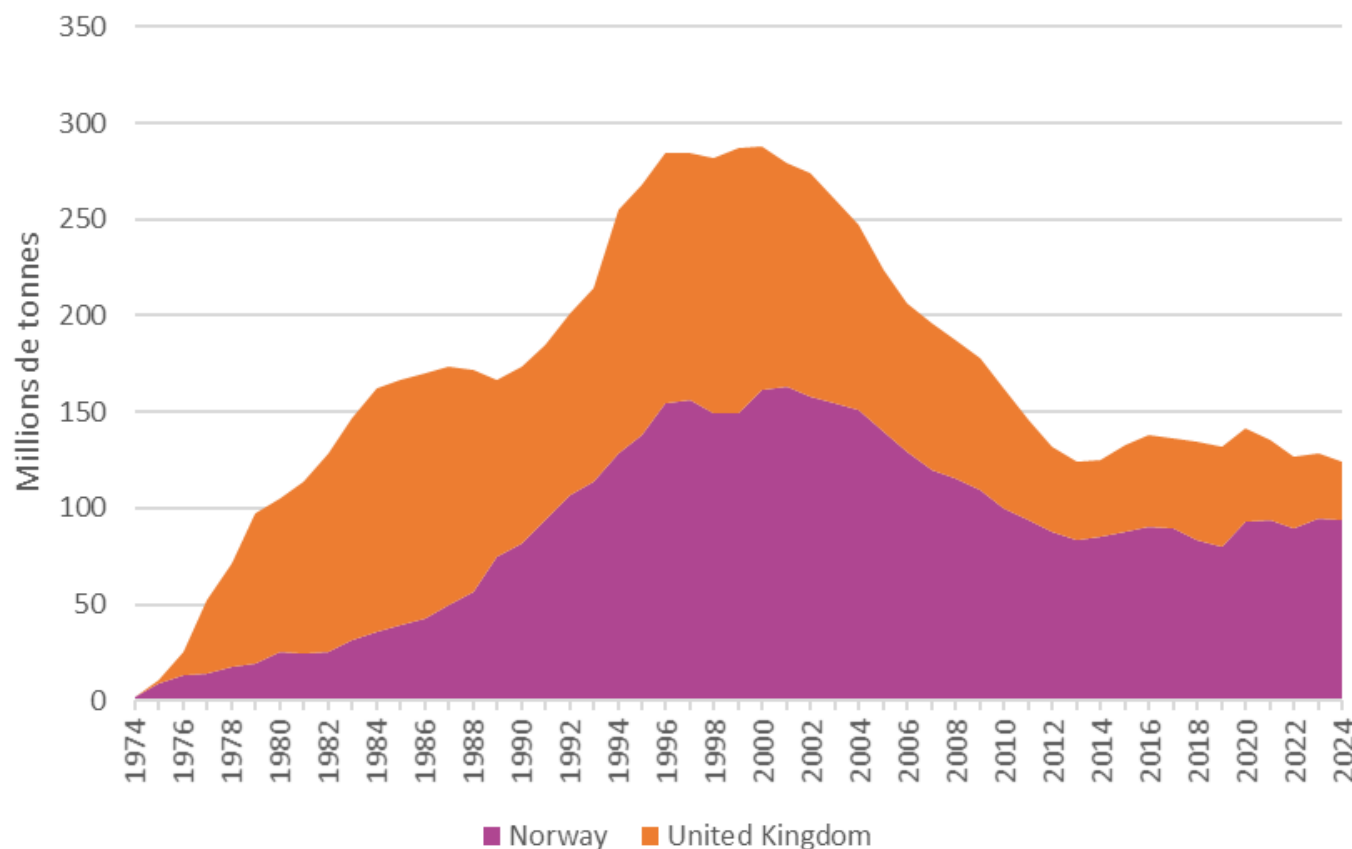
ASPO France

Approvisionnement sous tension

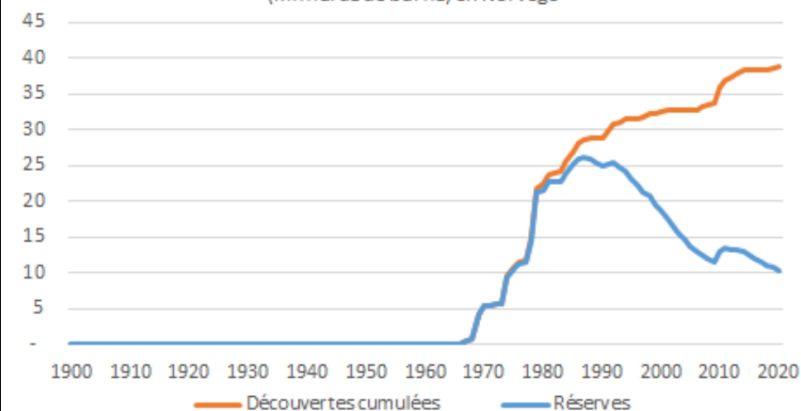


Déclin de la Mer du Nord

Production de pétrole en Mer du Nord

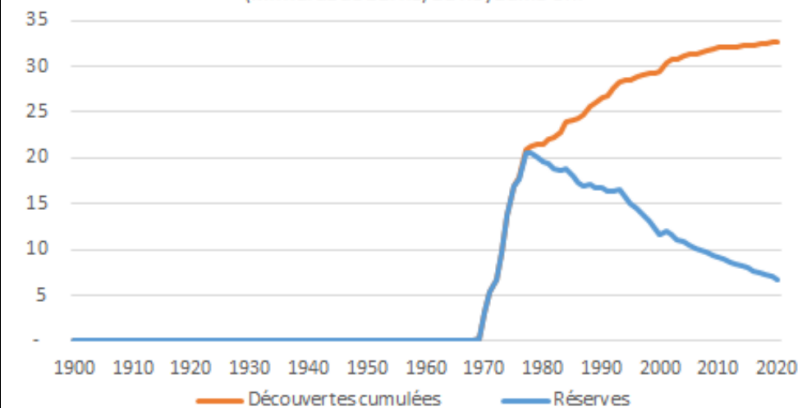


Evolution des découvertes cumulées et des réserves de pétrole brut (milliards de barils) en Norvège



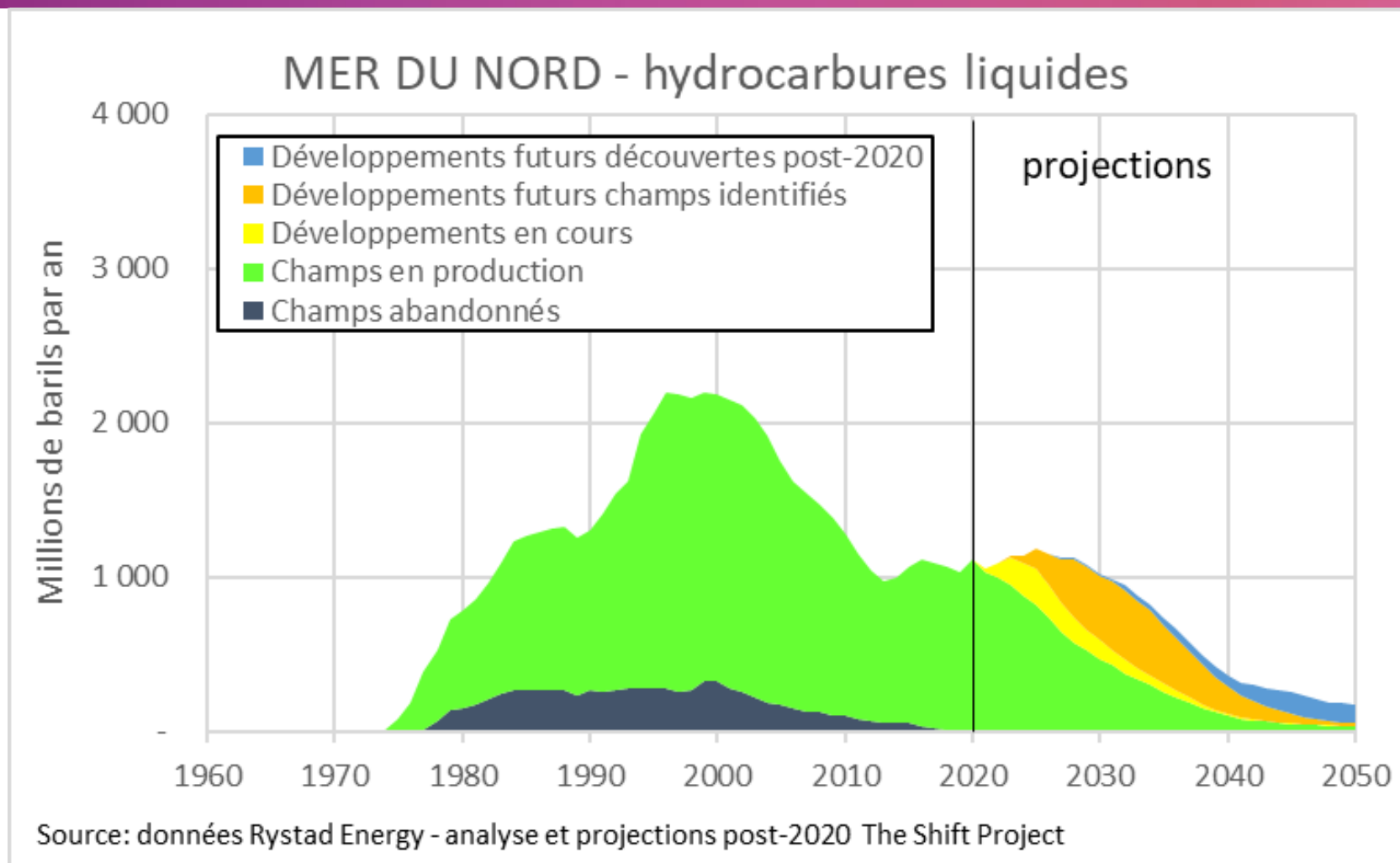
Source: Shift Project d'après Rystad Energy.

Evolution des découvertes cumulées et des réserves de pétrole brut (milliards de barils) au Royaume Uni

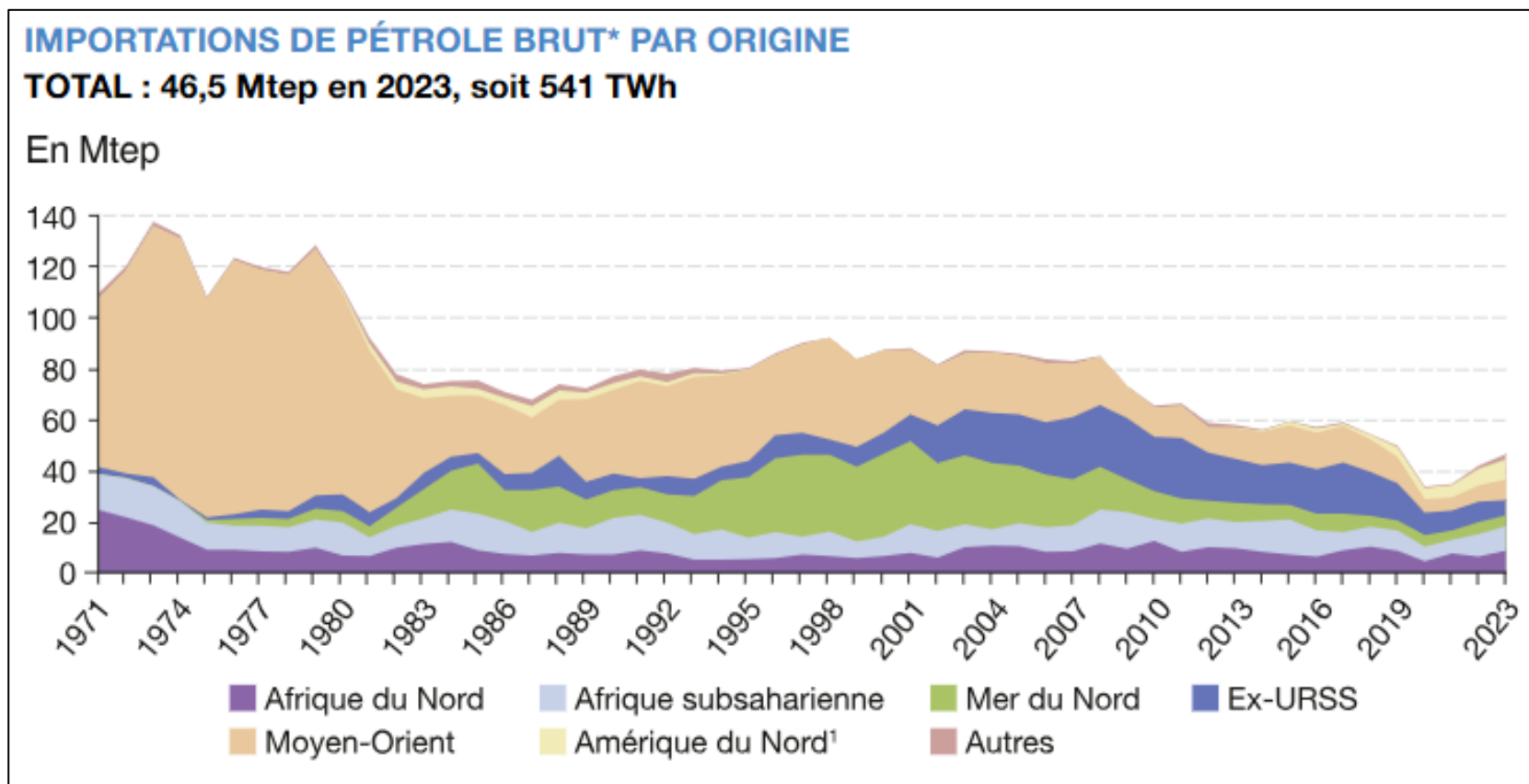


Source: Shift Project d'après Rystad Energy.

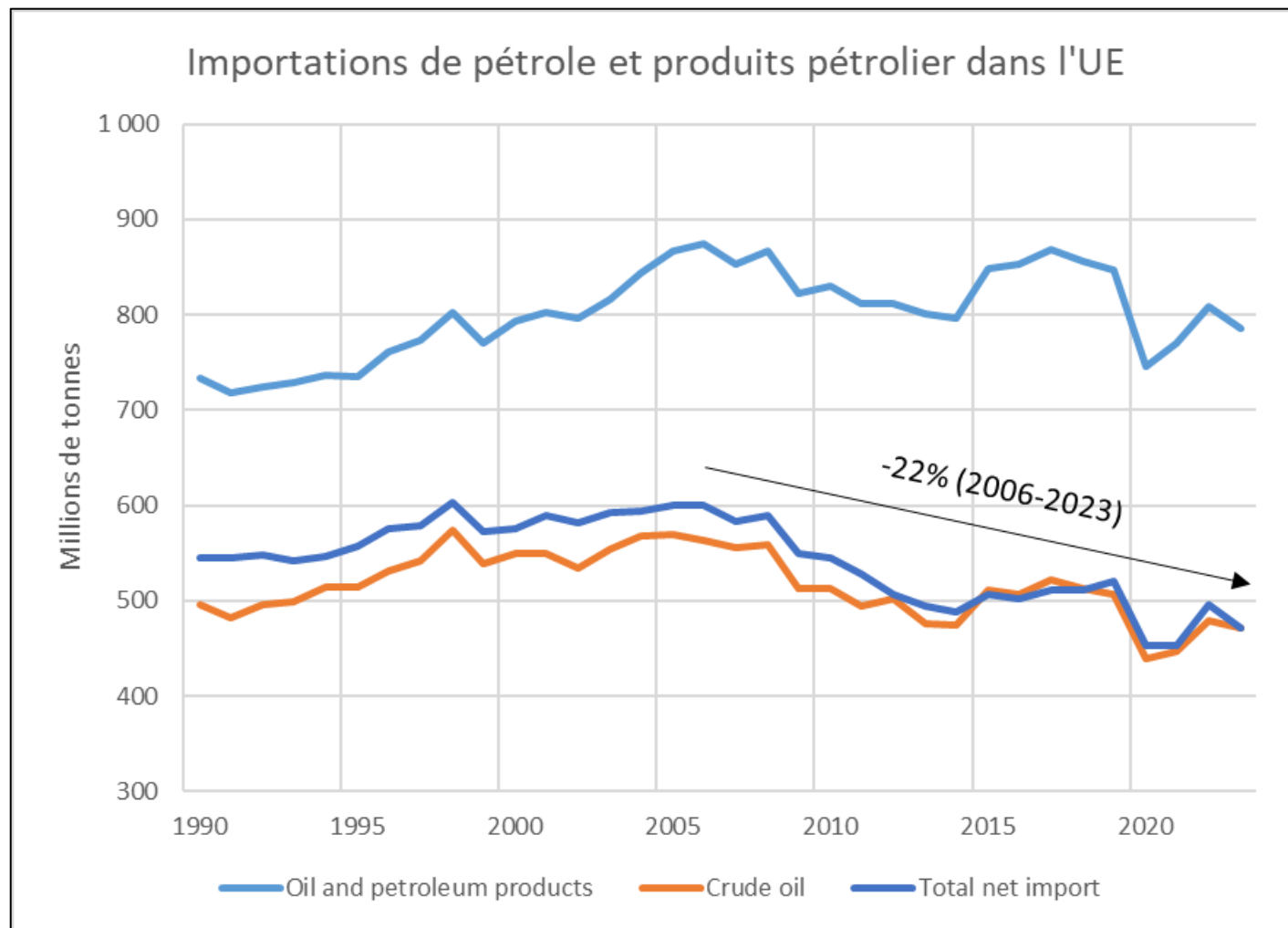
Déclin de la Mer du Nord



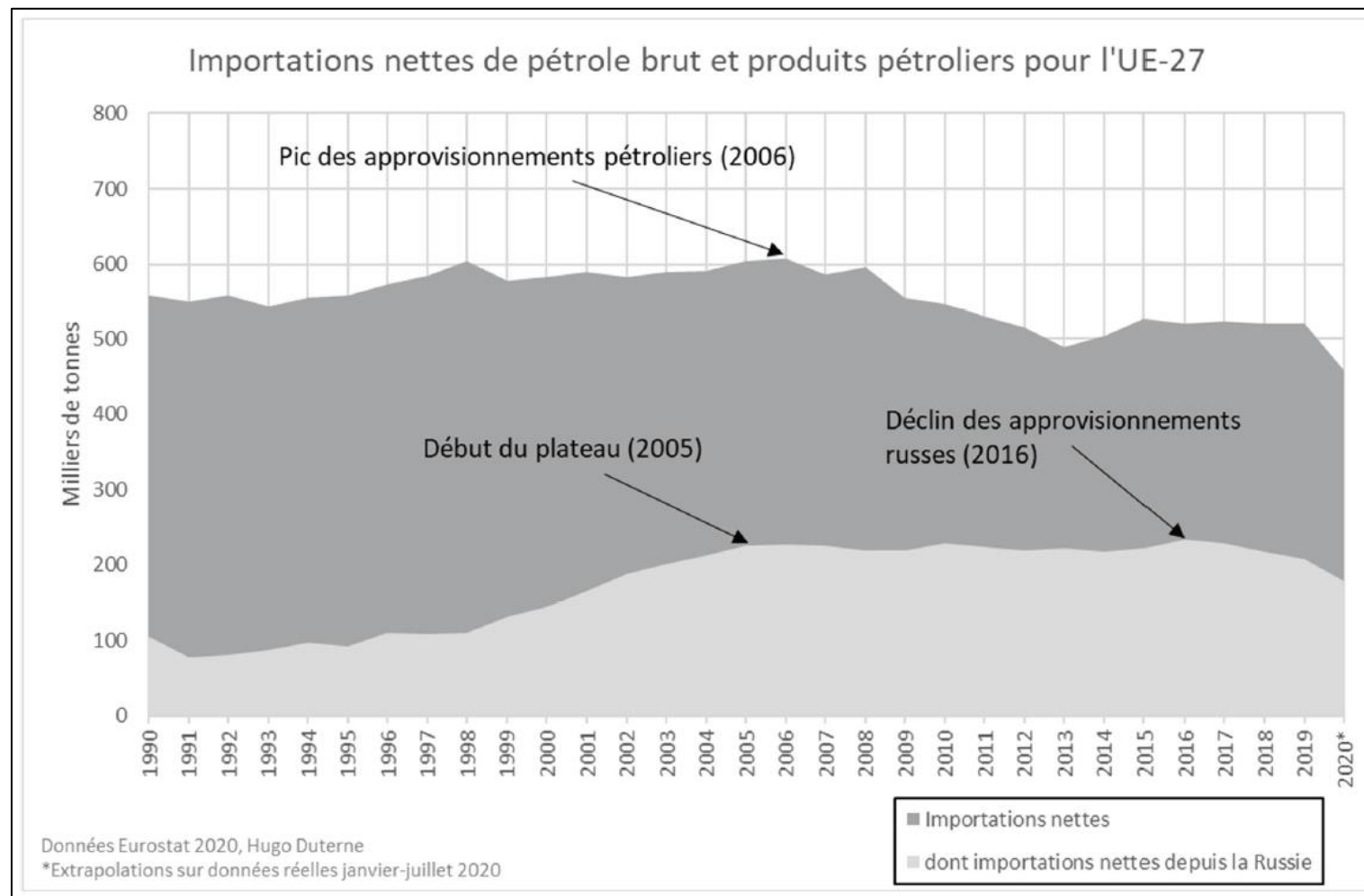
Déclin en mer du nord, déclin russe



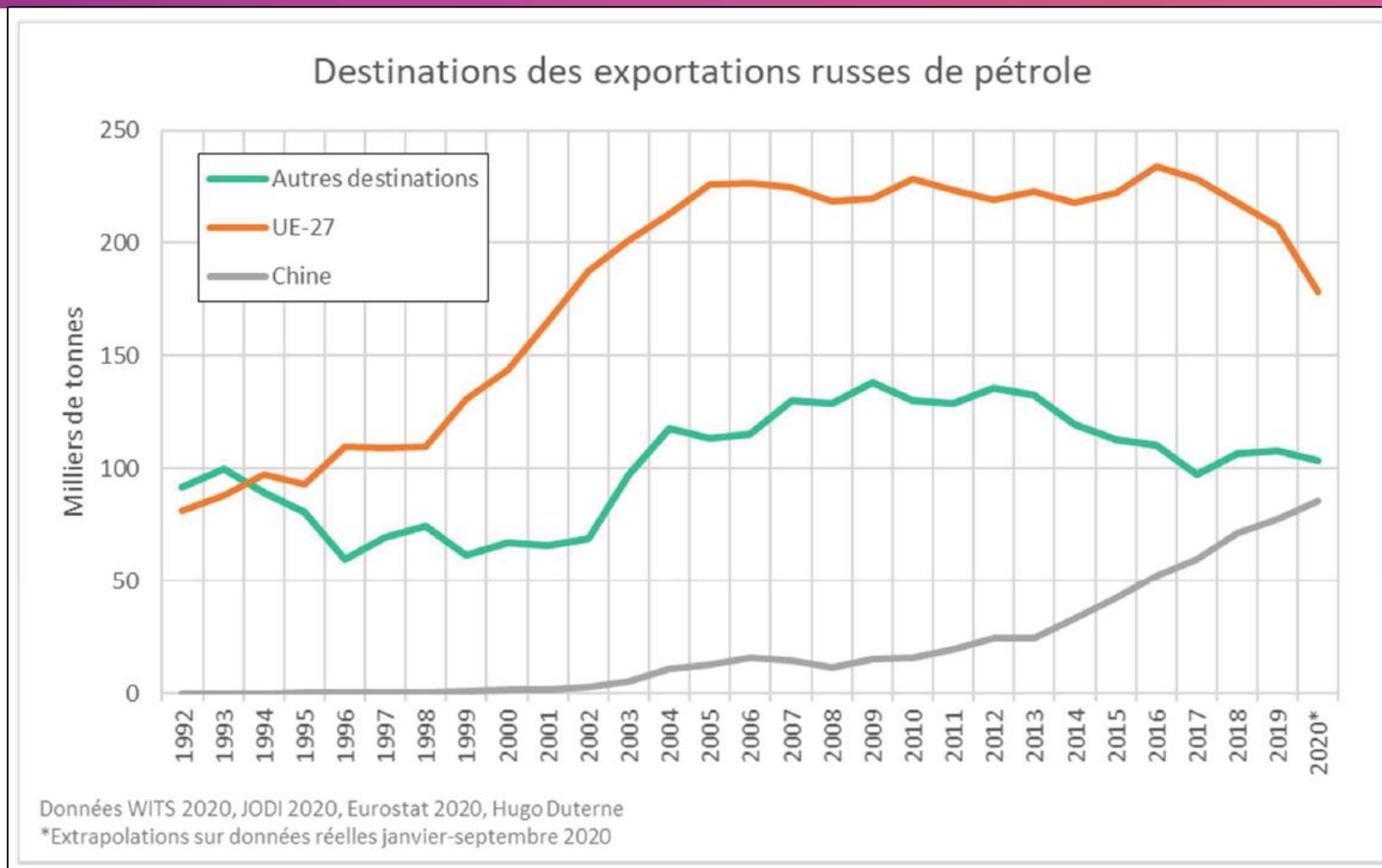
Déclin des imports européens



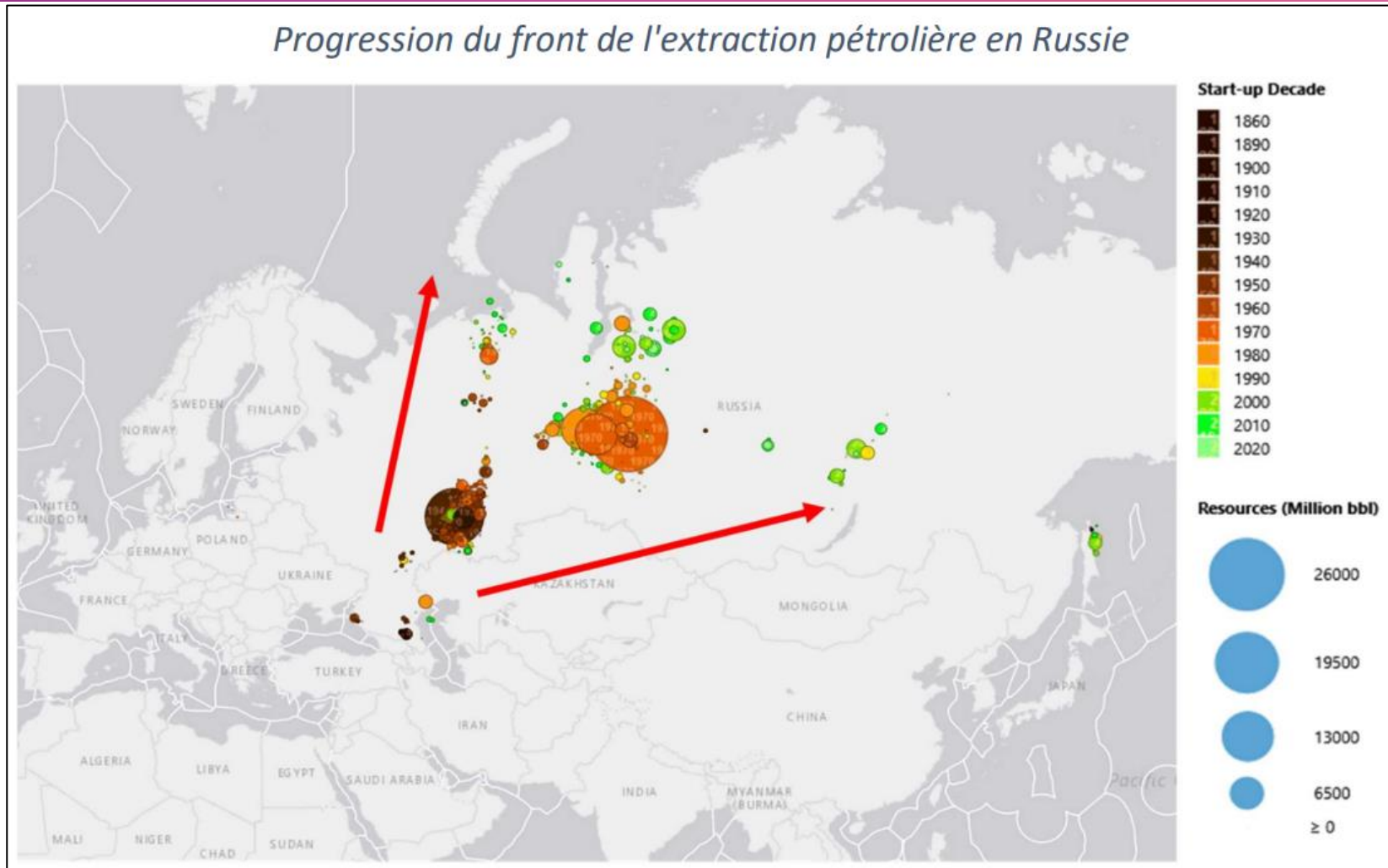
Dépendance au pétrole russe



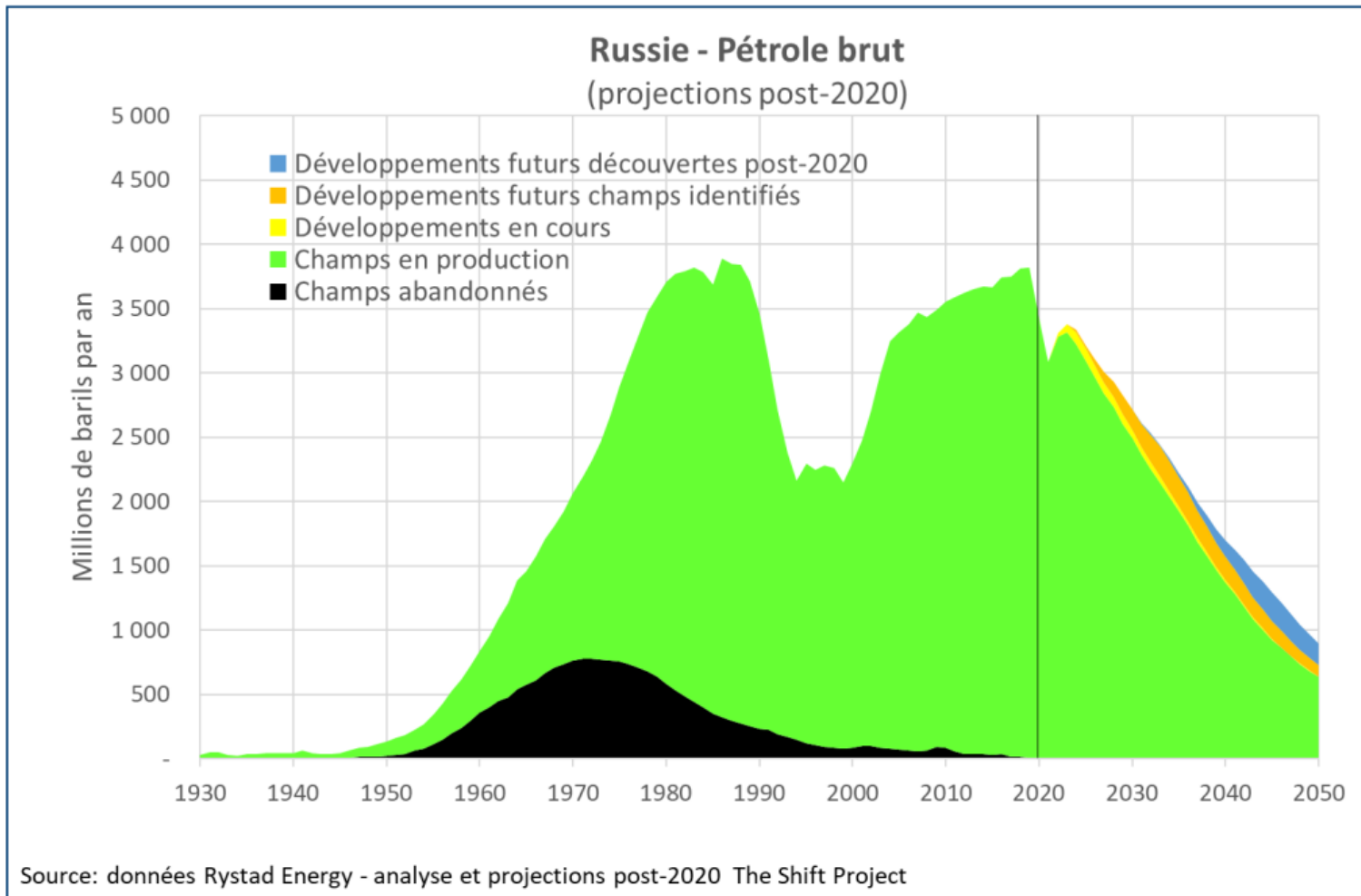
Dépendance au pétrole russe



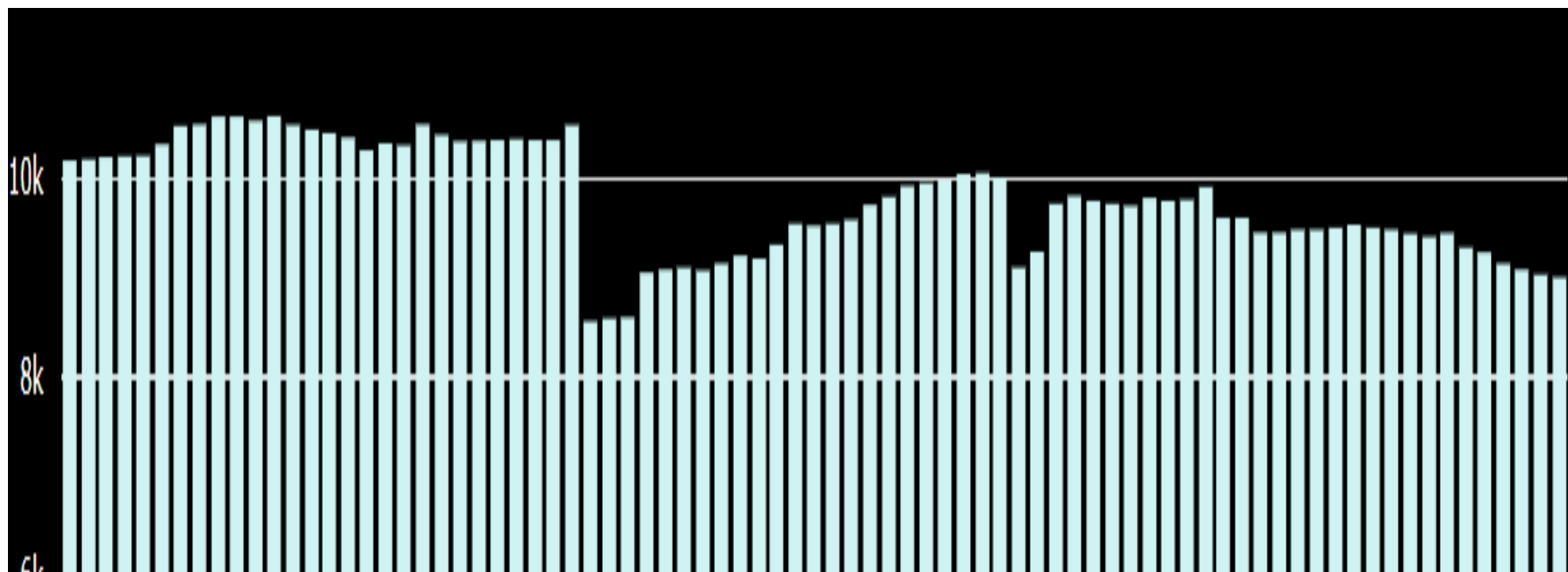
Front pétrolier ouest-est



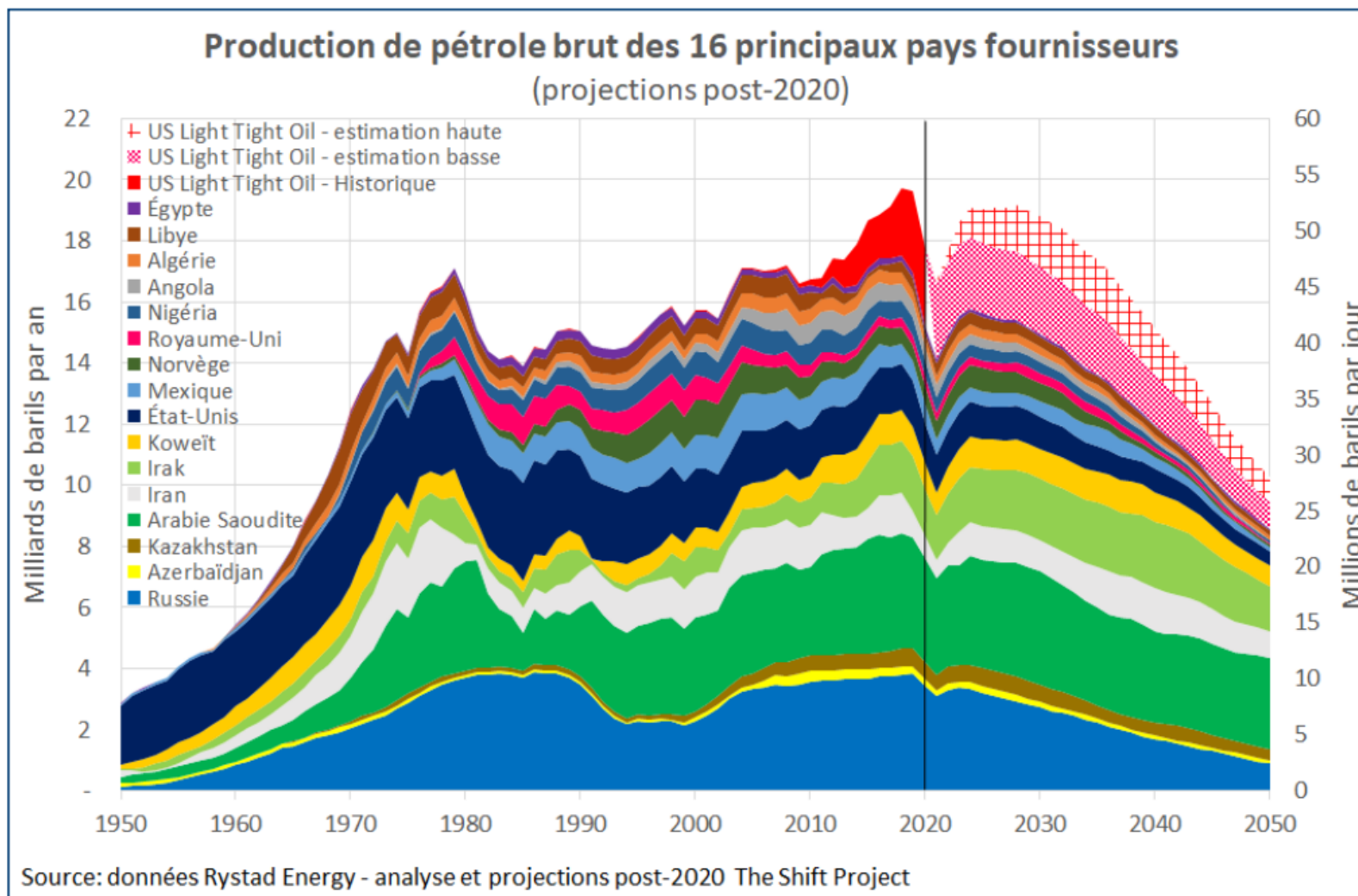
Evolution de la production russe



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



CentraleSupélec

MASTER MANAGEMENT MARCHÉS DE L'ENERGIE - SÉMINAIRE PETROLE

Fondamentaux, passé et perspectives

Hugo DUTERNE – Economiste, membre d'ASPO France

hduterne@outlook.fr

1^{er} avril 2025

