

Les roches carbonées

Laurie BOUGEOIS

ST3 - Polytech' Paris UPMC

22 mai 2015



Rappel : différentes roches sédimentaires

Roches sédimentaires

Roches carbonatées
calcaires



Roches siliceuses
diatomite



Roches carbonées
charbon, pétrole



Roches évaporitiques
halite, gypse



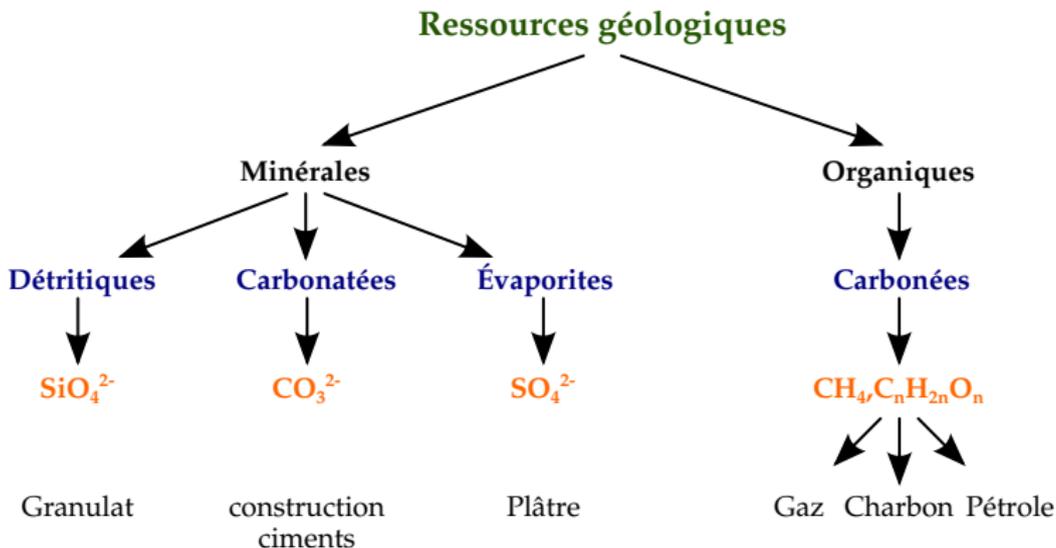
Roches détritiques
conglomérats, grès



Ressources

Ressource

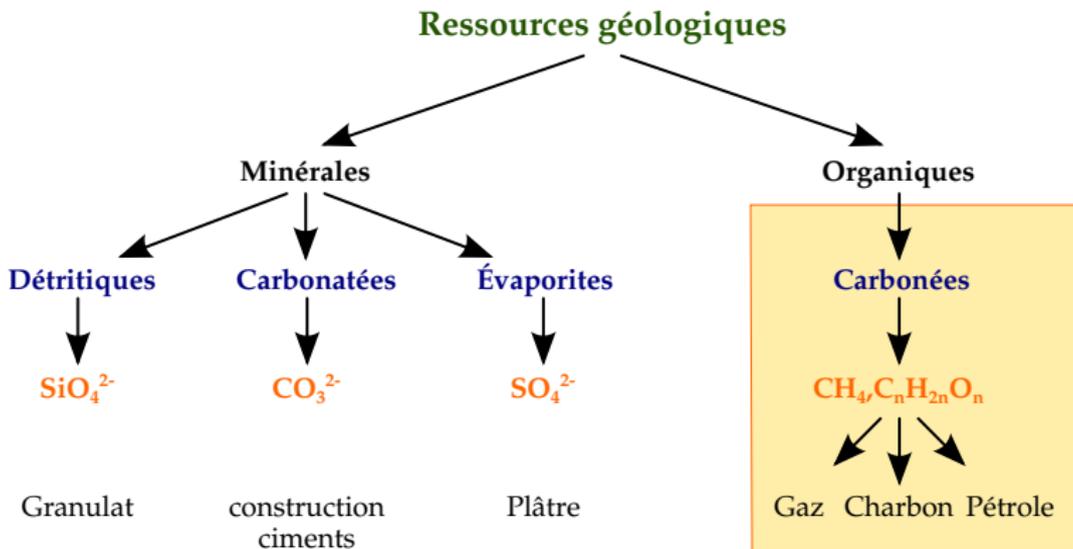
Matière première ou source d'énergie naturelle permettant de subvenir aux besoins d'organisme vivant



Ressources

Ressource

Matière première ou source d'énergie naturelle permettant de subvenir aux besoins d'organisme vivant



Roches carbonées

- ▶ **Matière organique** ($\text{CH}_4, \text{C}_n\text{H}_{2n}\text{O}_n$)
 - ↪ constituant ubiquiste des roches sédimentaires
- ▶ **Quelques chiffres** abondance de la matière organique :
 - ↪ sédiments argileux de PF \Rightarrow 2 %
 - ↪ sédiments océaniques profonds \Rightarrow 0.4 %
 - ↪ charbons, tourbe, roches mères \Rightarrow 90 %
- ▶ **Trois lignées de roches carbonées**
 - ↪ **continentale** : tourbe, lignite, charbon, gaz
 - ↪ **marine** : gaz, pétrole, bitumes
 - ↪ **lacustre** : pétrole

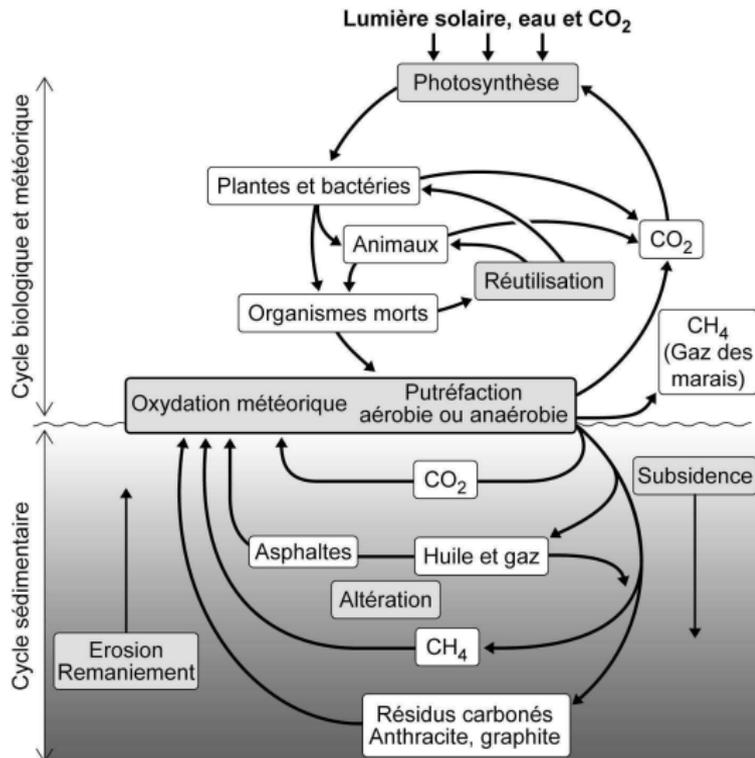
Cycle du carbone organique

► Cycle biologique rapide

- ↪ matière organique produite par photosynthèse
- ↪ recyclée dans les chaînes alimentaires
- ↪ dégradée par divers processus physico- et bio-chimiques

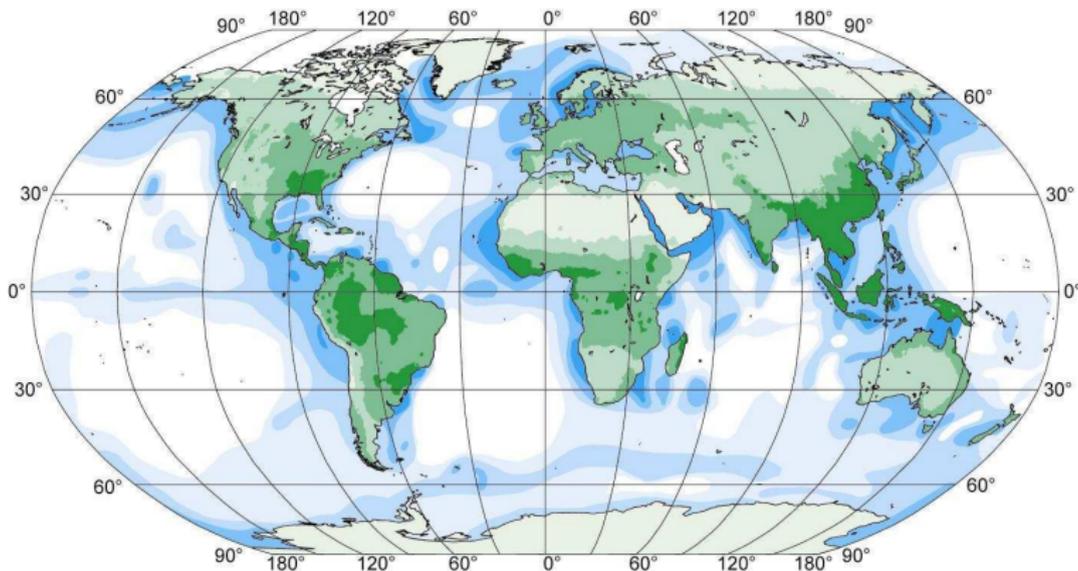
► Cycle sédimentaire lent

- ↪ évolution de la MO selon l'enfouissement (P, T°C)



1. Cycle biologique du carbone organique
2. Cycle sédimentaire du carbone organique
3. Gisements et exploitation

Productivité primaire



Productivité primaire sur les terres émergées

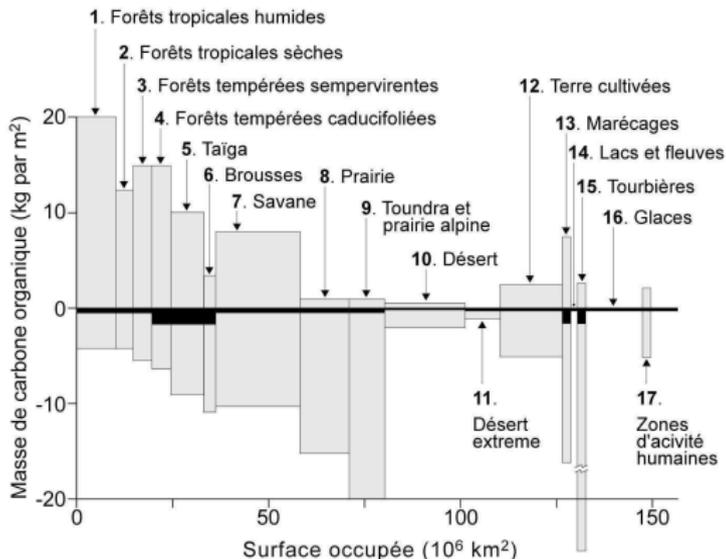


Productivité primaire nette de l'océan global



Où est produite la MO en domaine continental ?

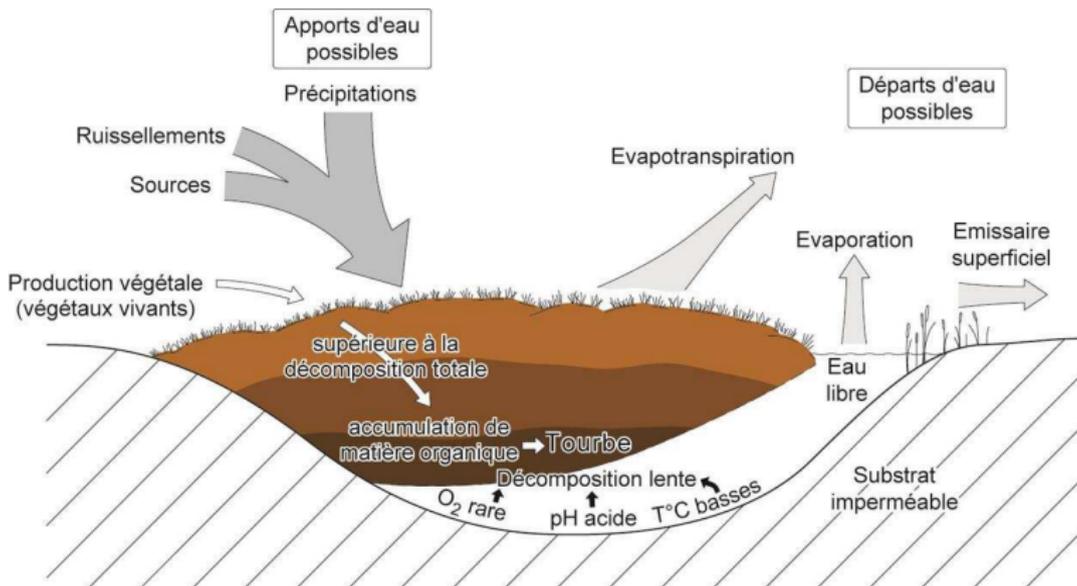
- ▶ MO produite par les **végétaux supérieurs** et dans une moindre mesure par des **lichens** et des **mousses**
- ▶ recyclage de la MO très important dans les forêts ⇒ peu de MO incorporée dans le sol
- ▶ MO accumulée dans les **prairies**, la **toundra**, les **tourbières** (++++)



MO du sol MO aérienne

Les tourbières

- ▶ production de MO in situ >> décomposition
- ▶ bilan hydrique positif (précipitation >> évaporation)



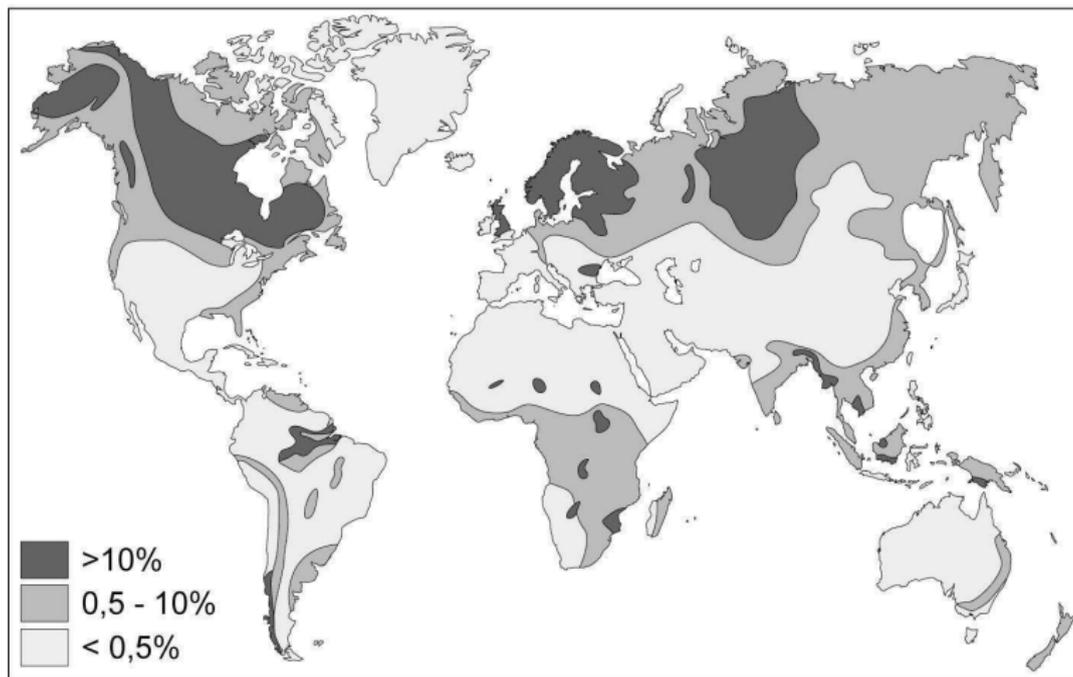
Les tourbières

- ▶ production de MO in situ >> décomposition
- ▶ bilan hydrique positif (précipitation >> évaporation)

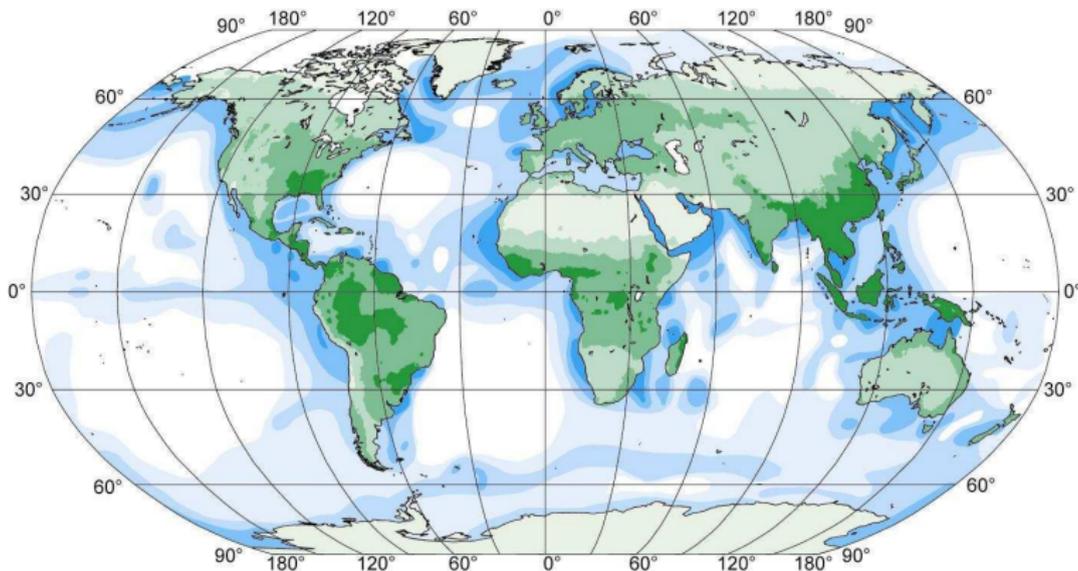


Localisation des tourbières

- ▶ majorité des tourbières se situe entre **50 et 70°N** (Russie, Scandinavie, Canada).



Où est produite la MO en domaine marin ?



Productivité primaire sur les terres émergées

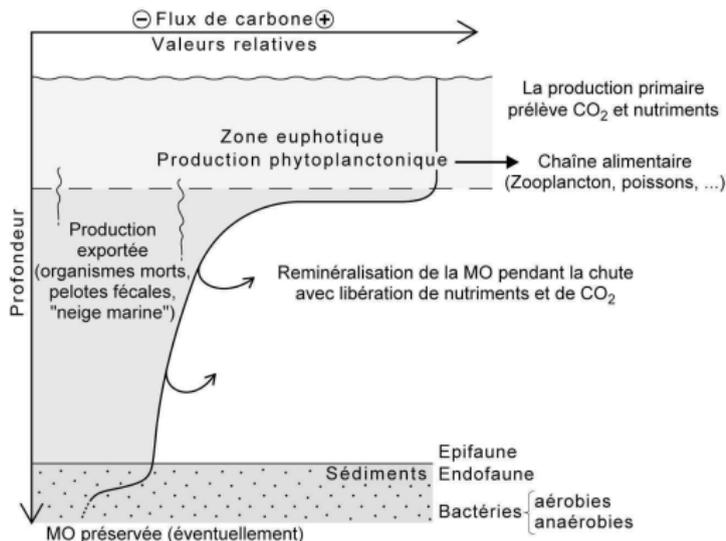


Productivité primaire nette de l'océan global



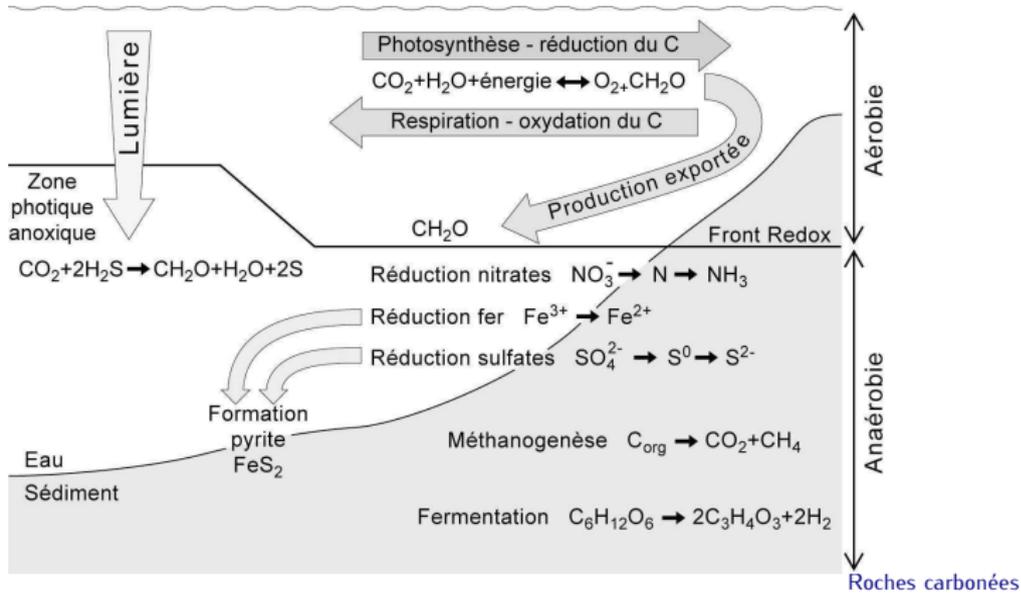
Où est produite la MO en domaine marin ?

- ▶ MO essentiellement produite en **milieu proximal** (PF) dans des environnements **peu profonds** (>100m)
- ▶ production de MO dépend de facteurs climatiques (T°C, luminosité) et environnementaux (nutriments et teneur en CO₂)
- ▶ MO est essentiellement produite et **recyclée** dans la zone photique
- ▶ MO est **décomposée** par des processus bio- et physico-chimiques dans la colonne d'eau puis dans le sédiment



Dégradation de la MO en milieu marin

- ▶ présence d'O₂
 - ↪ MO dégradée **directement** ou par des **micro-organismes**
- ▶ absence d'O₂
 - ↪ MO dégradée par **fermentations bactériennes anaérobiques**
(à partir des NO₃⁻ et SO₄²⁻)



Stockage de matière organique en milieu marin

- ▶ contrôlé par 3 processus :

Enfouissement



Taux de
sédimentation

Production



Matière
organique

Préservation



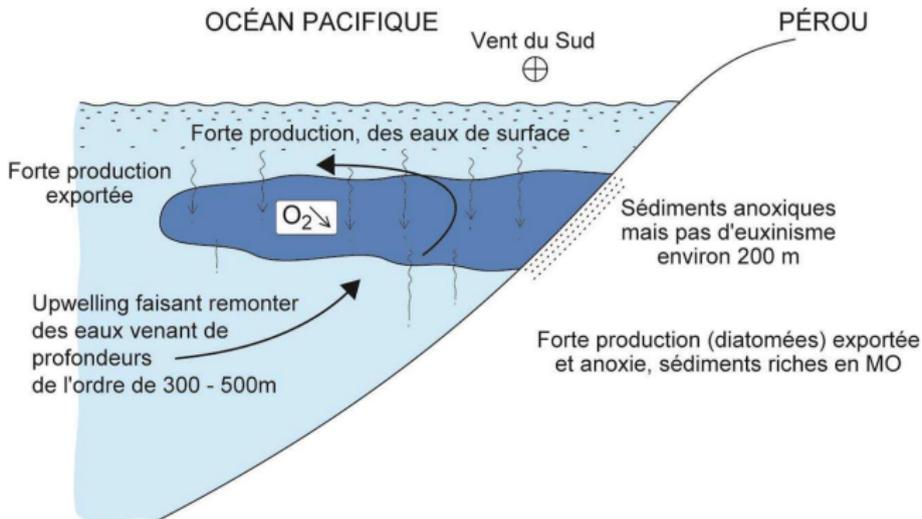
Niveau
d'oxygène

Stockage de matière organique en milieu marin

Exemple du modèle d'upwelling

Productivity model

- ▶ forte productivité en surface
- ▶ remontée d'eaux froides riches en nutriments

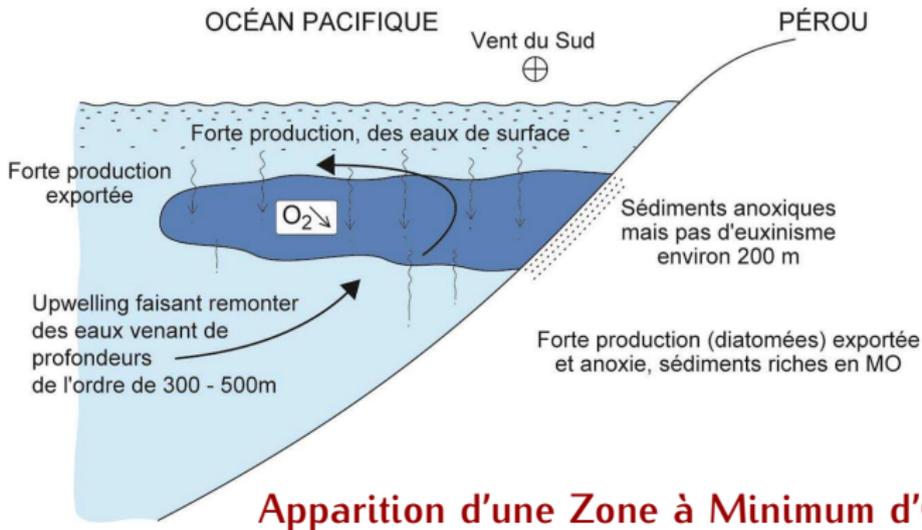


Stockage de matière organique en milieu marin

Exemple du modèle d'upwelling

Productivity model

- ▶ forte productivité en surface
- ▶ remontée d'eaux froides riches en nutriments

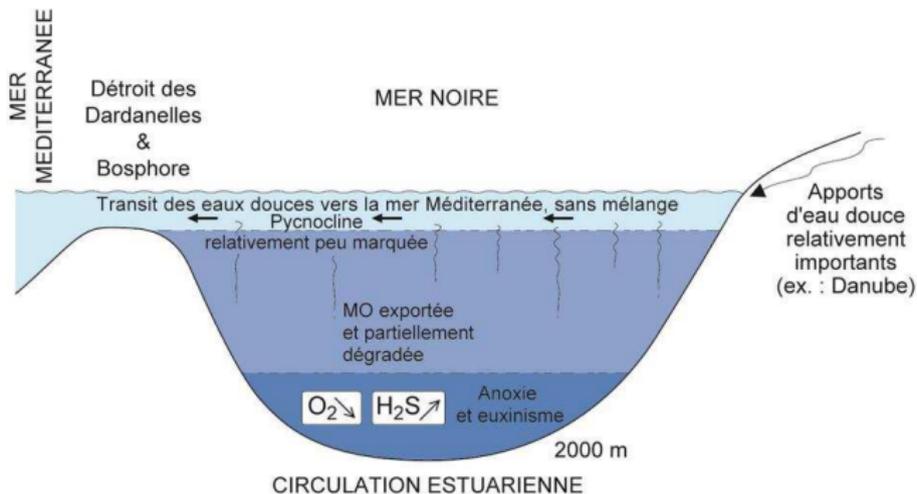


Stockage de matière organique en milieu marin

Exemple du modèle euxinique

Preservation model

- ▶ stratification importante des eaux dans bassins (semi-)fermés
- ▶ eaux de fond anoxiques et euxiniques

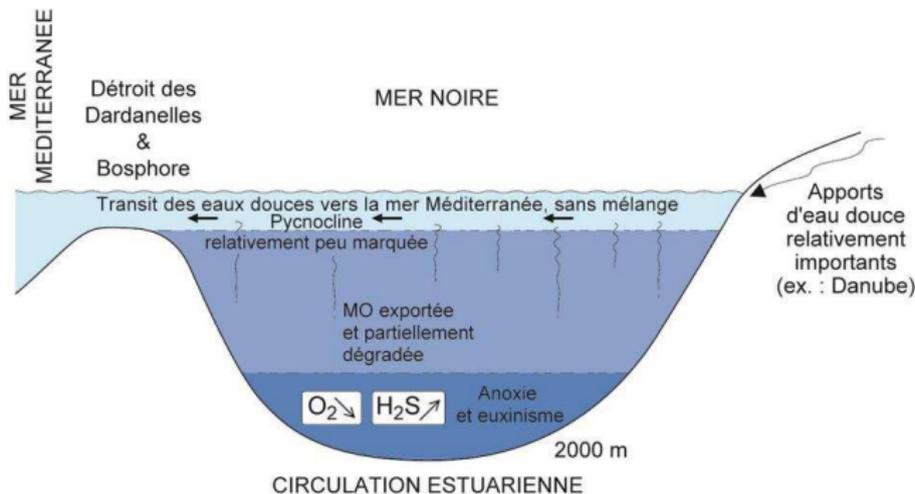


Stockage de matière organique en milieu marin

Exemple du modèle euxinique

Preservation model

- ▶ stratification importante des eaux dans bassins (semi-)fermés
- ▶ eaux de fond anoxiques et euxiniques

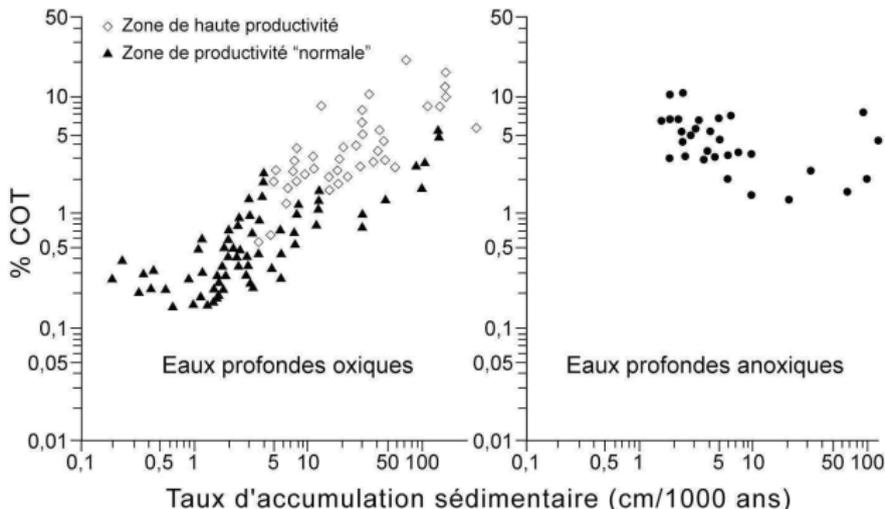


Zone anoxique ⇒ Préservation de la MO

Stockage de matière organique en milieu marin

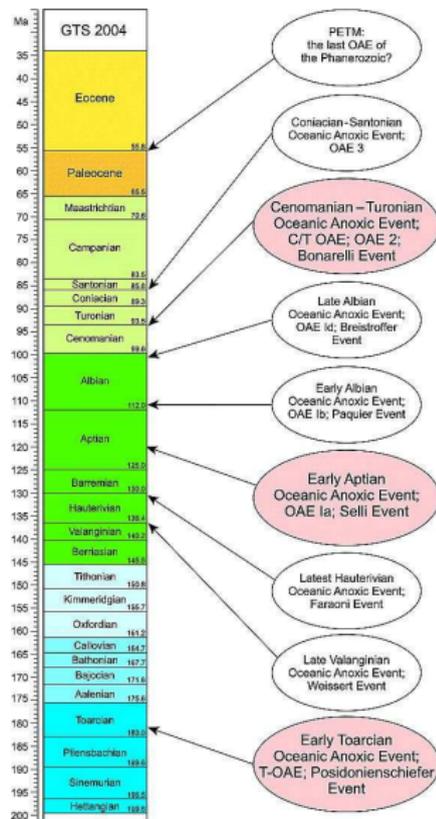
Influence du taux de sédimentation

- ▶ accélération du transit vers le fond
- ▶ favorise la préservation de la MO
- ▶ négligeable en conditions anoxiques



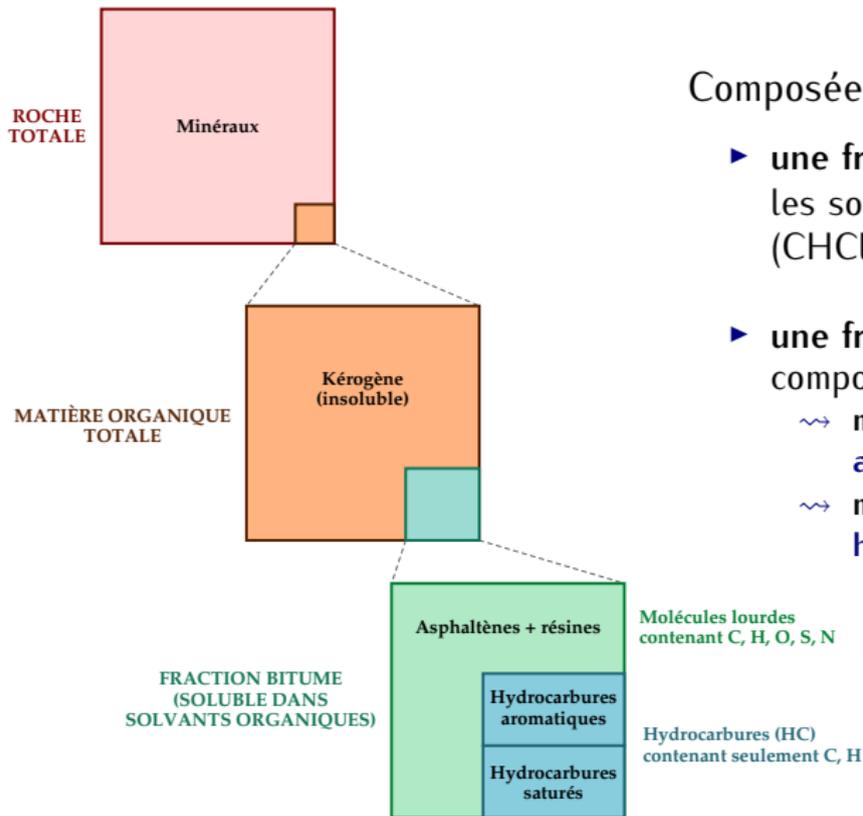
Stockage de MO au cours du temps

- ▶ périodes propices au stockage de MO
- ▶ formation de roches carbonées
 - ↪ **Sapropèle** : sédiments pélagiques riches en MO algair
 - ↪ **Black Shale** : Dépôt sédimentaire (argilite) riche en MO, sombre et laminé



1. Cycle biologique du carbone organique
2. Cycle sédimentaire du carbone organique
3. Gisements et exploitation

Matière organique sédimentaire



Composée d' :

- ▶ une fraction insoluble dans les solvants organiques (CHCl_3 , CH_2Cl_2) **le kérogène**
- ▶ une fraction soluble **le bitume** composé de :
 - ↪ molécules hétéro-atomiques **asphaltènes et résines**
 - ↪ molécules volatiles **hydrocarbures**

Retour aux bases : les définitions

Roche carbonée

Roche biogénique résultant de l'**accumulation**, de l'**enfouissement** et de la **transformation** de sédiments riches en matière organique d'origine végétale ou animale

Charbons

solide



Laurie Bougeois - collection ENS Lyon

Pétroles

visqueux, liquide, gaz



Photographie : Jean-Jacques Arina

Retour aux bases : les définitions

Roche carbonée

Roche biogénique résultant de l'**accumulation**, de l'**enfouissement** et de la **transformation** de sédiments riches en matière organique d'origine végétale ou animale

Charbons

solide

Schiste

bitumineux

Pétroles

visqueux, liquide, gaz

Schiste bitumineux : roche ni schisteuse, ni bitumineuse mais laminée et suffisamment enrichies en MO (15-50% de C_{org}) pour produire des huiles mais n'ayant pas été assez enfouies pour produire des hydrocarbures.



Charbons

Charbon

Roche sédimentaire carbonée contenant **au moins 50% de carbone** combustible et résultant de la carbonisation de la matière organique (végétaux *supérieurs* ou algues)

Charbon humique

végétaux sup.

>90%

Charbon sapropélique

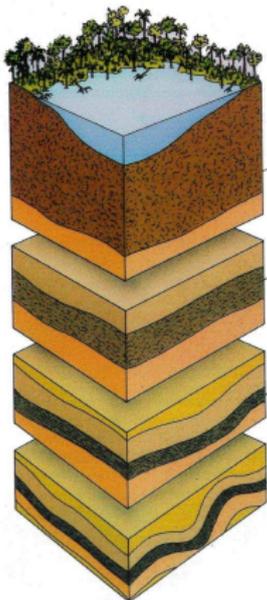
algues

<10%

Charbons

Charbon

Roche sédimentaire carbonée contenant **au moins 50% de carbone** combustible et résultant de la carbonisation de la matière organique (végétaux *supérieurs* ou algues)



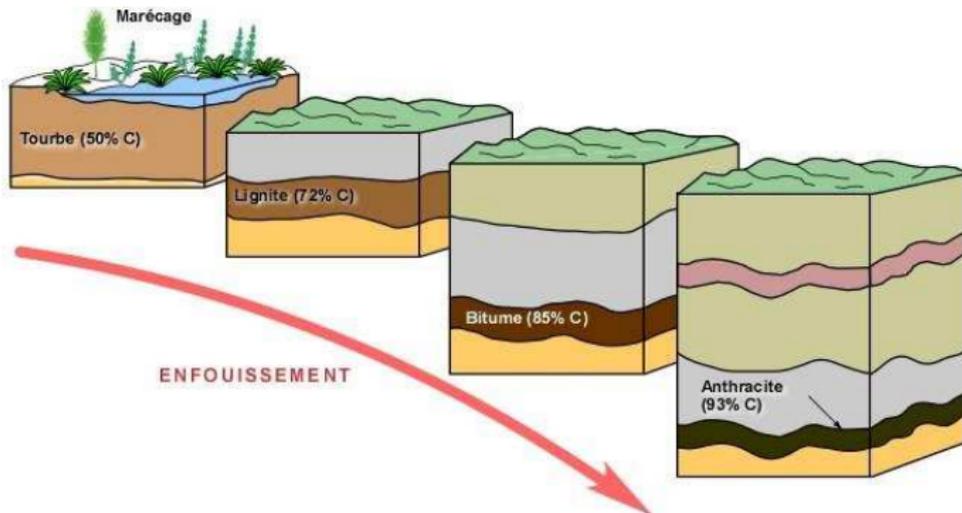
- ▶ **Tourbe**
50% C
- ▶ **Lignite**
70% C
- ▶ **Houille**
80-85% C
- ▶ **Anthracite**
90-95% C



Charbons

Charbon

Résidus de l'évolution physico-chimique de débris végétaux au cours de l'enfouissement et de la diagenèse



- ▶ rangs successifs des charbons (tourbe \Rightarrow anthracite) obtenus par **dégradation** puis **carbonification** (houillification) de la MO

Charbons - Formation

- ▶ **Dégradation** : ensemble de réactions chimiques et biochimiques complexes, qui se déroulent dans les premiers stades d'évolution (tourbe ⇒ lignite).
 - ↪ **humification** : transformation des composées organiques en acides (s'accompagne d'une perte de 70 à 90% d'eau)
Lignite → **acide humique** Cellulose → **acide fulvique**
 - ↪ **gélification** : transformation sous forme colloïdale des acides humiques

Charbons - Formation

- ▶ **Carbonification** : ensemble des réactions chimiques et biochimiques complexes, qui s'effectuent en profondeur, à l'abri de l'air et qui conduisent à un enrichissement en carbone et à un appauvrissement en éléments volatils (H, O, N) par formation de gaz.

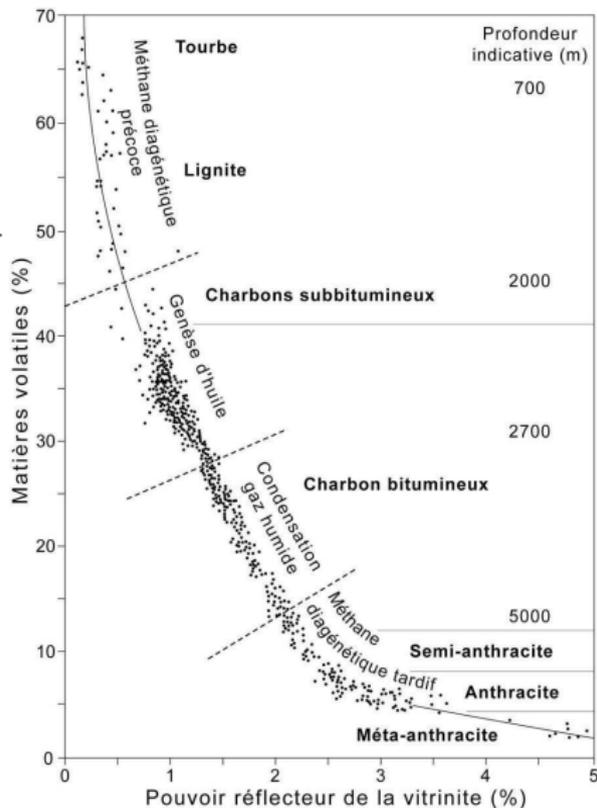
	%C	%H	%O	%H ₂ O
Bois	50	6	43	
Tourbe	50-60	6	34-39	75
Lignite	65-70	5	25-39	35-10
Houille	80-85	5	6-14	
Anthracite	90-95	3	2-3	
Graphite	100			

Charbons - Formation

► Carbonification :

- ↪ **vitrite** : groupe macéral dérivant de débris ligno-cellulosique
- ↪ **pouvoir réflecteur de la vitrite** : mesure du % de lumière réfléchi par des particules de vitrite, qui permet de déterminer le rang des charbons.

	Matières volatiles	Pouvoir réflecteur	Pouvoir calorifique (kcal/kg)
Bois			
Tourbe	60-70	0.1-0.2	1000
Lignite	40-50	0.3-0.6	1000-3500
Houille	40-10	0.7-2.5	2000-7000
Anthracite	<10	2.5-5	8500
Graphite	0	11	



Gisements de charbons



Pétroles

Pétrole

Mélange complexe d'hydrocarbures présents sous 3 formes.

Bitume

visqueux

Huile

liquide

Gaz

sec ou humide

- ▶ pétrole bruts essentiellement composés de H et de C

%C	%H	%O	%N	%S
80-90	10-14	0-2	0-1	0-3

- ▶ **gaz secs** (CH_4 ou C_2H_6) généralement associés aux **charbons** alors que les **gaz humides** (C_3H_8 ou C_4H_{10}) associés aux **pétroles**

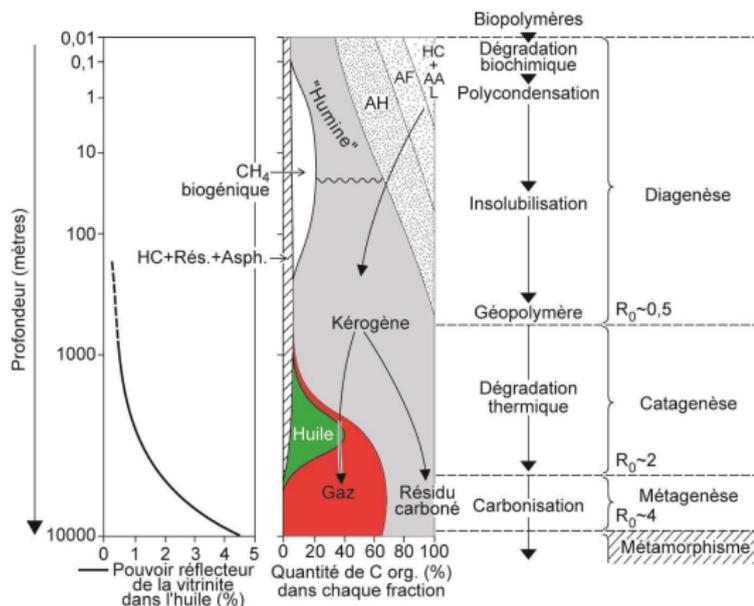
Pétroles - Formation

Pétrole

Produits, résultant de la transformation de la MO (plancton) par **dégradations biochimiques** (microbiennes) puis **thermiques**.

- ▶ **1. Diagenèse (10-80°C)**
⇒ dégradations biochimiques appauvrissent la MO en O_2 par expulsion de CO_2 , H_2O

- ↪ polymérisation de la MO
- ↪ perte de fonction ($COOH$, NH_2)
- ↪ formation de CH_4

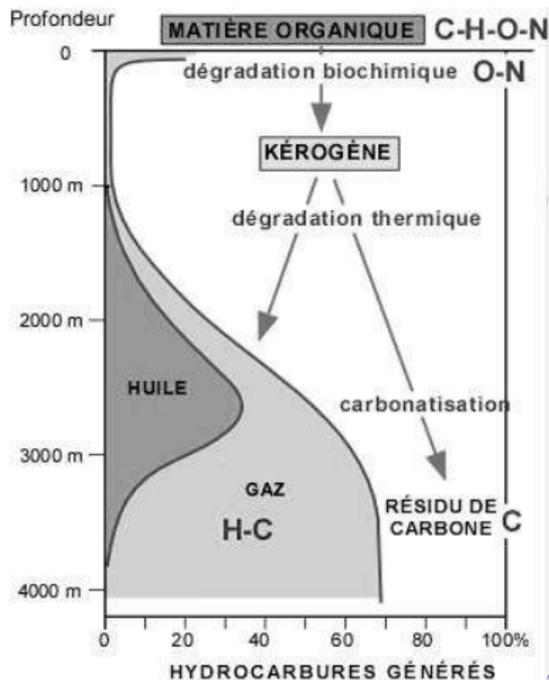


Pétroles - Formation

► 2. Catagenèse (80-120°C)

⇒ hydrocarbures produits par dégradation thermique (craquage) du kérogène (appauvrissement progressif en H)

- ↪ **Craquage primaire** : Formation des HC lourds aromatiques liquides
- ↪ **Craquage secondaire** : Formation des HC légers, saturés, gazeux
- ↪ **Fenêtre à huile** : domaine de T°C compris entre 70 et 100°C (prof 2-3 km) dans lequel se forme l'huile
- ↪ **Fenêtre à gaz** : domaine de T°C compris entre 120 et 200°C (prof > 3 km) dans lequel se forme le gaz (humide puis sec)

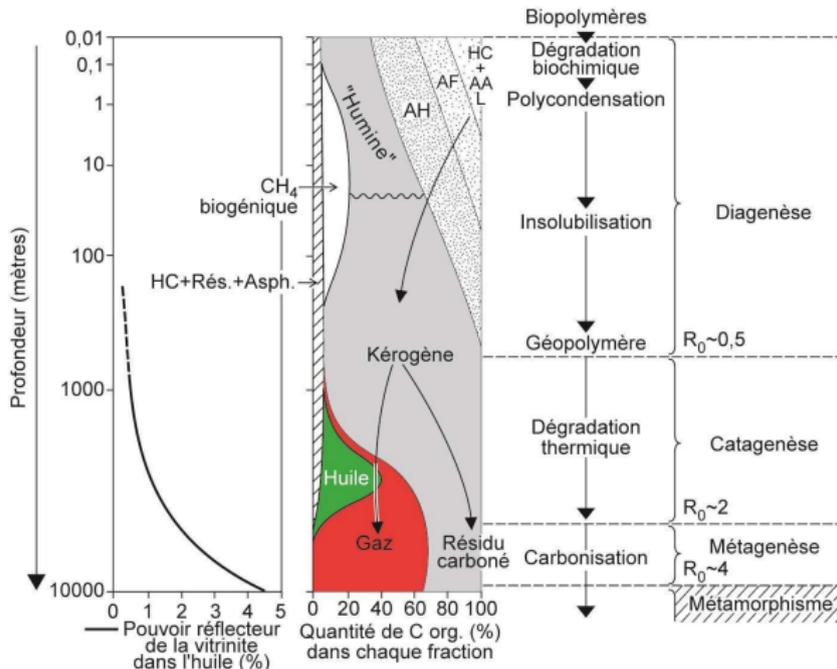


Pétroles - Formation

► 3. Méthagenèse (120-200°C)

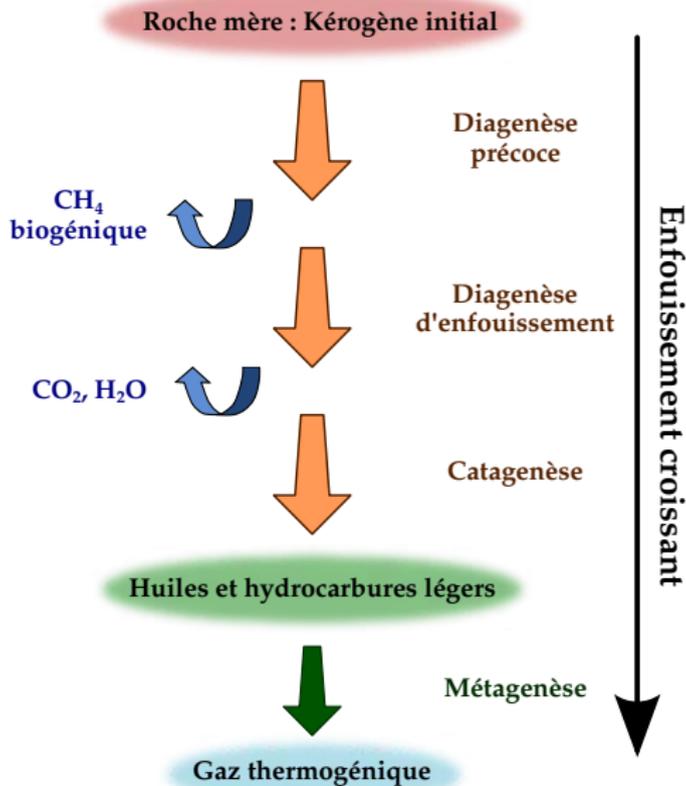
⇒ production de gaz par dégagement d'H

⇒ résidu s'enrichit en C



Pétroles - Formation

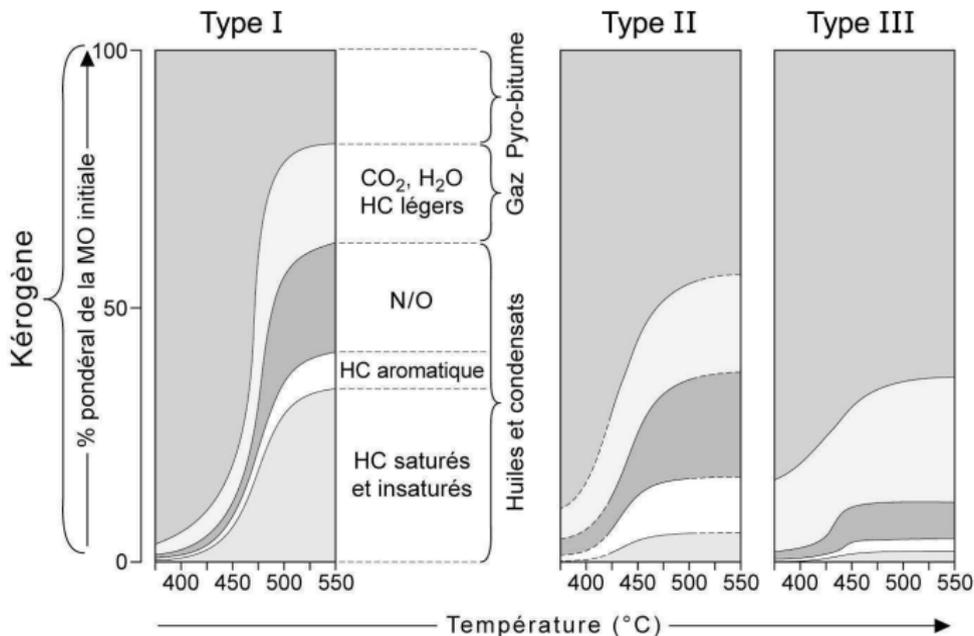
► Synthèse



Pétroles - Formation

► Synthèse

⇒ au cours la maturation thermique, chaque type de MO est caractérisé par des proportions différentes des produits libérés (HC et gaz)

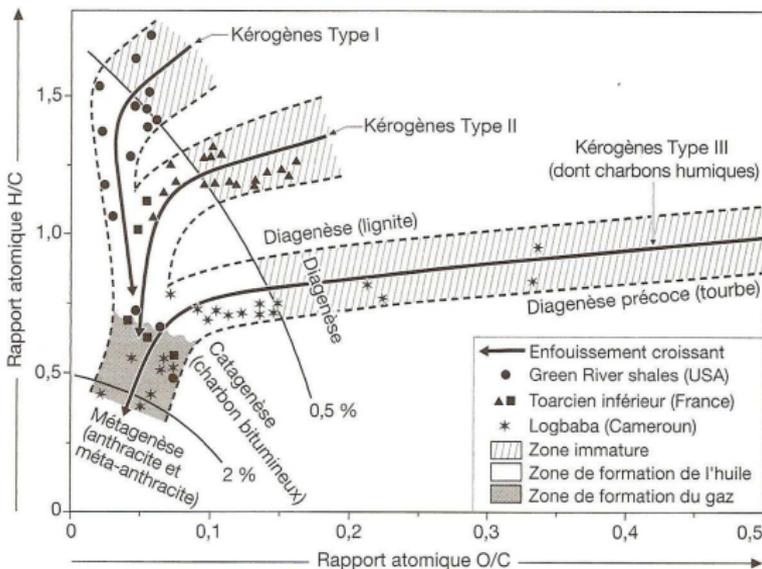


Pétroles - Formation

► Synthèse

⇒ au cours la maturation thermique, chaque type de MO est caractérisé par des proportions différentes des produits libérés (HC et gaz)

DIAGRAMME DE VAN KREVELEN
EVOLUTION DES RAPPORTS H/C ET O/C DES TROIS TYPES DE KÉROGÈNES



Pétroles - Formation

► Synthèse

⇒ utilisation comme combustibles fossiles

Type de MO	Qualité (rendement)	Concentration (C_{org})	Matériau utile
Type I Planctonique – Lacustre	Excellente	15 - 40 %	Schistes bitumineux de haute qualité
	>600 mg/g	Souvent forte 5 à 15%	Excellente roche-mère
Type II Planctonique – Marine	Bonne	10 – 20 %	Schistes bitumineux de basse qualité
	≈ 400 mg/g	2 – 10%	Roche-mère typique
Type III Végétal sup. - Continentale	Médiocre	40 – 80 %	Charbon
	≈ 200 mg/g	0.5 – 2%	Roche-mère médiocre
Type IV Résiduelle – Altérée	Très faible ≈ 0 mg/g	0 – 0.5 %	

1. Cycle biologique du carbone organique
2. Cycle sédimentaire du carbone organique
- 3. Gisements et exploitation**

Gisements pétroliers

- Constitution d'un gisement pétrolier nécessite une configuration géologique bien particulière

Production

Migration

Accumulation

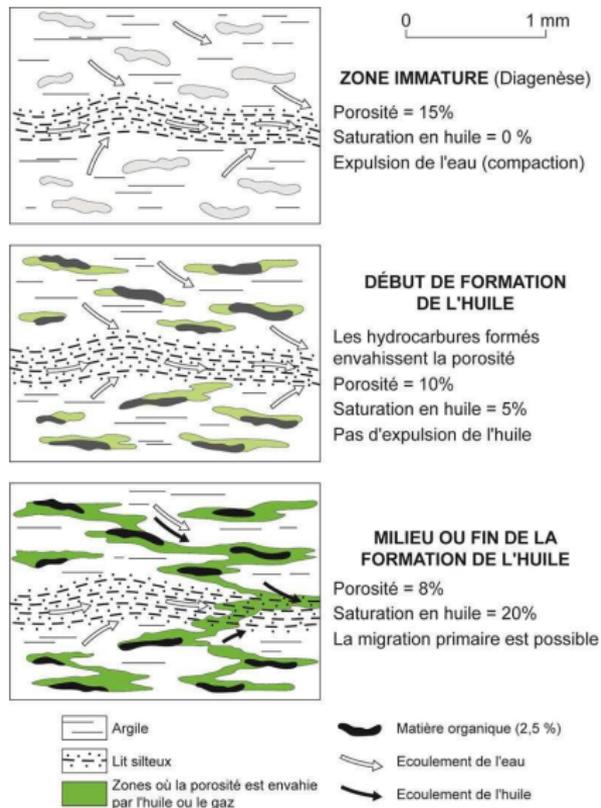
Concentration



Gisements pétroliers

1. Production

- ▶ **Roche-mère** : roche sédimentaire à grains fins (généralement argileuse) riche en MO, qui va générer des hydrocarbures



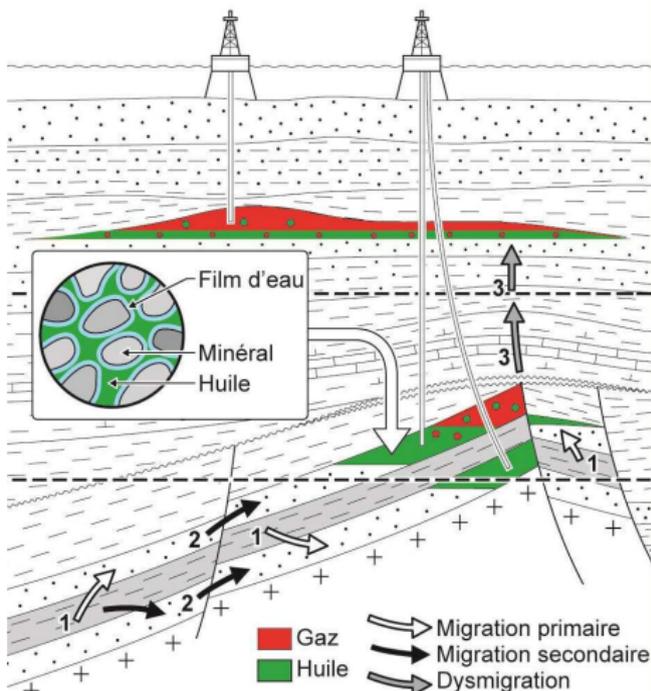
Gisements pétroliers

2. Migration

- ▶ 3 étapes
 - ↪ 1. expulsion hors de la roche mère par compaction
 - ↪ 2. cheminement jusqu'au réservoir par gravité
 - ↪ 3. échappement hors du réservoir (fuite)

3. Accumulation

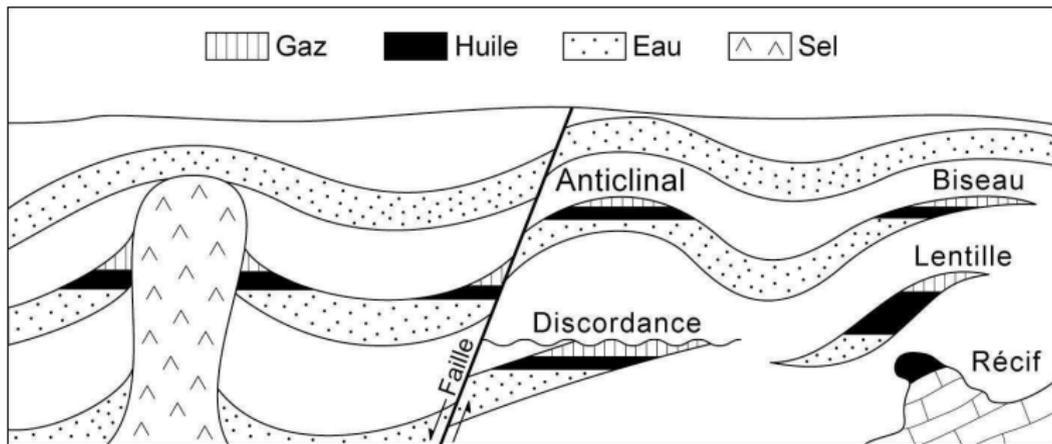
- ▶ Migration secondaire ⇒ Fuite



Gisements pétroliers

4. Concentration

- ▶ Pétrole stocké et concentré dans le réservoir par la présence d'
 - ↪ une **roche-barrière** : roche sédimentaire imperméable (argiles, évaporite), capable de stopper la migration du pétrole
 - ↪ un **piège à pétrole** : structure sédimentaire ou tectonique fermée dans laquelle les HC vont s'accumuler



Réserves mondiales

Définition

- ▶ **Ressources** : quantité totale de combustibles fossiles en place dans la croûte terrestre
- ▶ **Réserves** : quantité de combustibles fossiles récupérables et commercialisables dans les conditions technico-économiques actuelles

