

Plan

- I. Un changement de la chimie de l'atmosphère sans précédent.
- II. L'origine du CO₂ en excès
- III. La séquestration océanique du C
- IV. La séquestration continentale
- V. Le cycle du carbone perturbé et les prévisions.
- Que faire ???????

Bilan, l'homme a modifié le cycle du carbone.

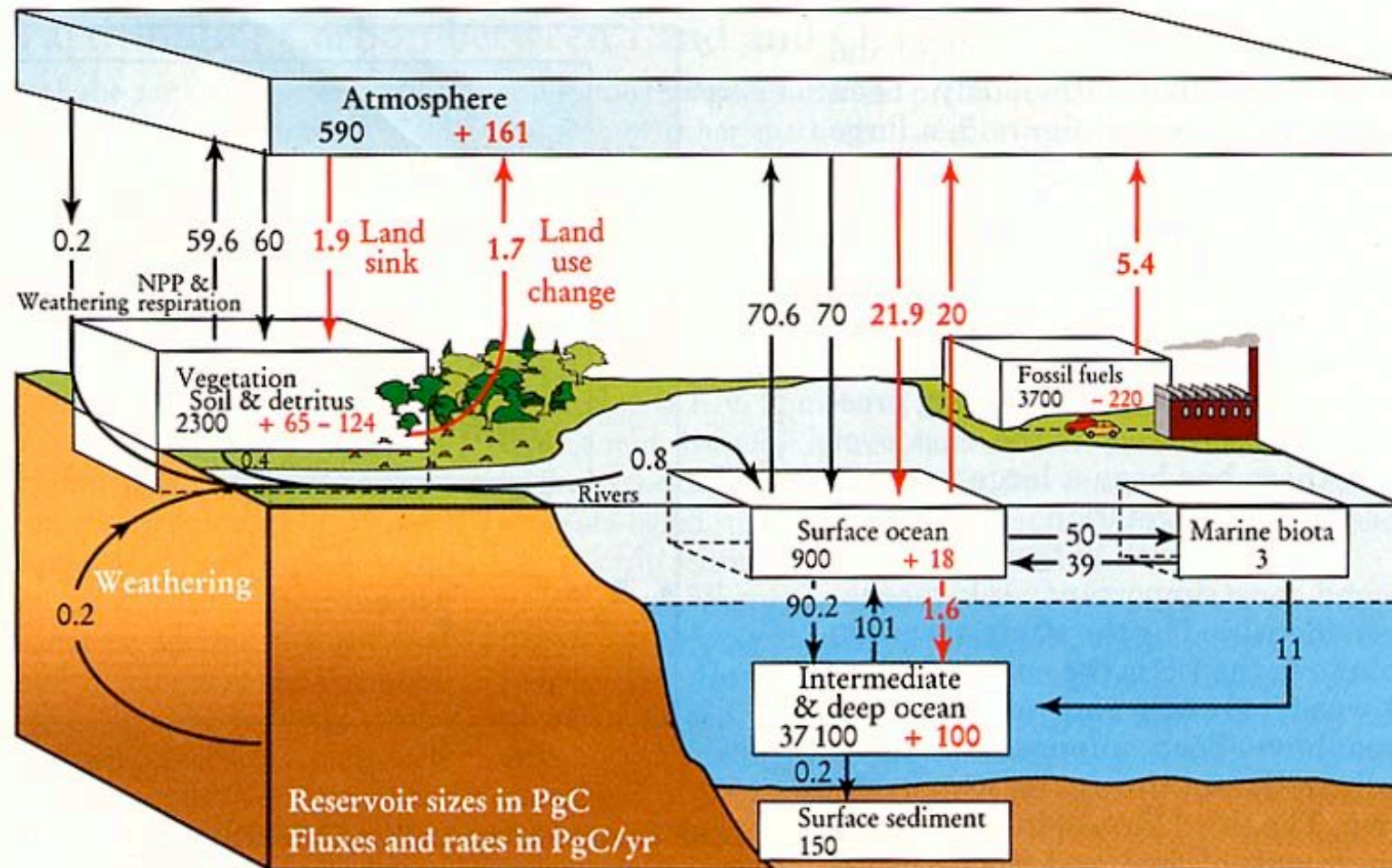
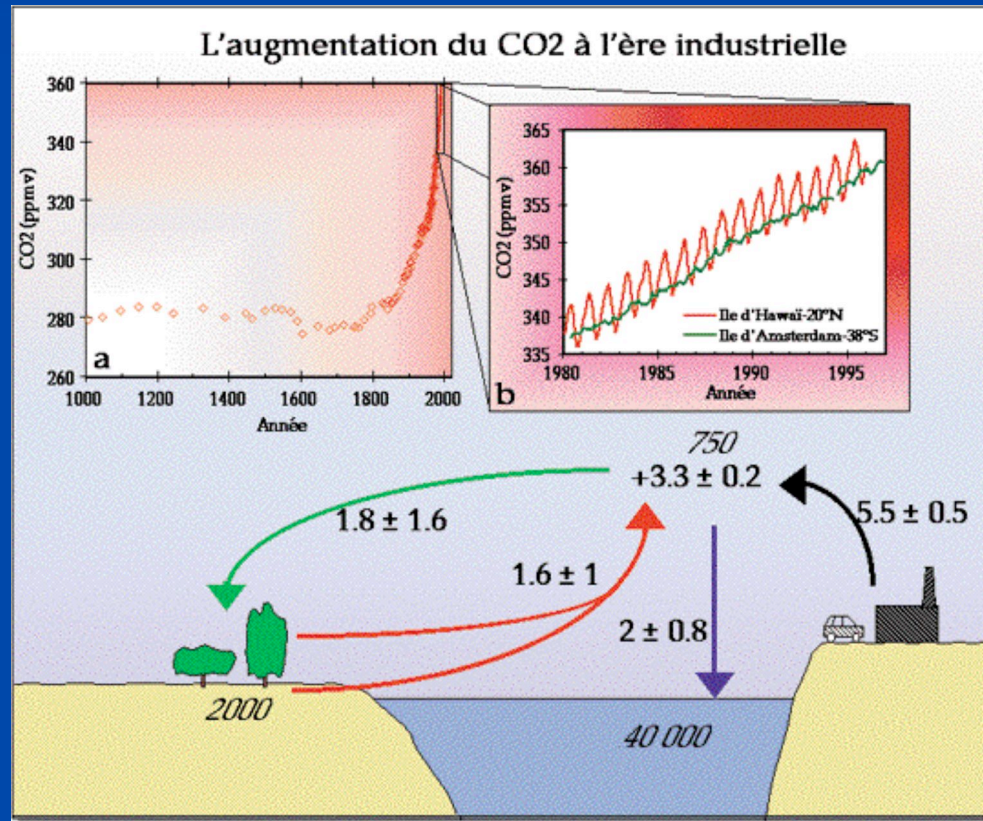


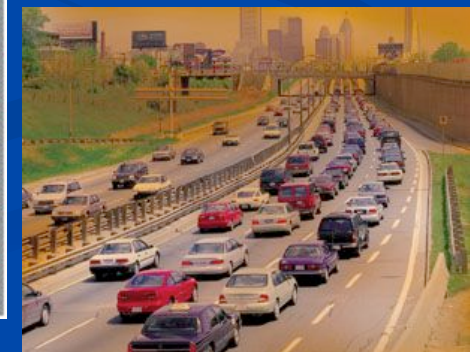
FIGURE 1.2

On comprend à peu près le système

■ $5,5 \pm 0,5 + 1,6 \pm 1 = 3,3 \pm 0,2 + 2 \pm 0,8 + 1,8 \pm 1,6$



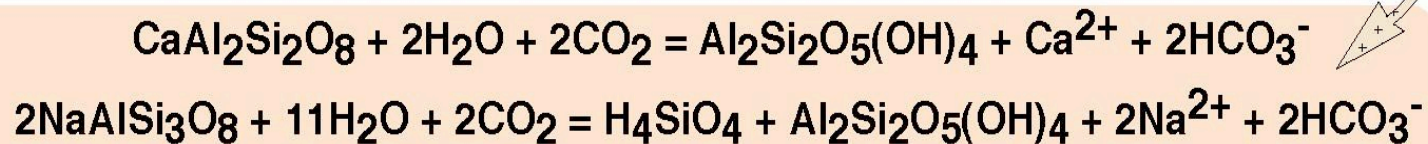
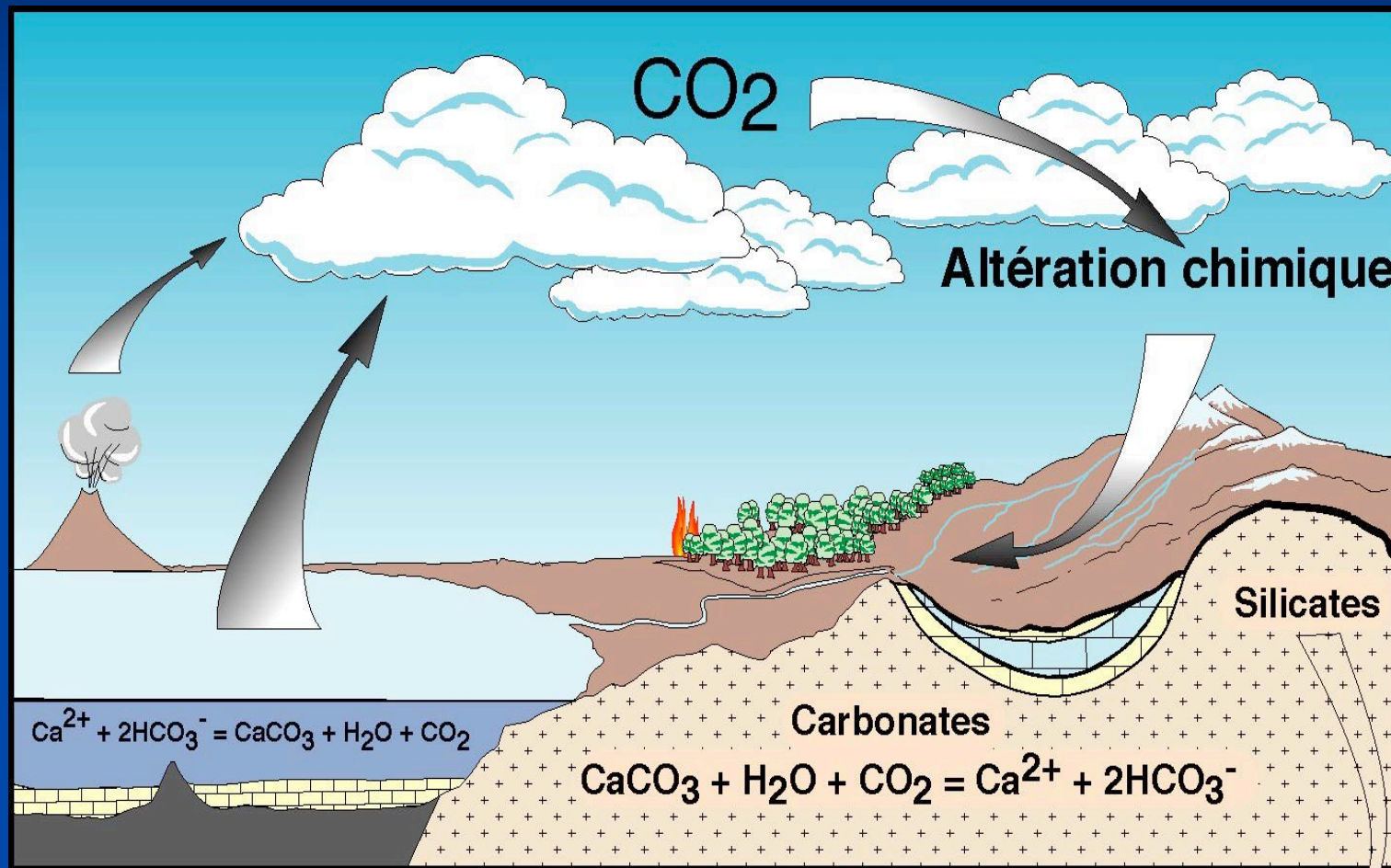
La plus grosse incertitude



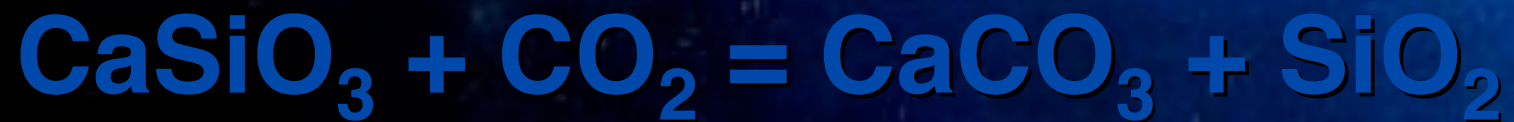
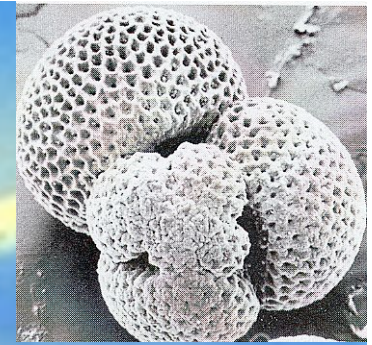
Temps de résidence

- Productivité biologique primaire globale : 100 PgC/an. D'où un temps de résidence du C biosphérique court (5,5 ans).
- Carbone des sols. 50 PgC sont respirés chaque année. Donc un temps de résidence de 30 ans en moyenne.
- Ces chiffres cachent une très grande variabilité spatiale, selon les écosystèmes.

La séquestration du carbone au cours des temps géologiques



La machine chimique Terre...



Flux en Pg/an

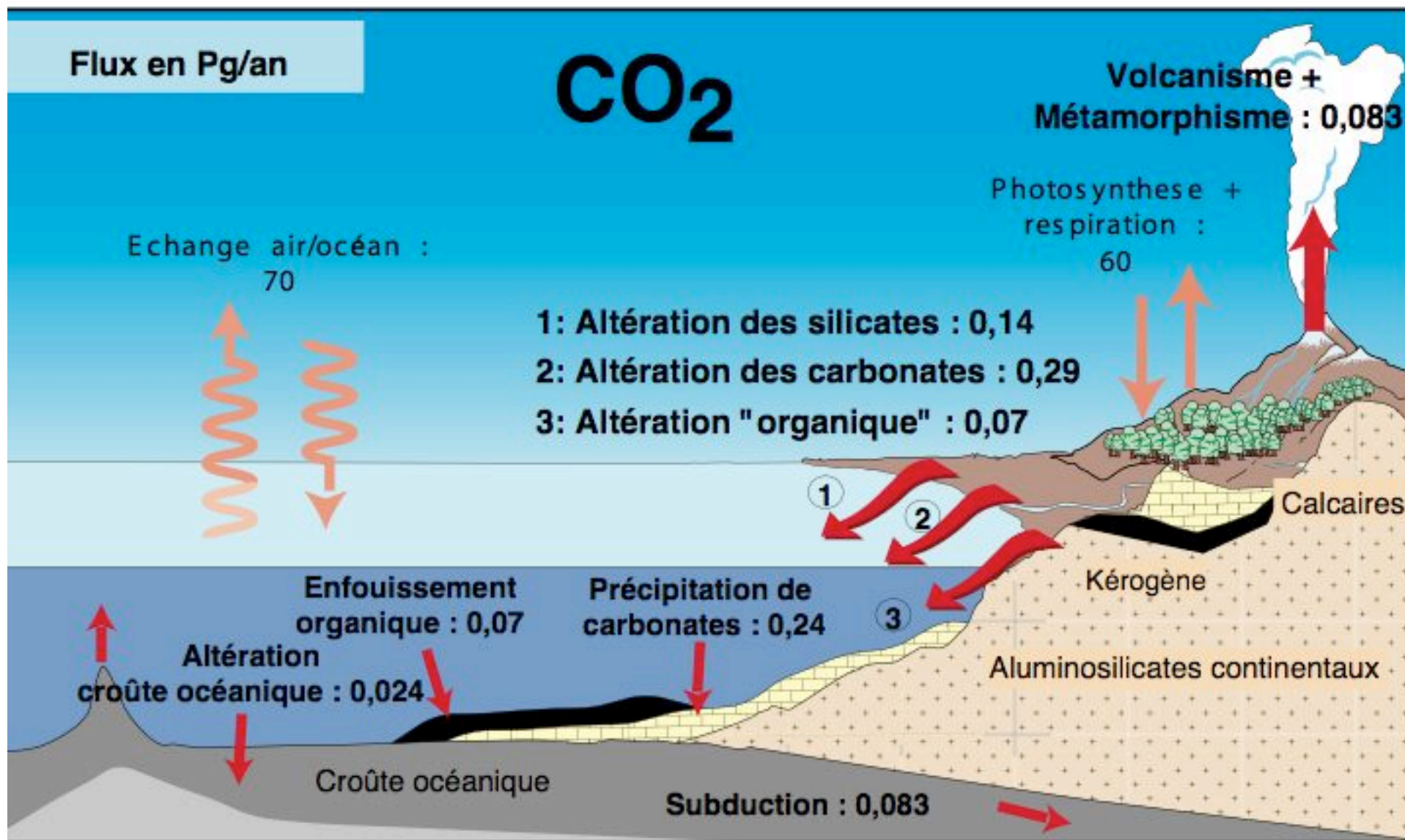
CO₂

Volcanisme +
Métamorphisme : 0,083

Photosynthèse +
respiration :
60

Echange air/océan :
70

- 1: Altération des silicates : 0,14
- 2: Altération des carbonates : 0,29
- 3: Altération "organique" : 0,07



Altération
croûte océanique : 0,024

Enfouissement
organique : 0,07

Précipitation de
carbonates : 0,24

Croûte océanique

Subduction : 0,083

Kérogène

Aluminosilicates continentaux

Calcaires

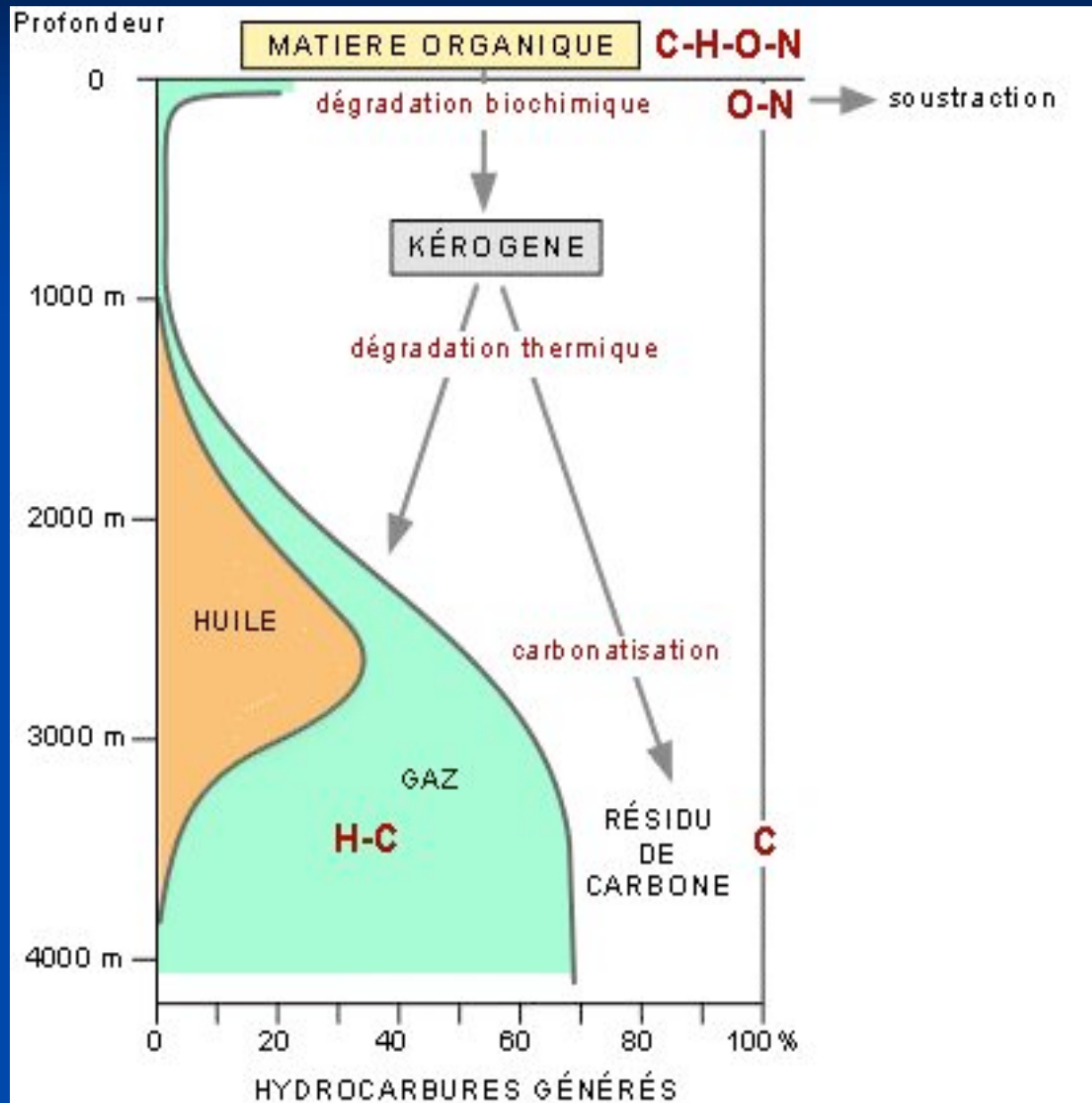
A quand la fin du pétrole?

- Ressources et réserves
- Club de Rome (1972)
- Combien d'années d'exploitation du pétrole?

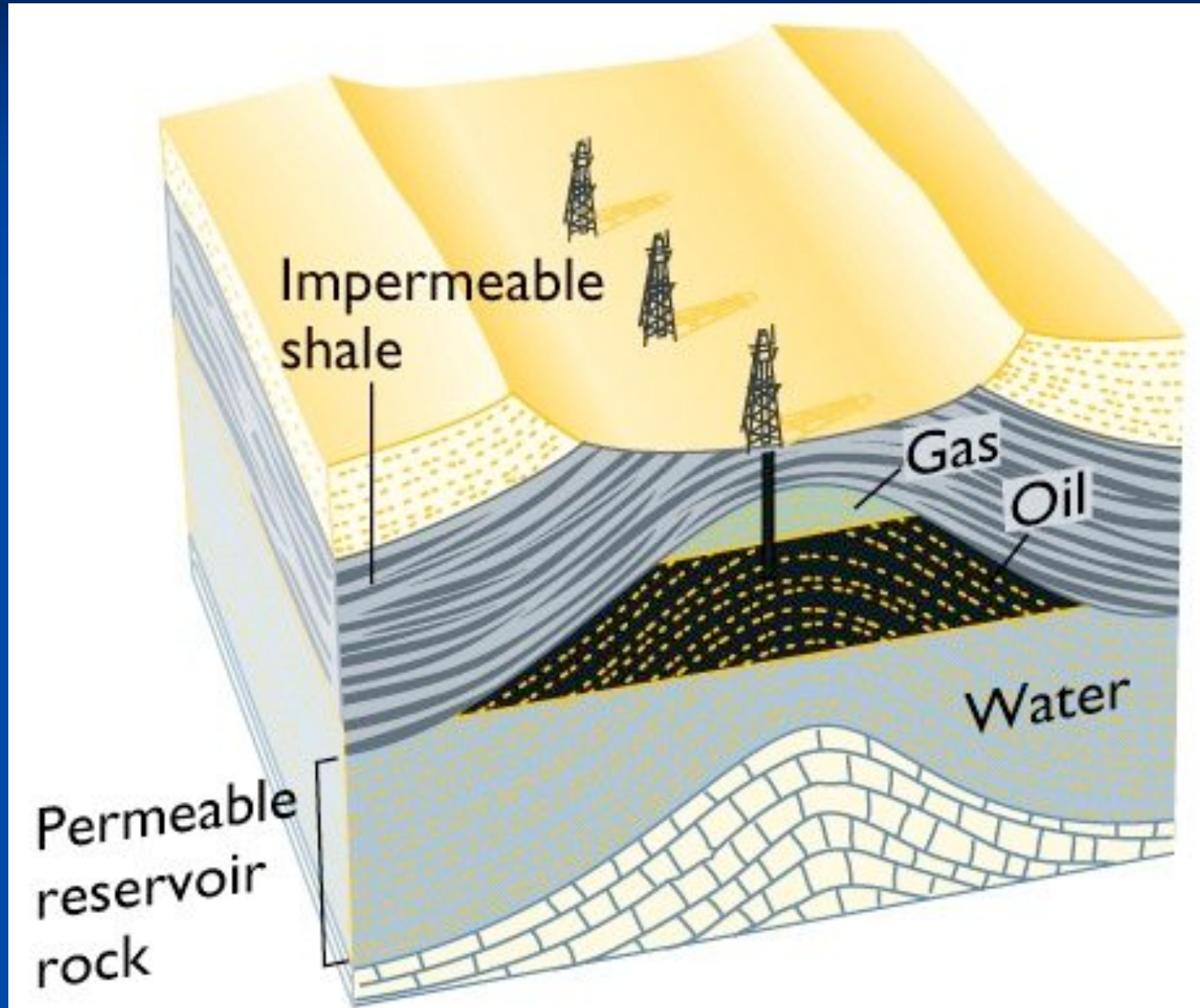
Une forêt au Carbonifère



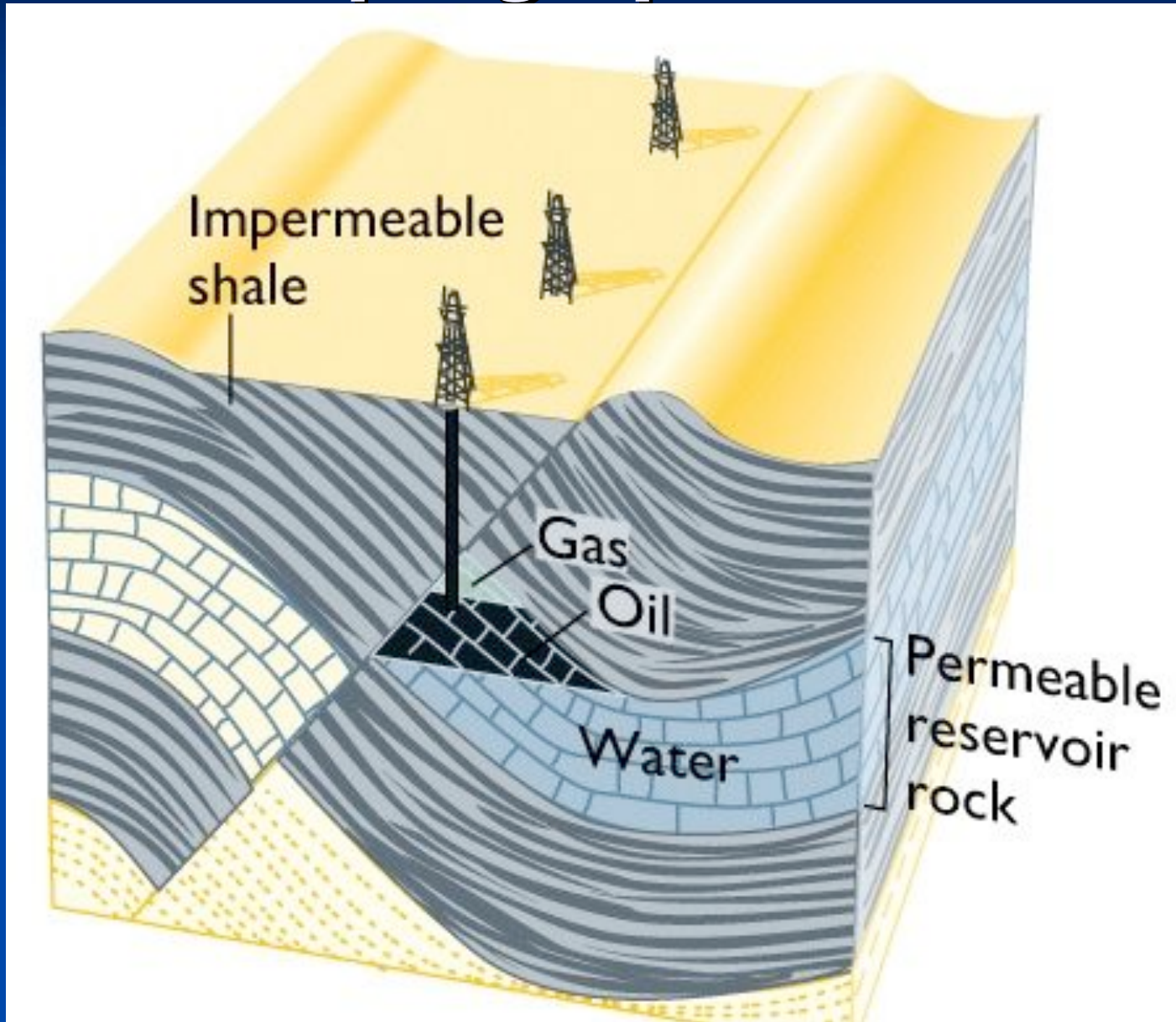
Fenêtre à huile et à gaz.



Un piège anticlinal

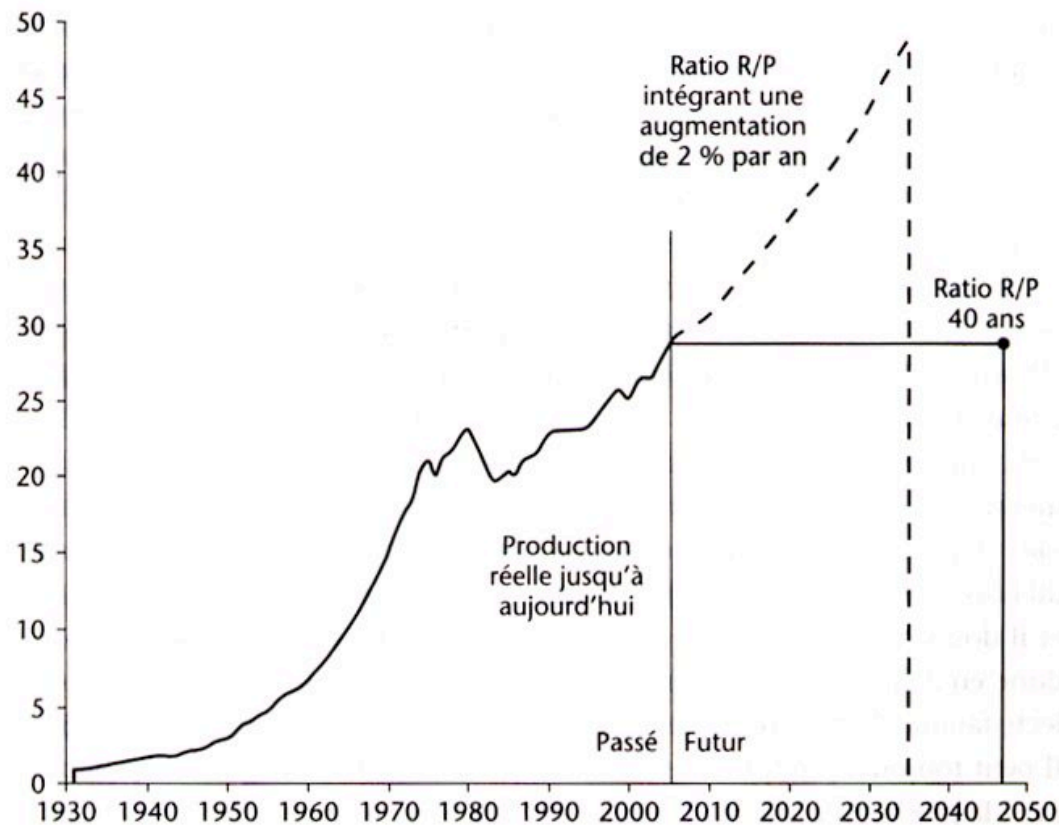


Un piège par faille

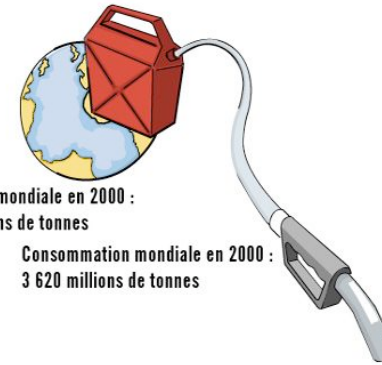


Une prédiction simple: réserves/production

Figure 2.2 : Production annuelle de pétrole au niveau mondial et représentation du ratio R/P simple et R/P avec 2 % d'augmentation.



Réserves :
140 milliards de tonnes,
soit 40 à 50 ans

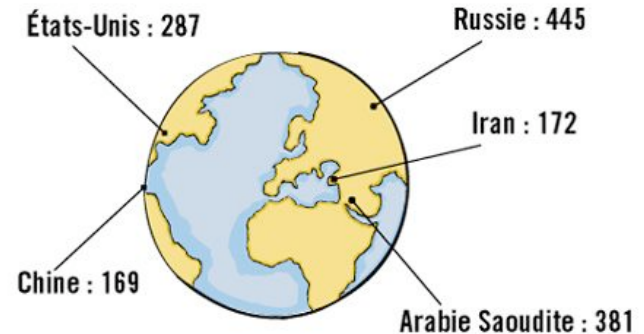


Production mondiale en 2000 :
3 657 millions de tonnes

Consommation mondiale en 2000 :
3 620 millions de tonnes

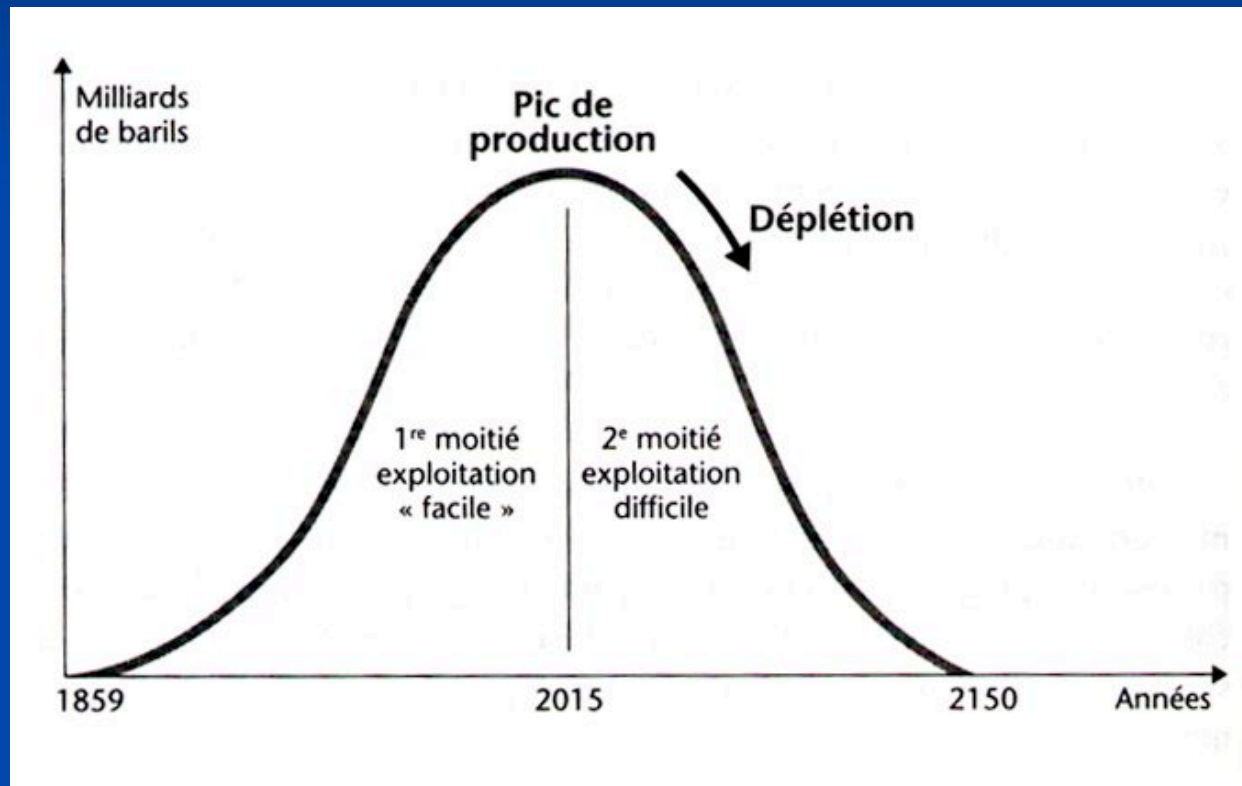
Les 5 principaux producteurs de pétrole

Production 2001 en millions de tonnes



Une approche plus réaliste

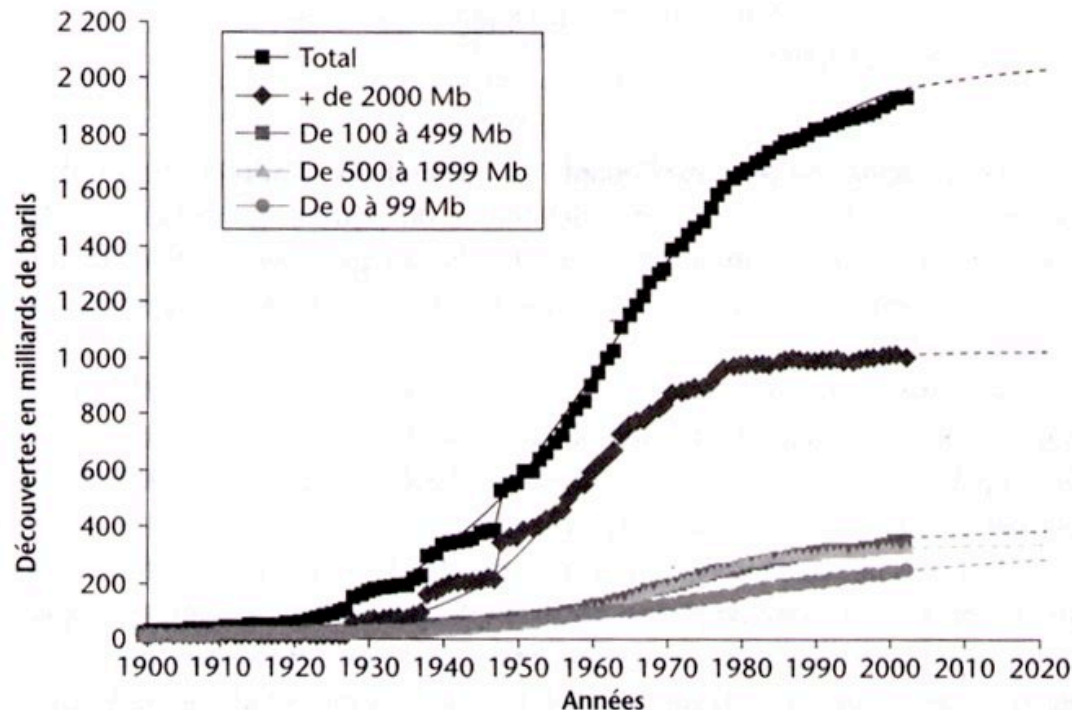
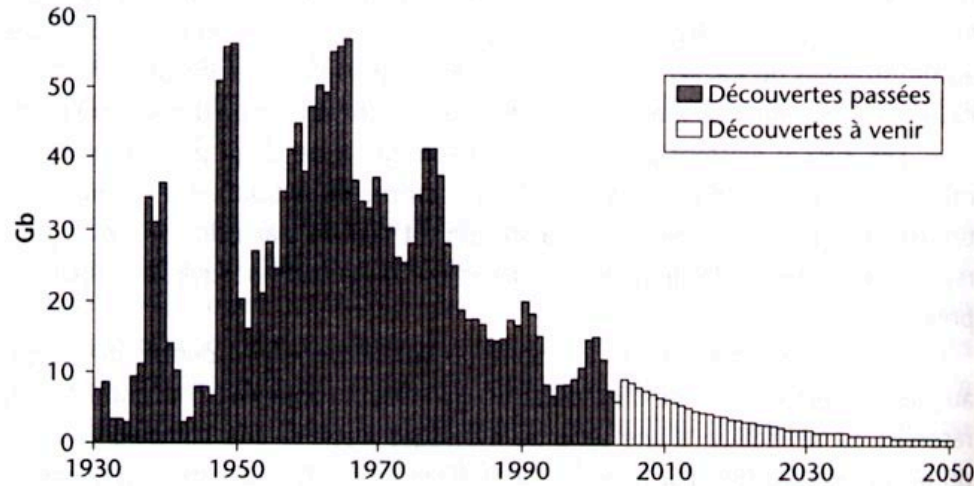
- Courbe de Hubbert (pour un gisement)



Pic de production ne veut pas dire fin du pétrole

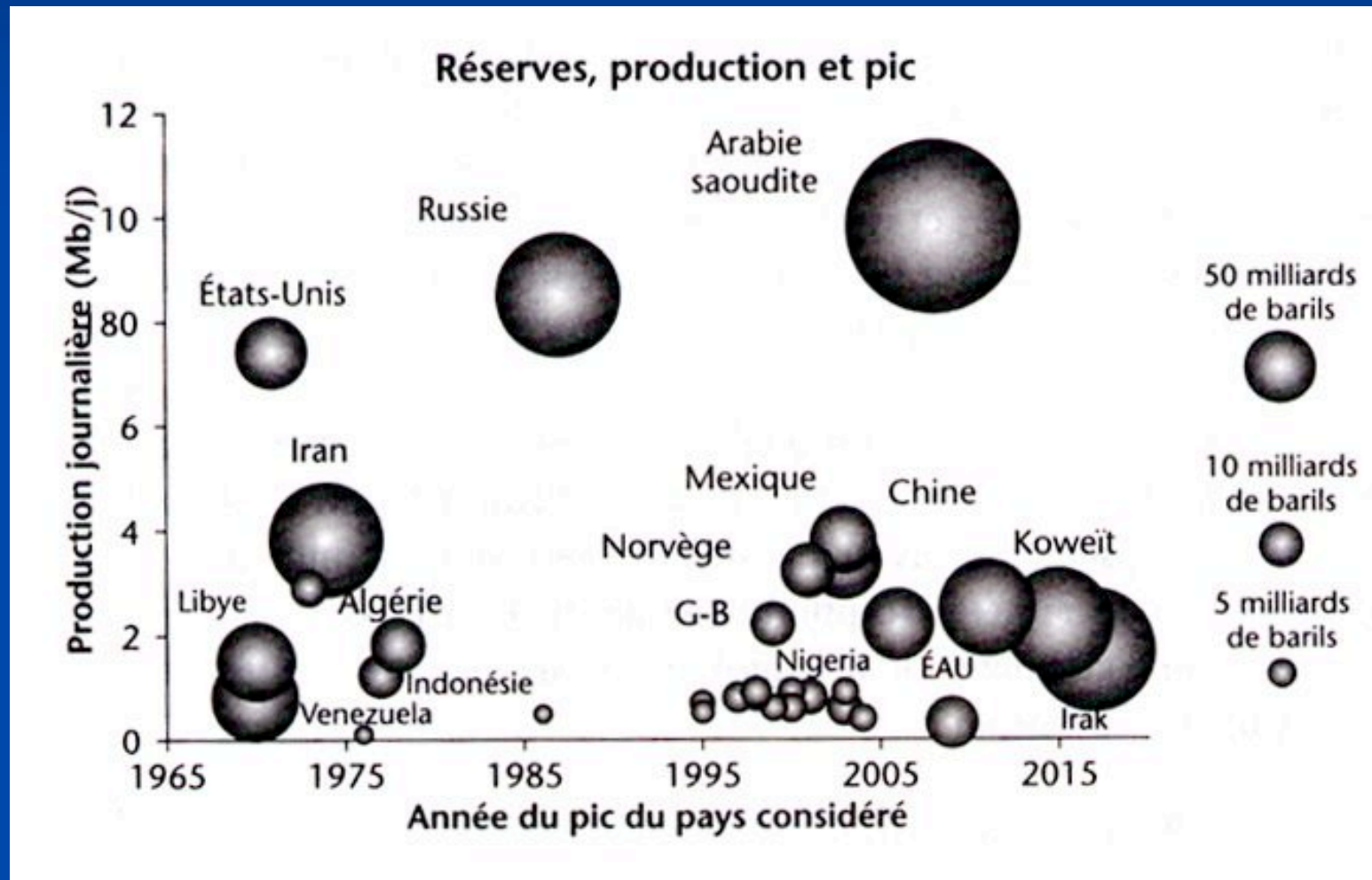
A quand le pic de production (donc de consommation) ?

Découvertes



- Découvertes de pétrole:
- Découvertes à venir basée sur la prospection géologique.
- Les plus grands gisements ont plus de trente ans (Arabie, Mexique, Koweït, Chine)
- Les gisements récents sont petits
- Réserves: 2050Gb
- Consommé en 2004: 940.
- Le pic est donc proche pour l'ensemble du monde

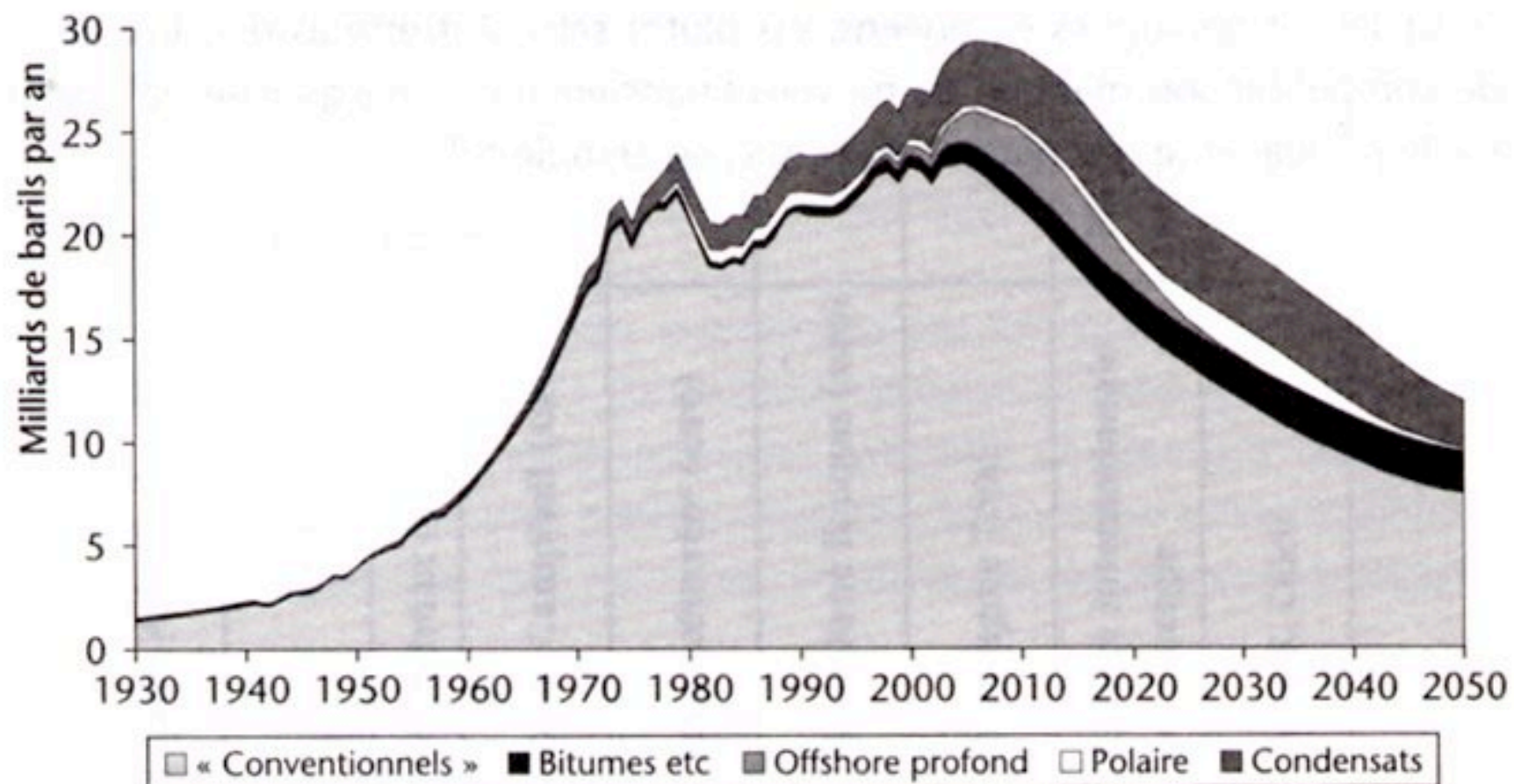
Pics par pays



Estimation du pic mondial

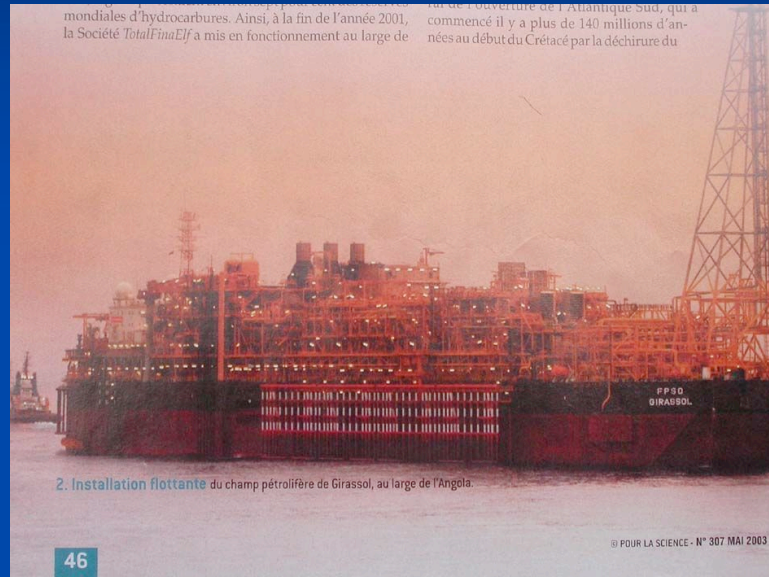
- Les estimations sont variables, mais comprennent entre 2007 (Colin Campbell) et 2025 (Total)
- Campbell prend en compte le pétrole conventionnel et non conventionnel

Figure 4.2 : Le modèle de simulation de Colin Campbell avec un pic mondial en 2007.

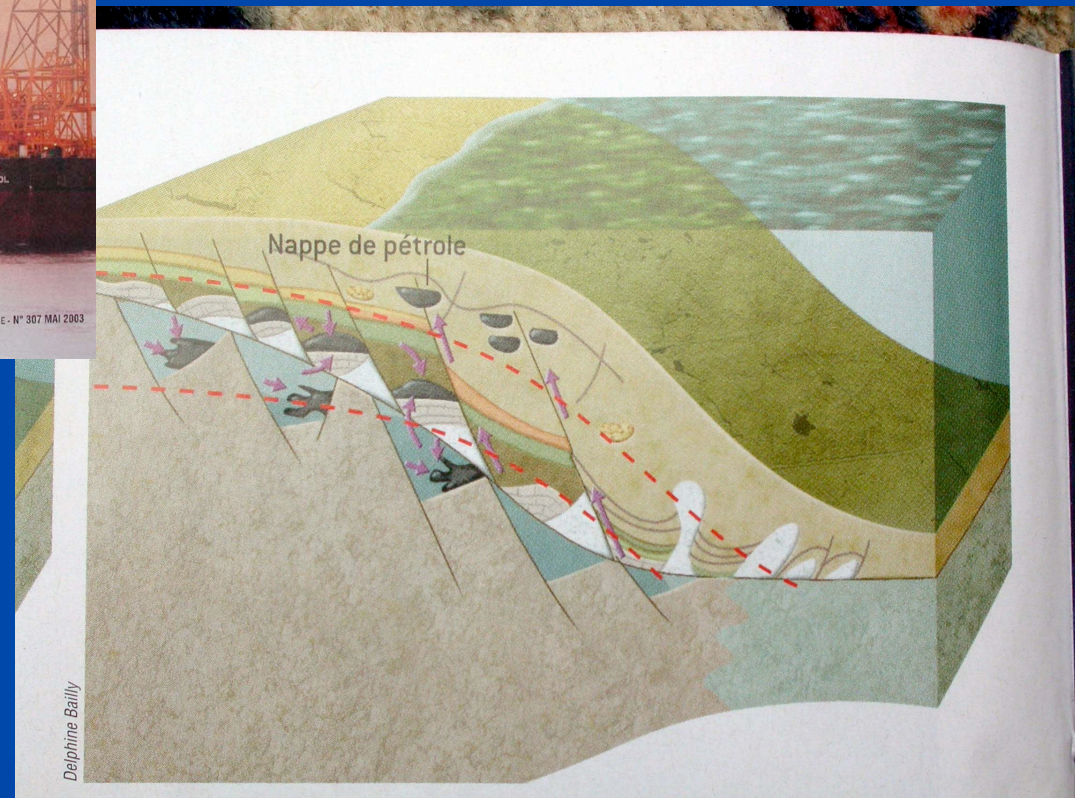


Exploitation profonde

P. la Science, mai 2003



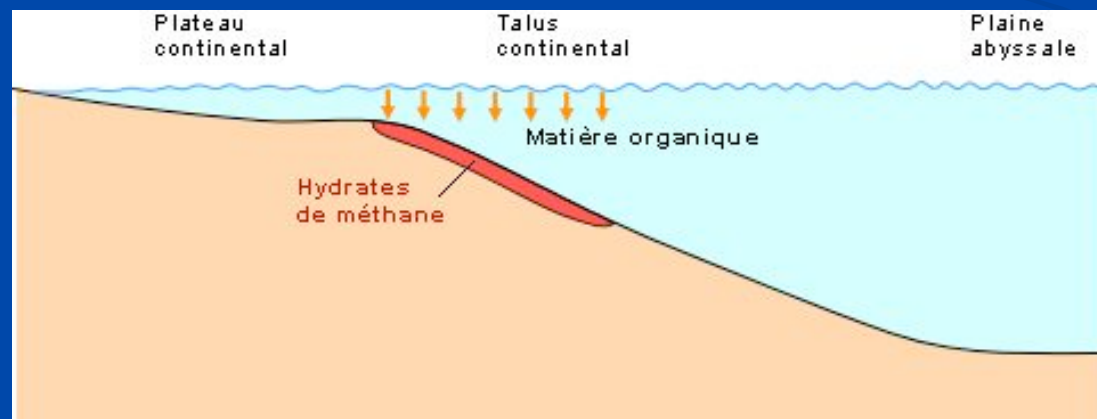
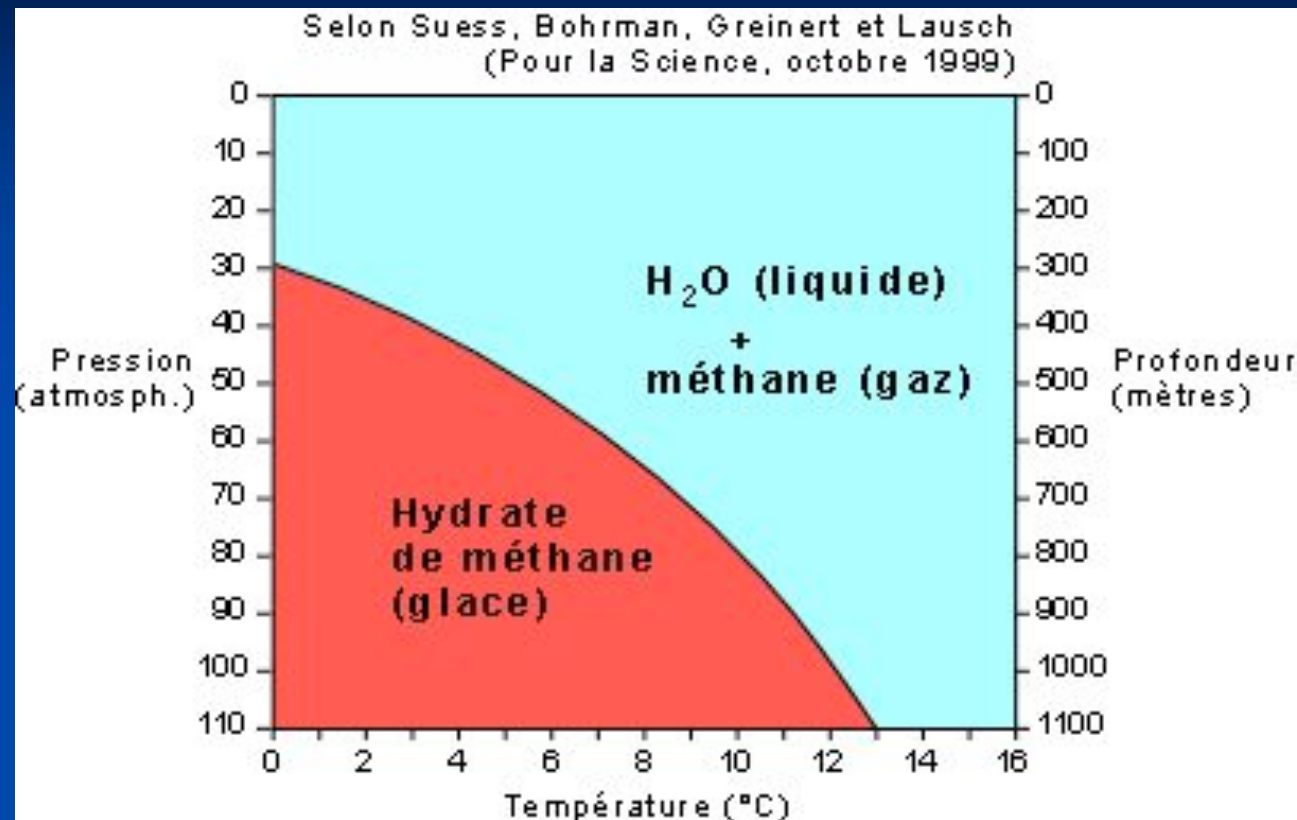
Marge de
l'Angola



Le méthane de la mer



Des gaz piégés dans la glace

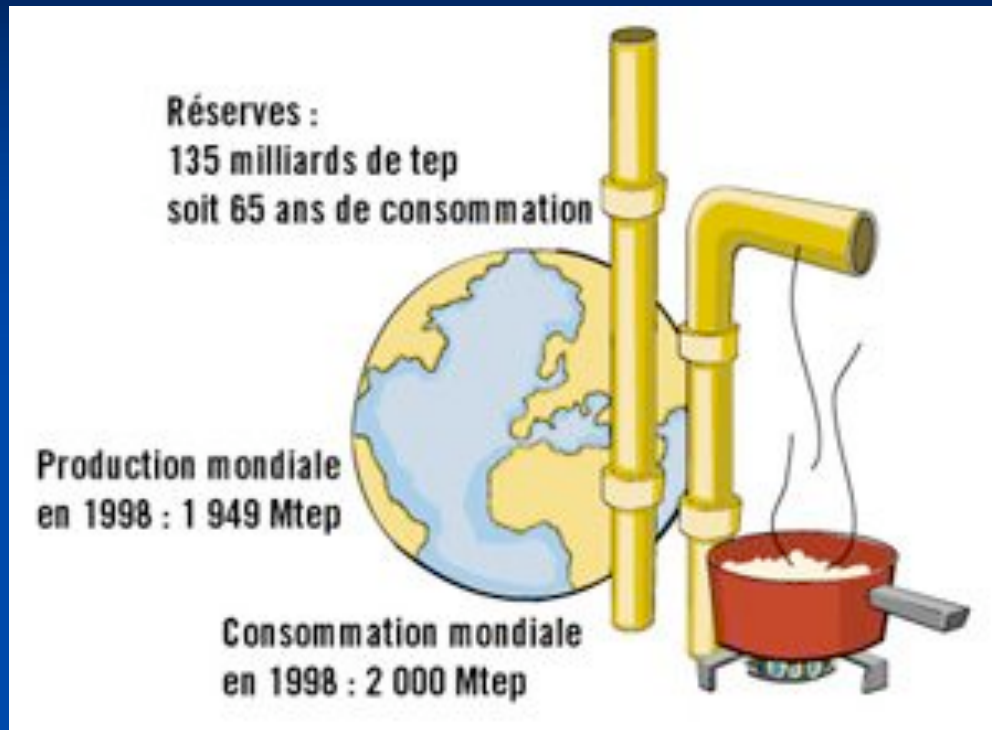


Le méthane de la mer (1996)

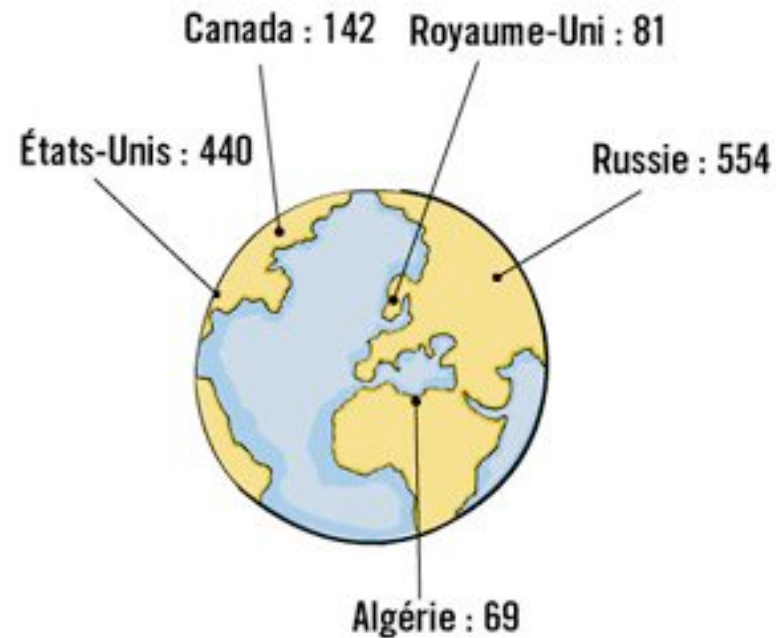
- Piégé dans les clathrates, pression élevée et T faible.
- Deux fois plus de carbone sous la forme de méthane hydraté au fond des océans que dans les réserves connues de gaz et de pétrole.
- C'est un carbone difficile à exploiter et potentiellement catastrophique pour l'environnement s'il dégazait
- De nombreuses compagnies travaillent à leur exploitation.



Le gaz naturel



Les 5 principaux producteurs de gaz naturel
Production 2001 en Mtep



1 tep : 42 GJ

1000 m³ de gaz : 0,85 tep

1 t de charbon : 0,7 tep

R/P = 65 ans

Réserves prouvées de charbon

Réserves :
984 milliards de tonnes
soit 260 ans de consommation constante

Production mondiale
en 2000 : 2 282 Mtep



Consommation mondiale
en 1999 : 2 278 Mtep

Les principaux producteurs de charbon

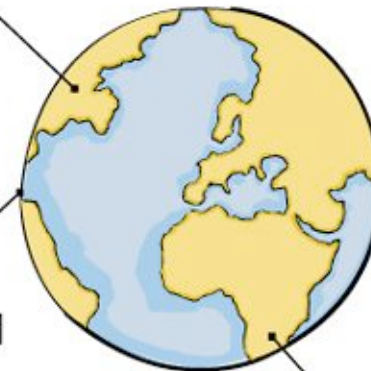
Production 2000 en millions de tonnes

États-Unis : 895

Inde : 306

Chine : 1231

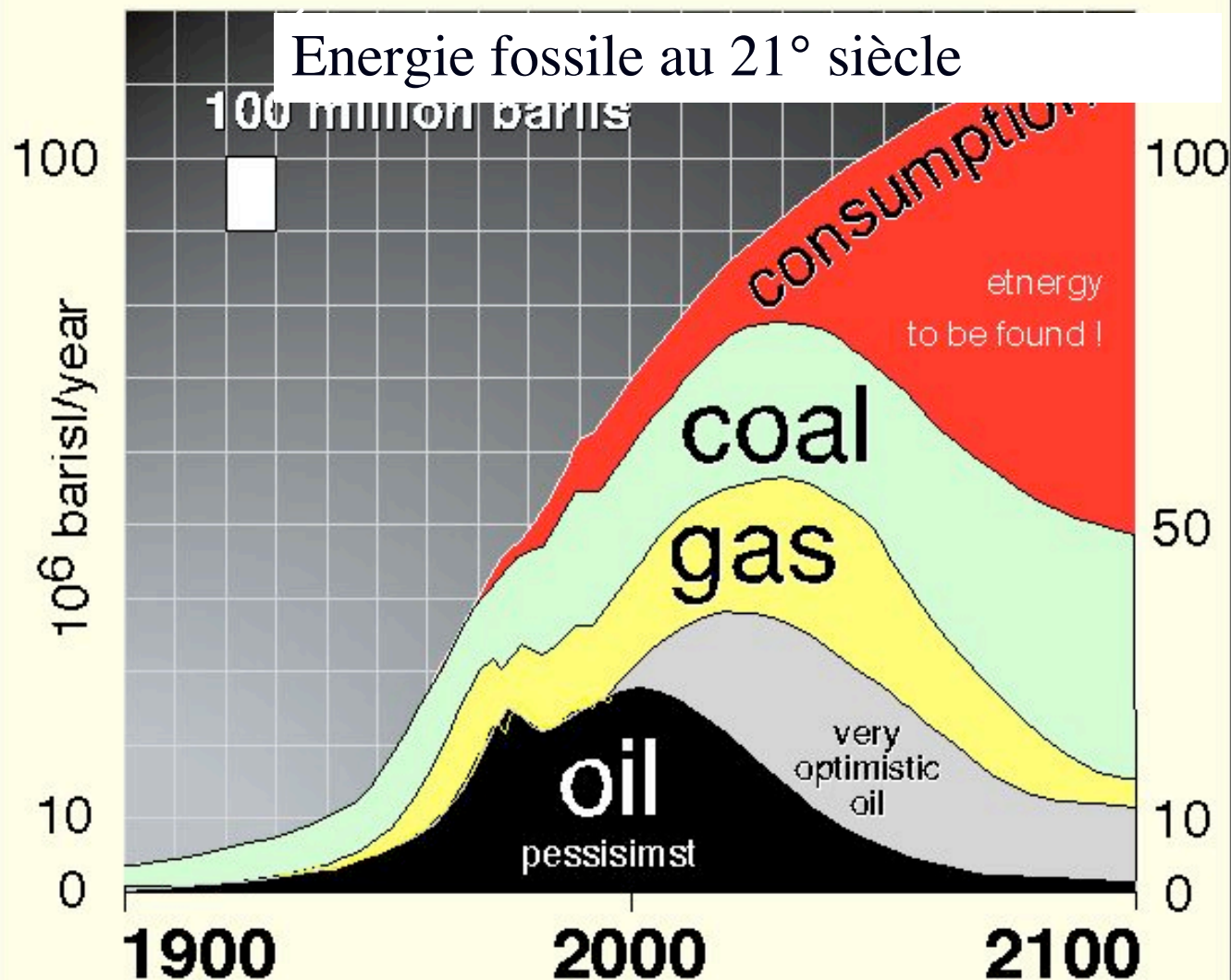
Afrique du sud : 224



R/P : 260 ans

Et alors ?

Fossil Energy in the 21st century



Faut-il être optimiste ou pessimiste ?

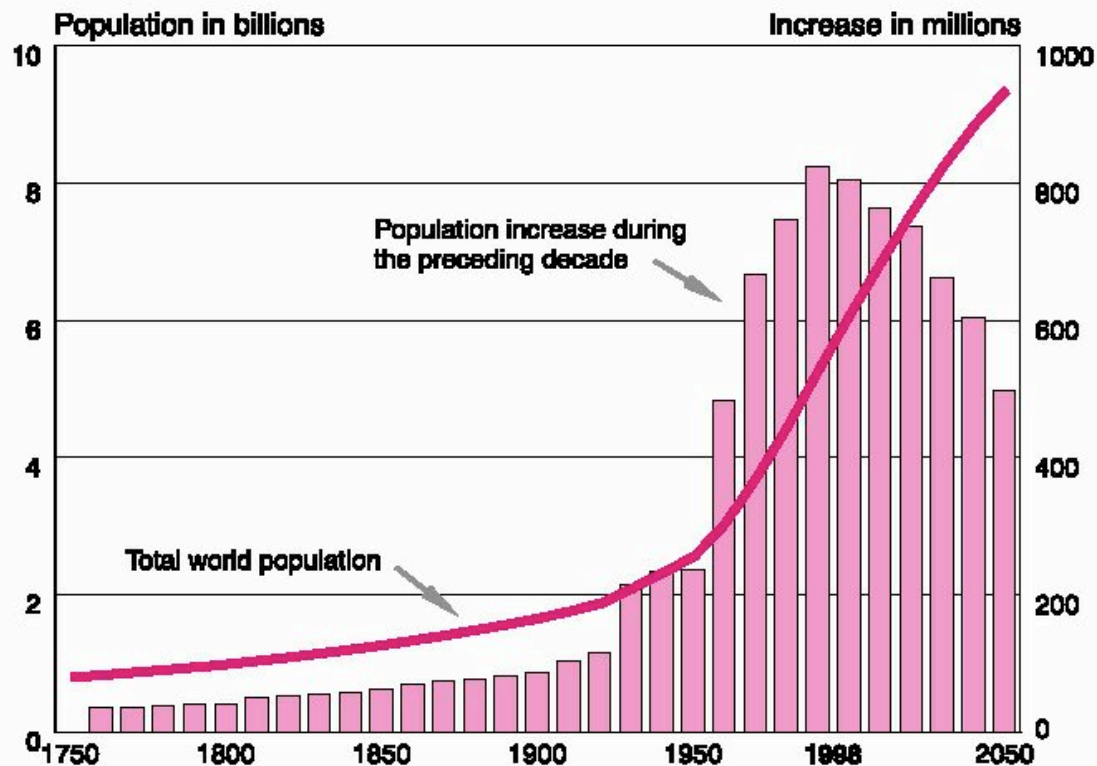
- Le déclin de la production pétrolière est annoncé nous n'avons pas franchi le pic de production.
- Les moyens de retarder ce déclin sont
 - - l'exploration de zones inconnues (pôles, fonds sous marins, marges profondes)
 - - améliorer les techniques d'extraction
 - - exploiter le pétrole lourd et le bitume
 - - exploiter le « méthane de la mer »
- Bref, des raisons de rester optimiste...ou pessimiste...
- Quantité totale qui sera injectée :

Prédiction : les scénarii

- Prédire c'est savoir modéliser.
- Les modèles sont complexes, car il font intervenir le cycle du carbone, le cycle de l'eau, la dynamique océanique et atmosphérique. Il nécessite de puissants ordinateurs.
- Le cycle du carbone et ses rétroactions est mal compris. Plusieurs réservoirs aux échelles de temps caractéristiques interviennent.
- Le cycle de l'eau est très difficile à modéliser. Le rôle par ex. des nuages.
- Des rétroactions positives : la disparition de la neige diminue l'albédo de la Terre et les aérosols.
- Quel sera la courbe des émissions de CO₂ = f(économie mondiale, réserves)

6 milliards d'êtres humains

Figure 1.
**World Population Still Far
From Stabilizing**

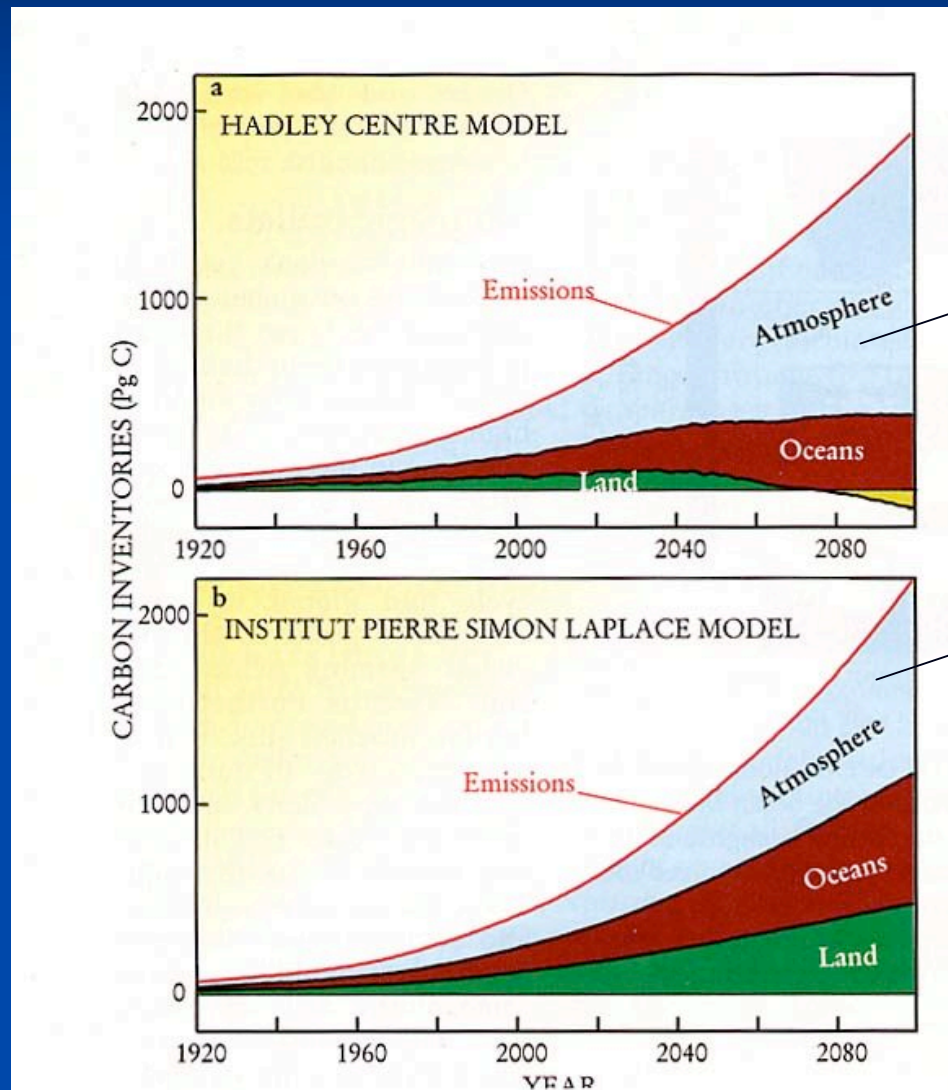


Source: United Nations (1995:97) and U.S. Bureau of the Census, International Data Base.

Prédiction : les scénarii

- Plus de 40 scénarios élaborés suivant les stratégies économiques. Ce sont des outils scientifiques et pas de boules de cristal. Ils sont couteux en moyens informatiques (Earth simulator, Japon).
- Les modèles annoncent un réchauffement climatique de 1,4 à 6 °C d'ici 2100 (490 à 1200 ppm).
- Le niveau de l'océan s'élèverait de 9 à 88 cm d'ici 2100.
- Au niveau global, hausse des précipitations, mais moins clair au niveau régional.
- On ne peut pas exclure de changements brusques et imprévus du climat (modification de la circulation thermohaline).
- Les changements climatiques se poursuivent sur des siècles, du à l'effet retardateur de l'océan et de la biosphère continentale.

Résultats de la prédiction : business as usual



980 ppm CO₂ en
2100 : 5°C de
réchauffement global,
8 °C sur les terres.

780 ppm CO₂ en
2100

Accélération ou baisse des émissions

- IPCC propose des scénarios extrêmes
- L'accélération de la croissance mondiale conduit à 900 ppmV en 2100 et une variation de température de +4°C
- Une réduction importante des émissions conduit à 500 ppm en 2100 et une variation de température de +2°C

Que faire ?

- **1. Prévenir.**

Protocoles internationaux, La Haye, Kyoto

- **2. Guérir**

Forêts ? Subduction ? Espace ? Simuler la pompe biologique ? Séquestration en formation géologique ? Imiter la nature dans la fabrication du calcaire: la seule solution viable qui permet de concilier croissance et climat.

- **3. Comprendre la Terre**

Mieux connaître les cycles biogéochimiques
Modéliser le système Terre global

1. Prévenir: stabiliser le niveau de CO₂

- Courbes de stabilisation.
- Arrêter d'émettre ou bien stocker ?
- Réduire les émissions

Tout a un prix CO₂

On émet une demi-tonne de carbone dès que:

- nous consommons 2500 kWh en UK, 22000 en France
- 50 à 100 kg de produits manufacturés
- 2 tonnes de béton (17 pour une maison moderne)
- 5000 km en voiture (4 à 6 mois). 1 à 2 mois en 4X4...
- Fait un allé-retour à NY en avion
- Si tous les gaz à effet de Serre sont pris en compte, 50 kg de bœuf, un allé Paris NY.

2. Guérir : stocker le CO2

- Stockage in situ ou ex-situ du CO2 de nos usines.
- Diversifier nos sources d'énergie

3. Comprendre : INVENTER LE FUTUR

- Les efforts de recherche pour mieux comprendre cet objet qu'est la Terre doivent être importants
- Un bel exemple où la recherche fondamentale et la recherche appliquée se complètent.

Conclusion

- L'homme a modifié le cycle global du carbone.
- Modéliser l'évolution du climat dépend de notre attitude à comprendre le système Terre globalement.
- L'étude du passé géologique récent nous aidera à mieux comprendre comment le système terre se régule, même si l'origine des cycles glaciaires est différente
- La modélisation est un problème scientifique et géopolitique épineux. Nord-Sud.
- Les solutions à la réduction du CO₂ existent et sont actuellement à l'étude.
- Séquestrer le CO₂ est probablement le plus beau défi humain pour le 21^e siècle.