



Exemple du pétrole

LES COMBUSTIBLES FOSSILES

1. PETROLE, HUILE, GAZ

- 1. 1. Pétroles, huiles et asphaltes
- 1. 2. Gaz

2. DE LA MATIERE ORGANIQUE AU PETROLE

- 2. 1. Le cycle du carbone
- 2. 2. La formation du kérogène
 - 2. 2. 1. La matière organique dans l'eau et les sédiments
 - 2. 2. 2. Conservation de la matière organique carbonée
- 2. 3. La transformation du kérogène en pétrole
 - 2. 3. 1. Définition du kérogène et influence de la MO d'origine
 - 2. 3. 2. Influence de la température et de la pression
 - 2. 3. 3. Les événements anoxiques océaniques
 - 2. 3. 4. Des fossiles moléculaires dans le pétrole

3. ACCUMULATION DU PETROLE

- 3. 1. Migrations
 - 3. 1. 1. Migration primaire, expulsion de la roche-mère
 - 3. 1. 2. Migration secondaire, stockage dans la roche-réservoir
- 3. 2. Les pièges à pétrole

DEFINITION DES PETROLES

Le pétrole est un mélange naturel d'hydrocarbures qui se forme au sein de roches sédimentaires (les roches mères) à partir de la transformation de matière organique.

D'un gisement à un autre, le pétrole n'a pas les mêmes constituants.

QUELQUES CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES PETROLES

Les pétroles les plus courants sont liquides/huileux.

Leur densité varie de 0,6 à 0,9.

Leur viscosité s'apparente à celle du miel.

Les molécules du pétrole sont immiscibles dans l'eau

LA COMPOSITION ELEMENTAIRE DES PETROLES

La composition élémentaire des pétroles est la suivante (en % de masse d'élément)

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

Composition élémentaire comparée entre monde minéral, animal(corps humain) et végétal (luzerne)

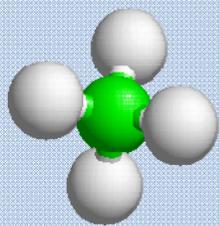
D'après JC Callen, Biologie cellulaire, Dunod, 1999

AMOSPHERE HYDROSPHERE LITHOSPHERE (% de masse)		CELLULE ANIMALE (% de masse)		CELLULE VEGETALE (% de masse)	
O	50%	O	62,5%	O	77,9%
Si	25,8%	C	19,4%	C	11,3%
Al	7,3%	H	9,3%	H	8,7%
Fe	4,2%	N	5,1%	N	0,8%
Ca	3,2%	Ca	1,38%	P	0,7%
Na	2,3%	S	0,64%	Ca	0,58%
K	2,3%	P	0,63%	K	0,22%
Mg	2,1%	Na	0,26%	S	0,1%
H	0,9%	Cl	0,18%	Cl	0,07%
Ti	0,43%	Mg	0,04%	Na	0,03%
Cl	0,2%	F	0,009%	Si	0,0093%
C	0,18%	Fe	0,005%	Fe	0,0027%

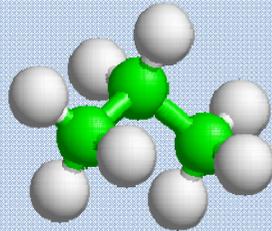
LA COMPOSITION MOLECULAIRE DES PETROLES : LES HYDROCARBURES (contiennent du C et H)

HYDROCARBURES DU GAZ NATUREL

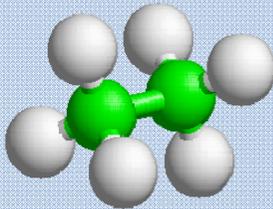
Méthane



Propane



Ethane



HYDROCARBURES SATURES LINEAIRES = PARAFFINES

À chaîne droite:



Alcane

À chaîne branchée:



Iso-Alcane

À chaîne branchée
de CH₃ tous les 4
atomes de carbone

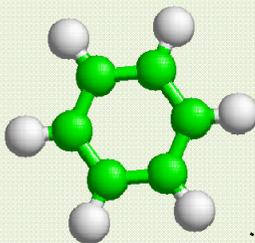


Isoprénoïde

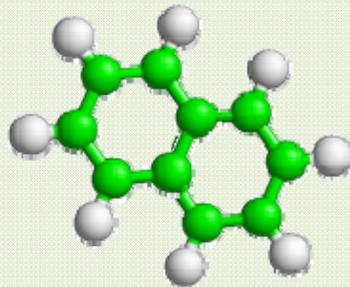
Origine biologique

HYDROCARBURES AROMATIQUES

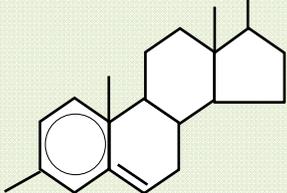
Benzène



Naphtalène

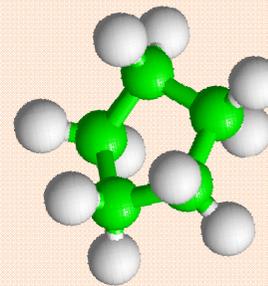


Stéroïde mono-aromatique

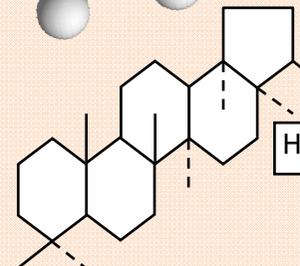


HYDROCARBURES SATURES CYCLIQUES = NAPHTENES

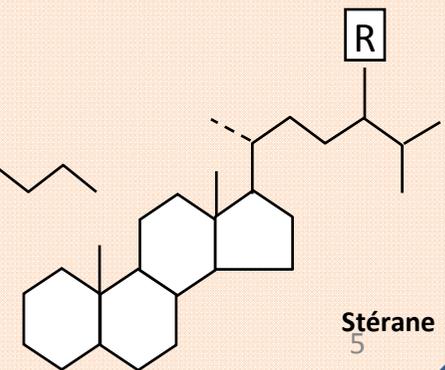
Cyclopentane



Hopane

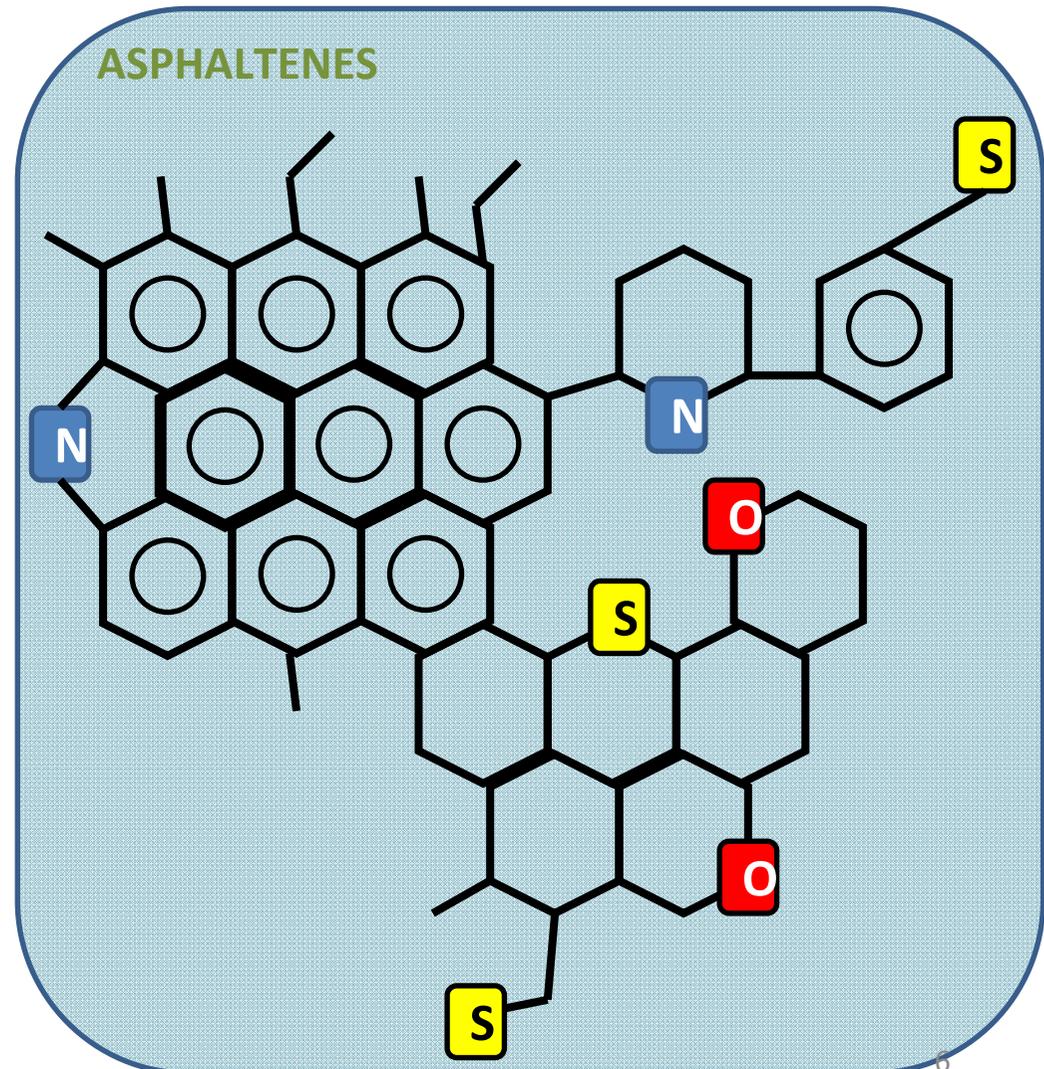
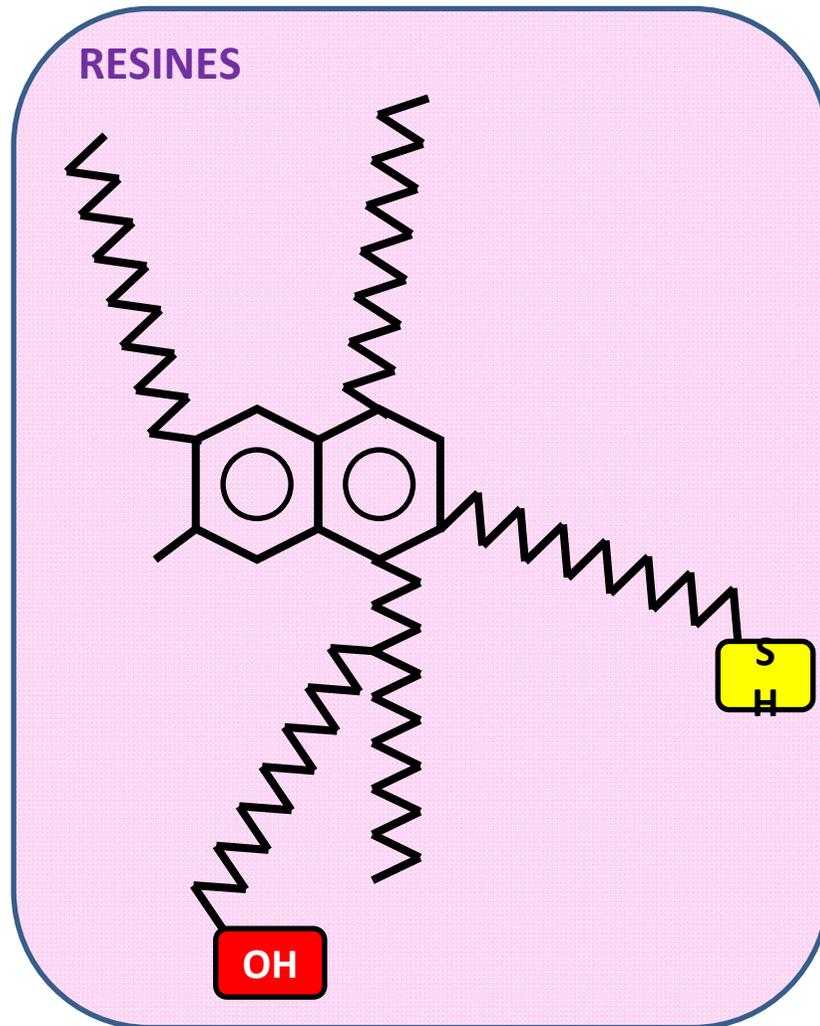


Stérane



LA COMPOSITION MOLECULAIRE DES PETROLES : MOLECULES HETERO-ATOMIQUES

(contiennent du C, H, N, S et O)



LA COMPOSITION MOLECULAIRE DES PETROLES

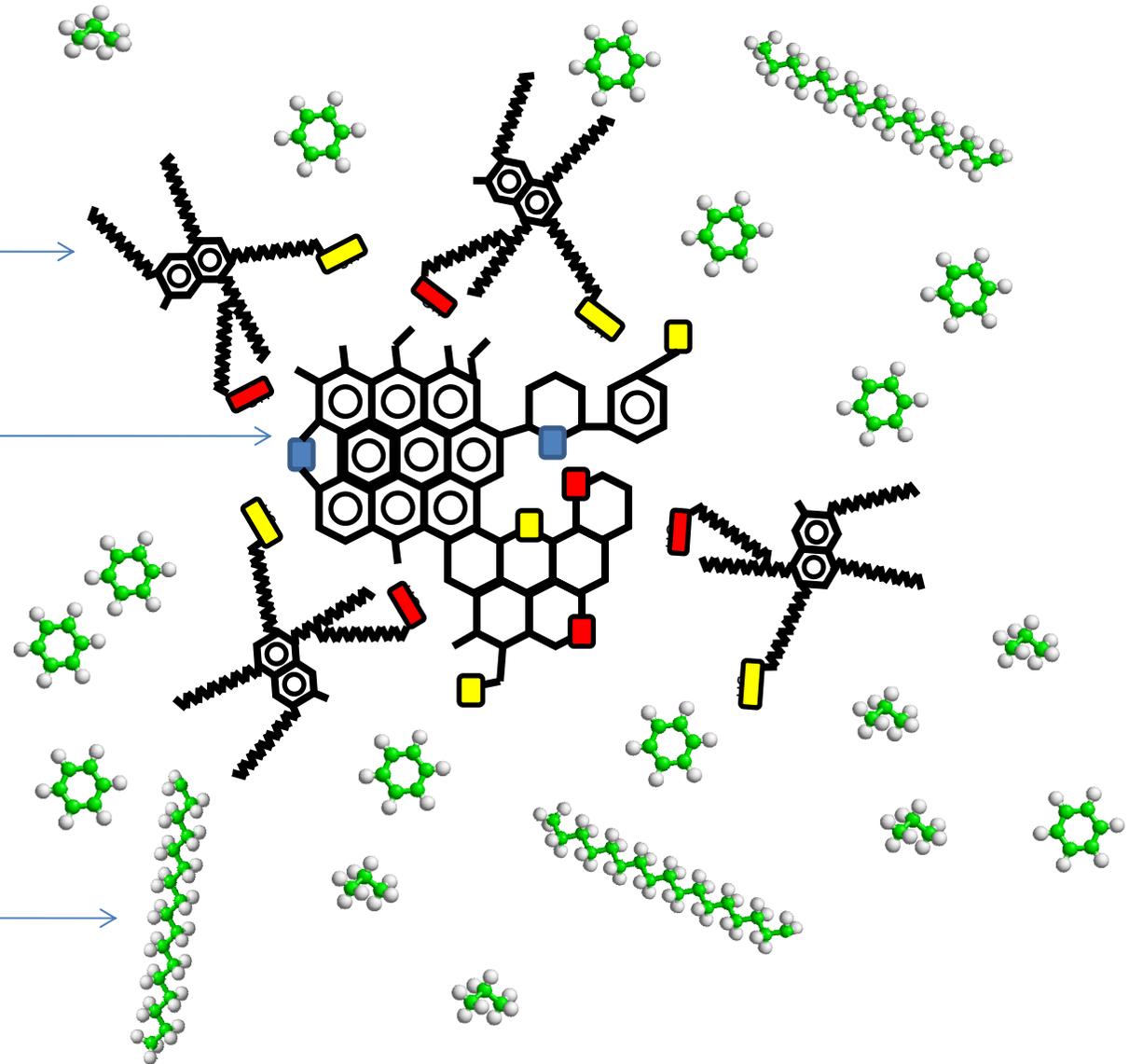
Dans le pétrole,

les **résines**

maintiennent
les **asphaltènes**
en solution :

elles font le lien avec
les **hydrocarbures**
aromatiques

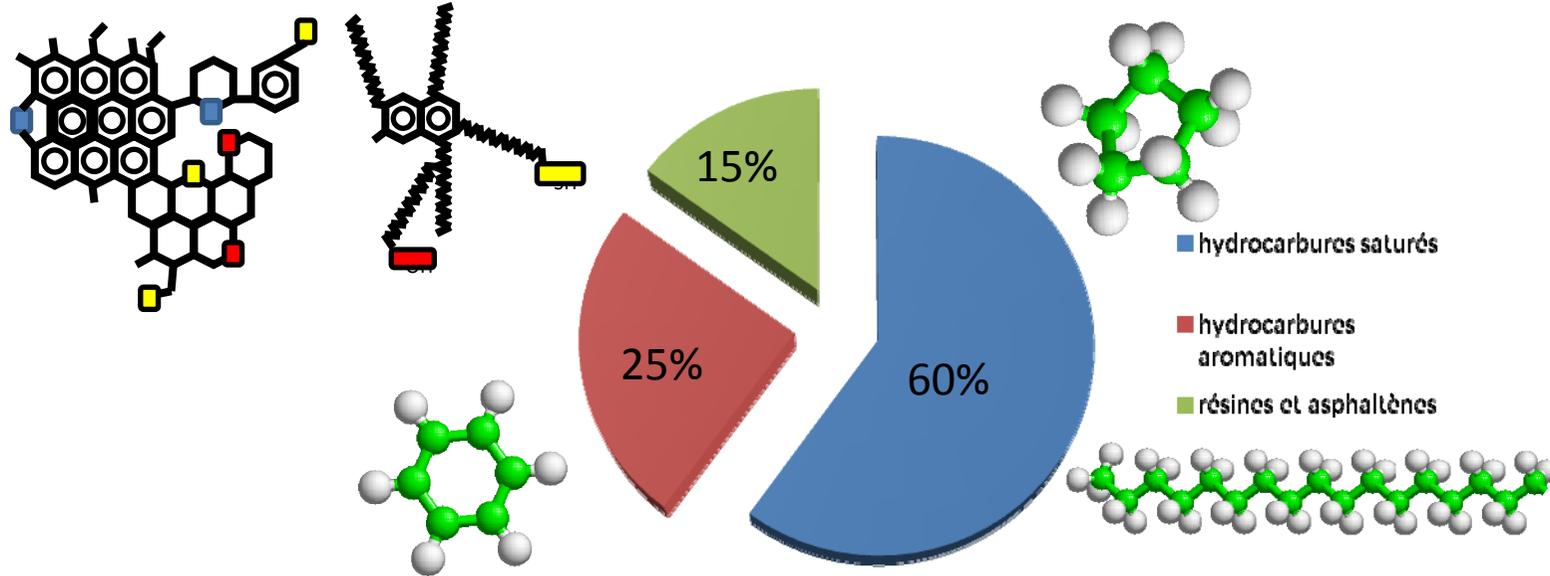
Et les
Hydrocarbures
paraffiniques



1. PETROLE, HUILE, GAZ > 1.1 Pétroles, huiles et asphaltes

LES CATEGORIES DE PETROLES :

LA COMPOSITION DU PETROLE:



COULEUR	APELLATION	DENSITE	% RESINES ET ASPHALTENES	
Transparent-brun	Pétrole léger	0,75	5	
Rouge-noir	Pétrole courant	0,85	15	
Noir	Huile lourde	0,95	25	} Pétroles non conventionnels
Noir	Huile extralourde	1	35	
Noir	Asphalte=bitume	1,1	50	

HYDROCARBURES DU GAZ NATUREL

Le gaz naturel a la même origine que le pétrole
La composition moléculaire du gaz naturel :

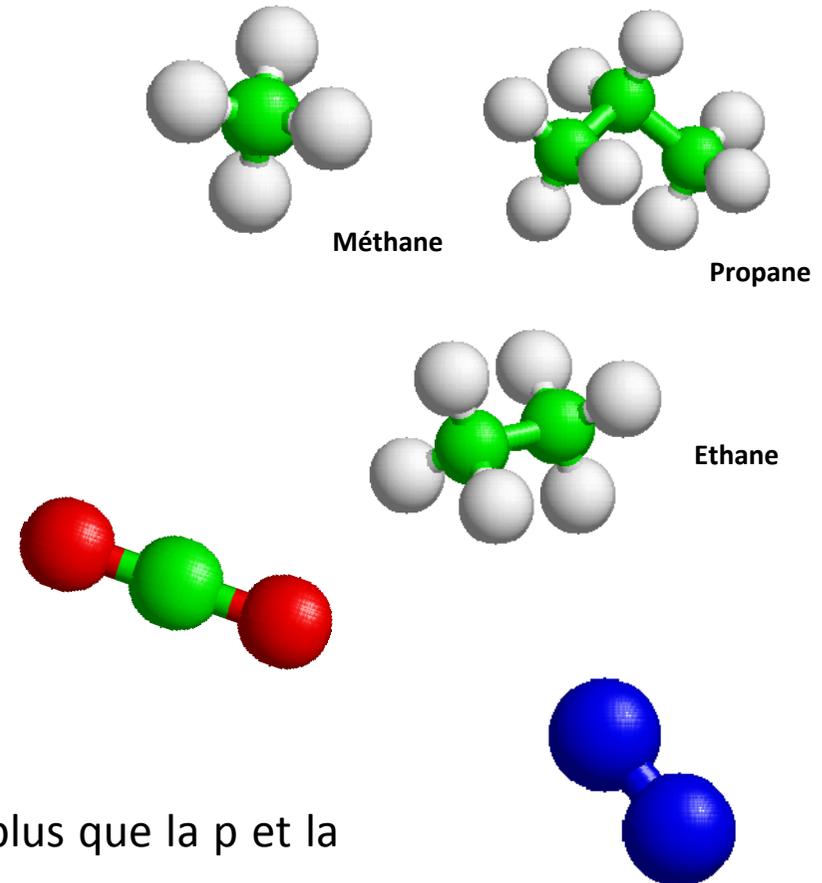
- Méthane**
- Éthane**
- propane**

Les gisements de gaz peuvent renfermer des quantités de

- diazote**
- dioxyde de carbone**
- d'hydrogène sulfuré**

Pétrole et gaz naturel sont solubles (d'autant plus que la p et la T sont élevées).

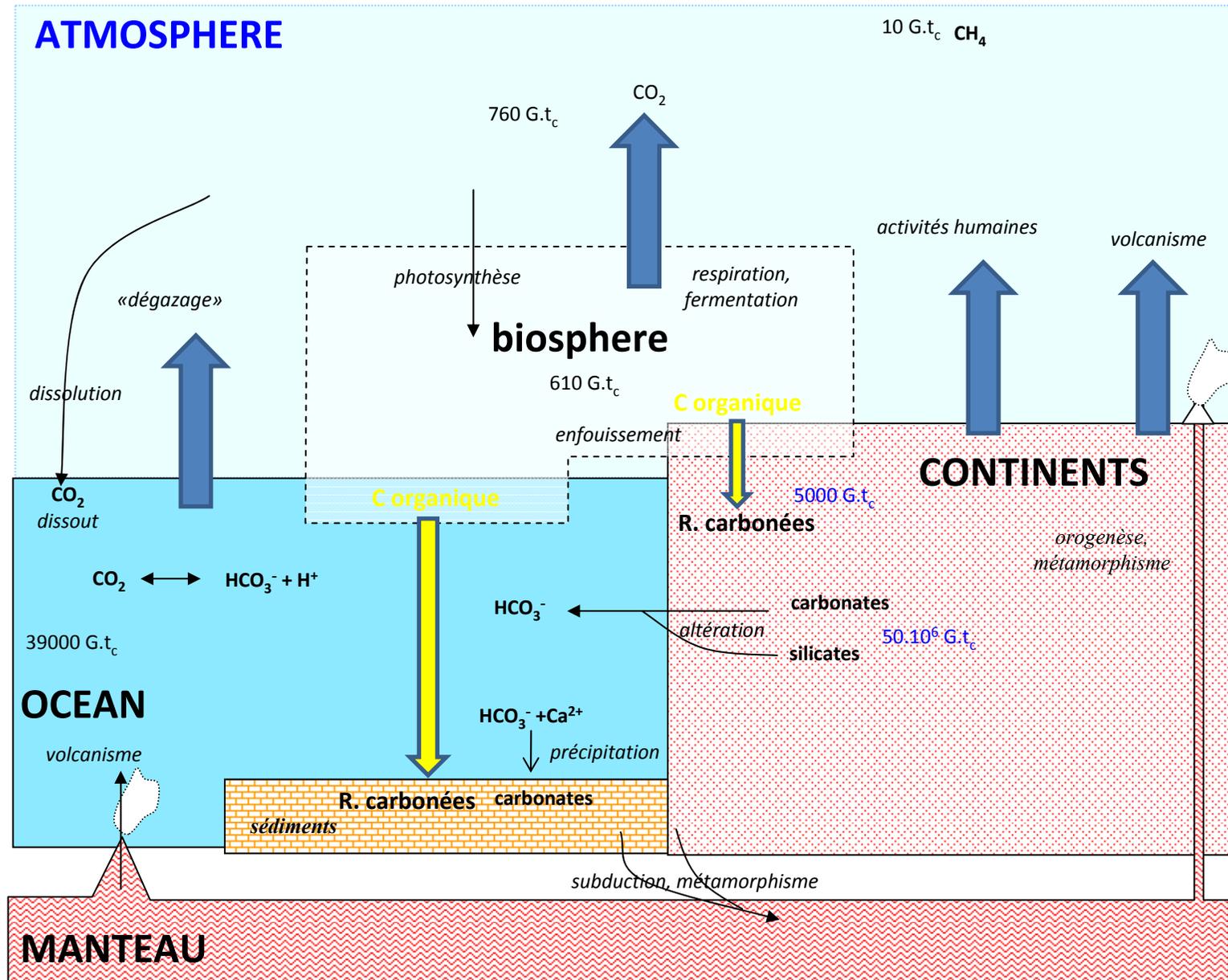
De nombreux gisement de pétrole renferment des quantités de gaz et inversement, des gisements de gaz renferment du pétrole.



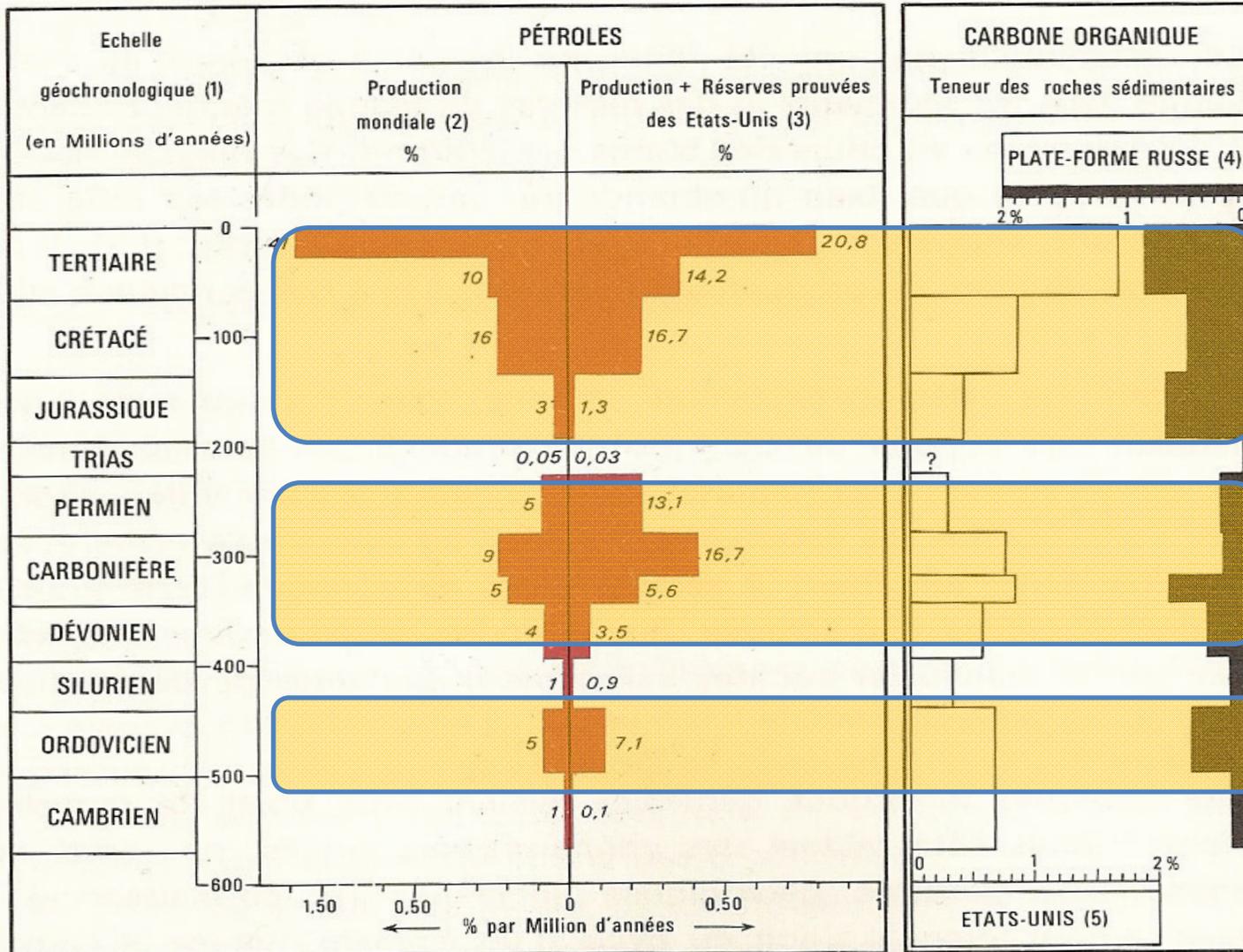
2. DE LA MATIERE ORGANIQUE AU PETROLE > 2.1 Le cycle du carbone

Ce cycle montre le point commun aux différents circuits du cycle du carbone :
L'atmosphère

La teneur en carbone conditionne la température et donc la répartition des êtres vivants.



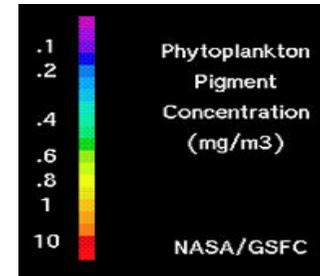
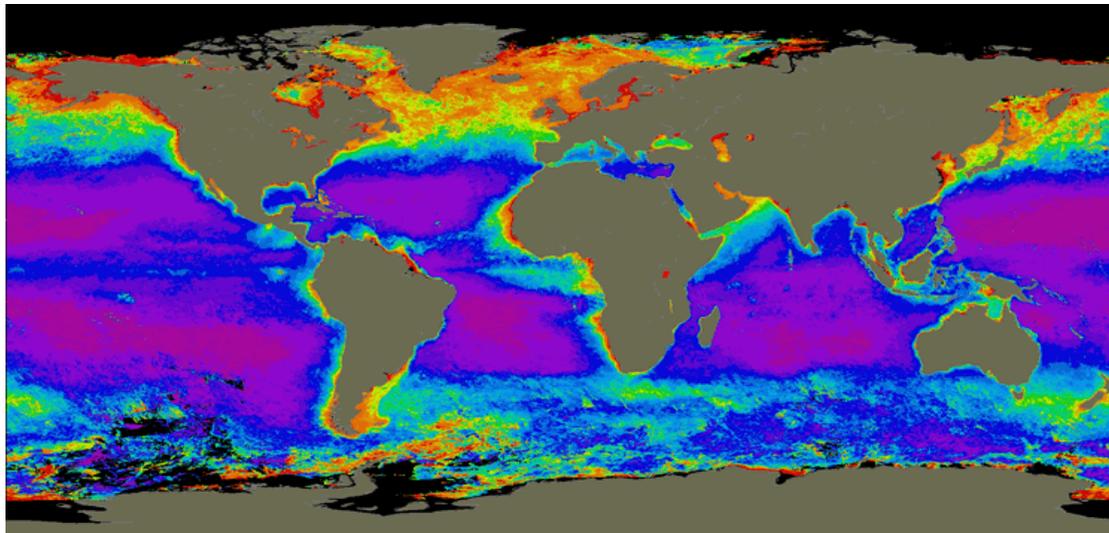
Corrélation entre matière organique dans les roches et production de pétrole



Au cours des temps géologiques, les roches sédimentaires (Russie et états unis) qui contiennent le plus de carbone organique coïncident avec les grandes réserves de pétrole.

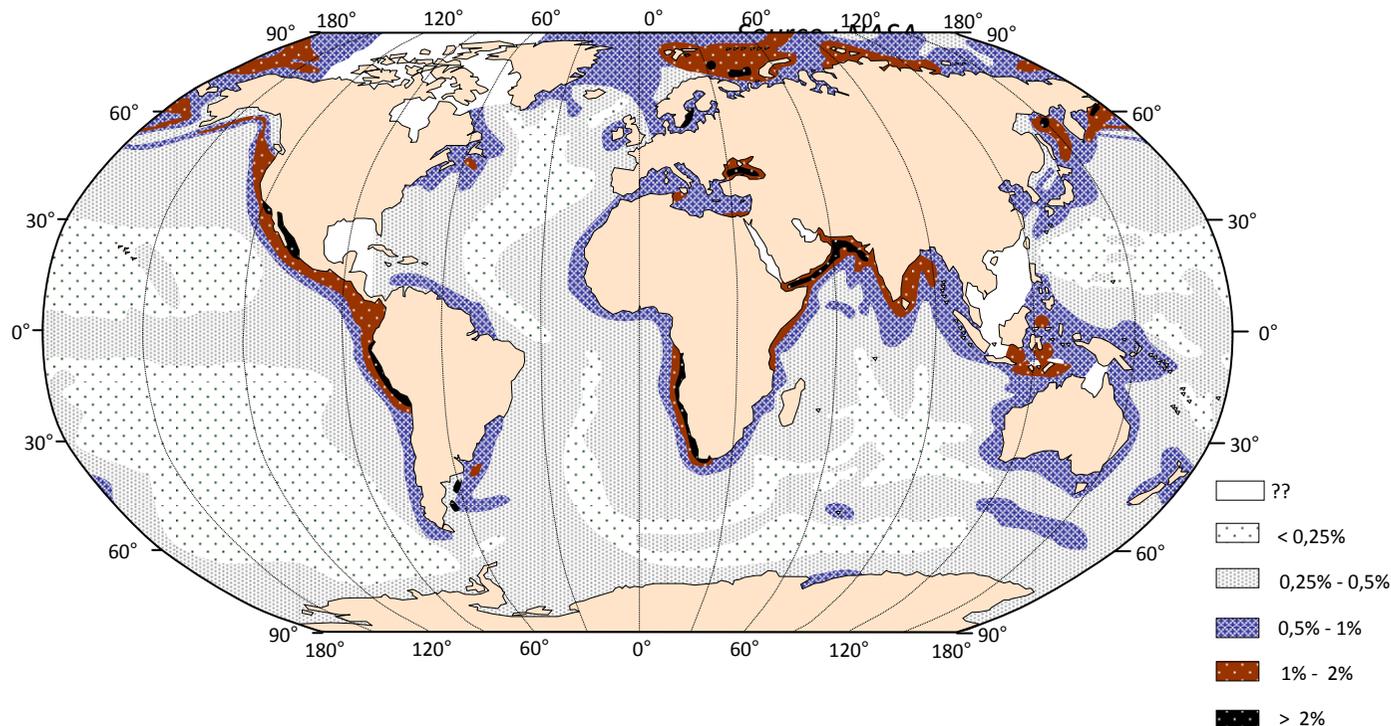
Il es donc intéressant de connaître actuellement les zones de forte productivité primaire afin de comprendre les processus de formation du pétrole.

Principe d'actualisme



D'après la NASA

La productivité primaire des océans a été évaluée en détectant par les satellites, la quantité de chlorophylle présente à la surface.



Carte de la teneur en carbone organique des sédiments marins

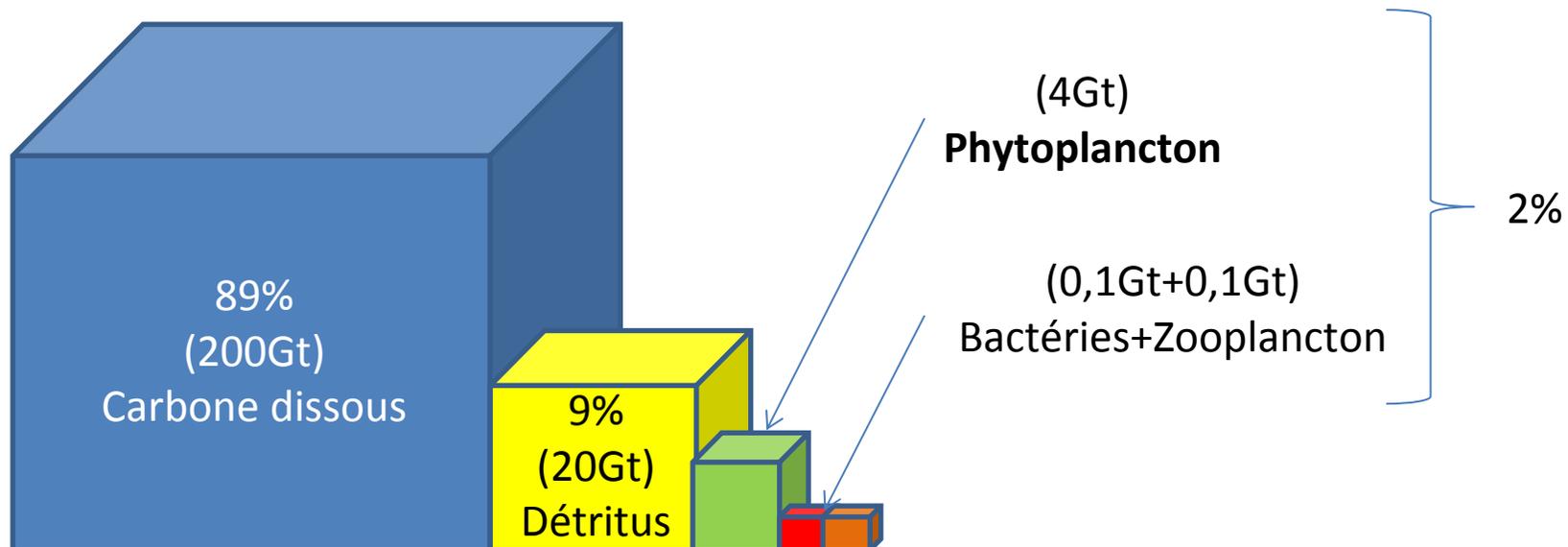
La matière organique est très rapidement recyclée par les décomposeurs mais une partie peut échapper à la dégradation si elle est piégée dans les sédiments qui se déposent au fond des océans.

% de carbone / masse totale de roche sèche

2. 2. 1. La matière organique dans l'eau et les sédiments

La MO vivante représente environ 2% du carbone organique des océans

Le phytoplancton représente l'essentiel de cette biomasse

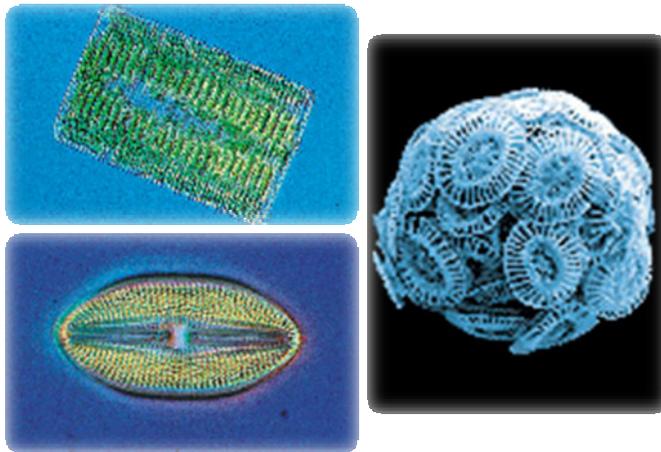


2. 2. 1. La matière organique dans l'eau et les sédiments

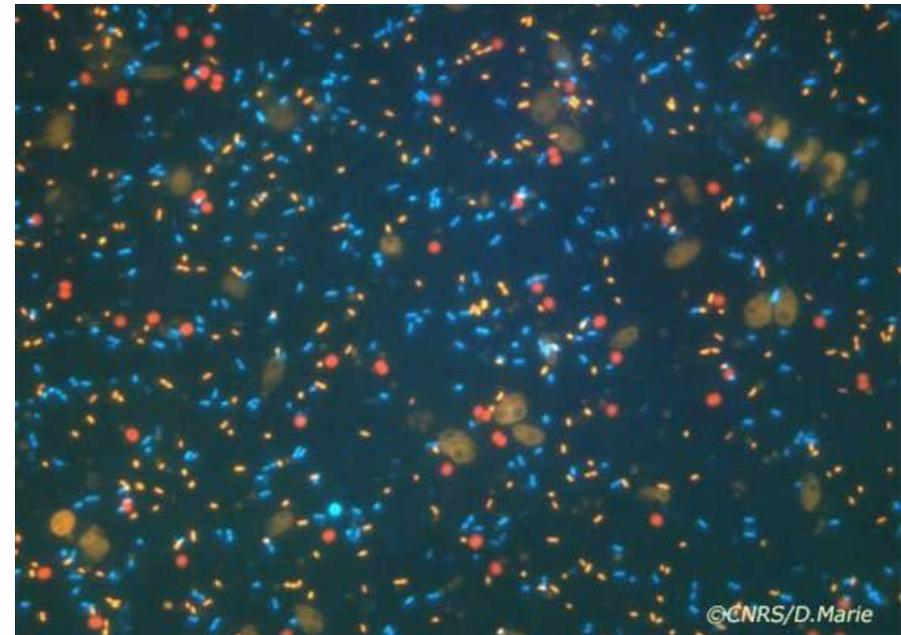
Le **phytoplancton** est à l'origine de la productivité primaire des océans.

Il se compose de :

- Picoplancton (bactéries et cyanobactéries)
- D'algues unicellulaires



<http://www.ocean-ocean.org/>



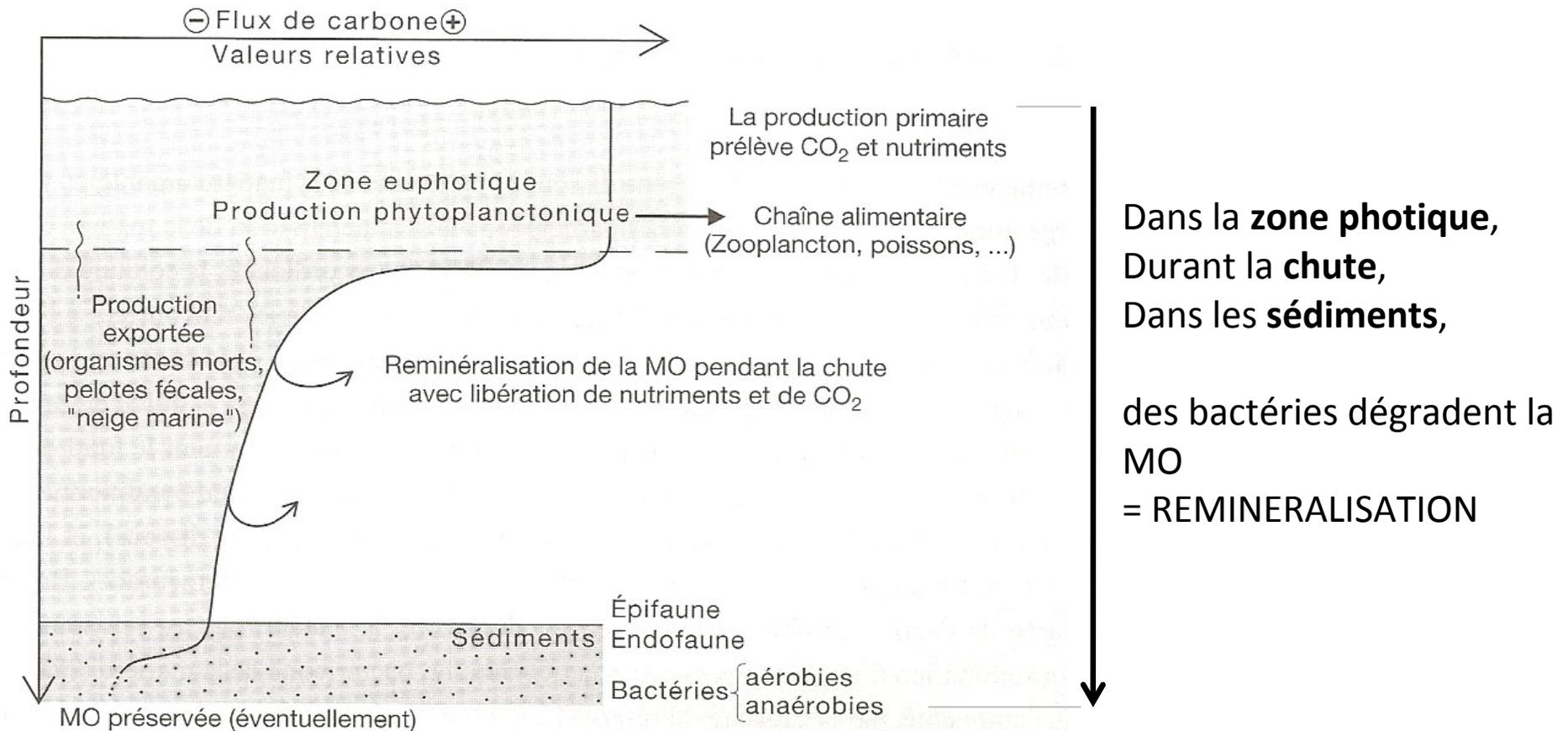
<http://www.marine-genomics-europe.org/gallery/>

Le phytoplancton vit dans la **zone photique** (100m de la surface)

Sa durée de vie moyenne est de **3 semaines** : d'où un renouvellement important...

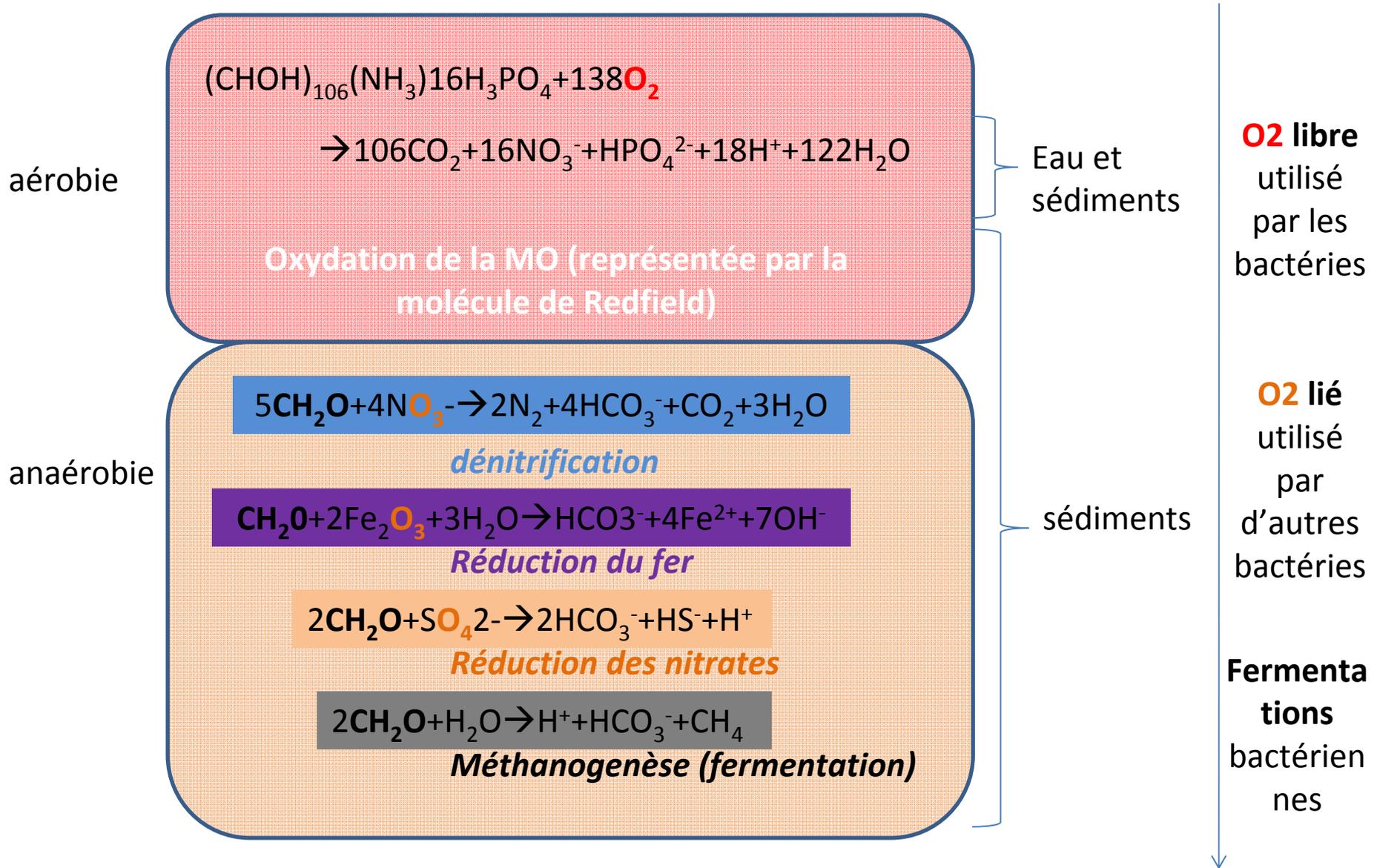
2.2.1. La matière organique dans l'eau et les sédiments

10% de la production dans la zone photique est exportée et peut atteindre les sédiments.



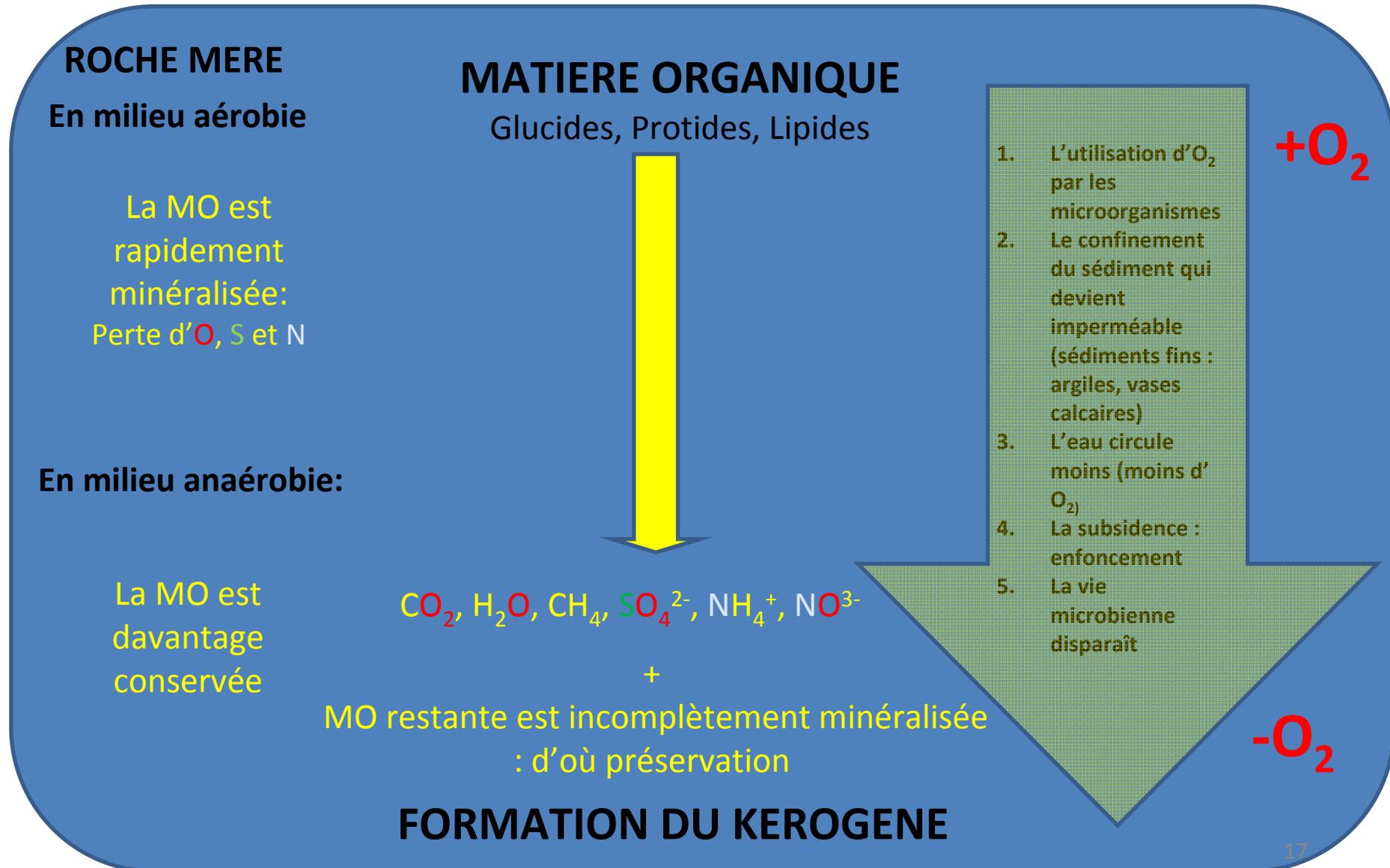
Géologie de la matière organique, F. Baudin, N. Tribovillard, J. Trichet, Vuibert, 2007

2. 2. 1. La matière organique dans l'eau et les sédiments



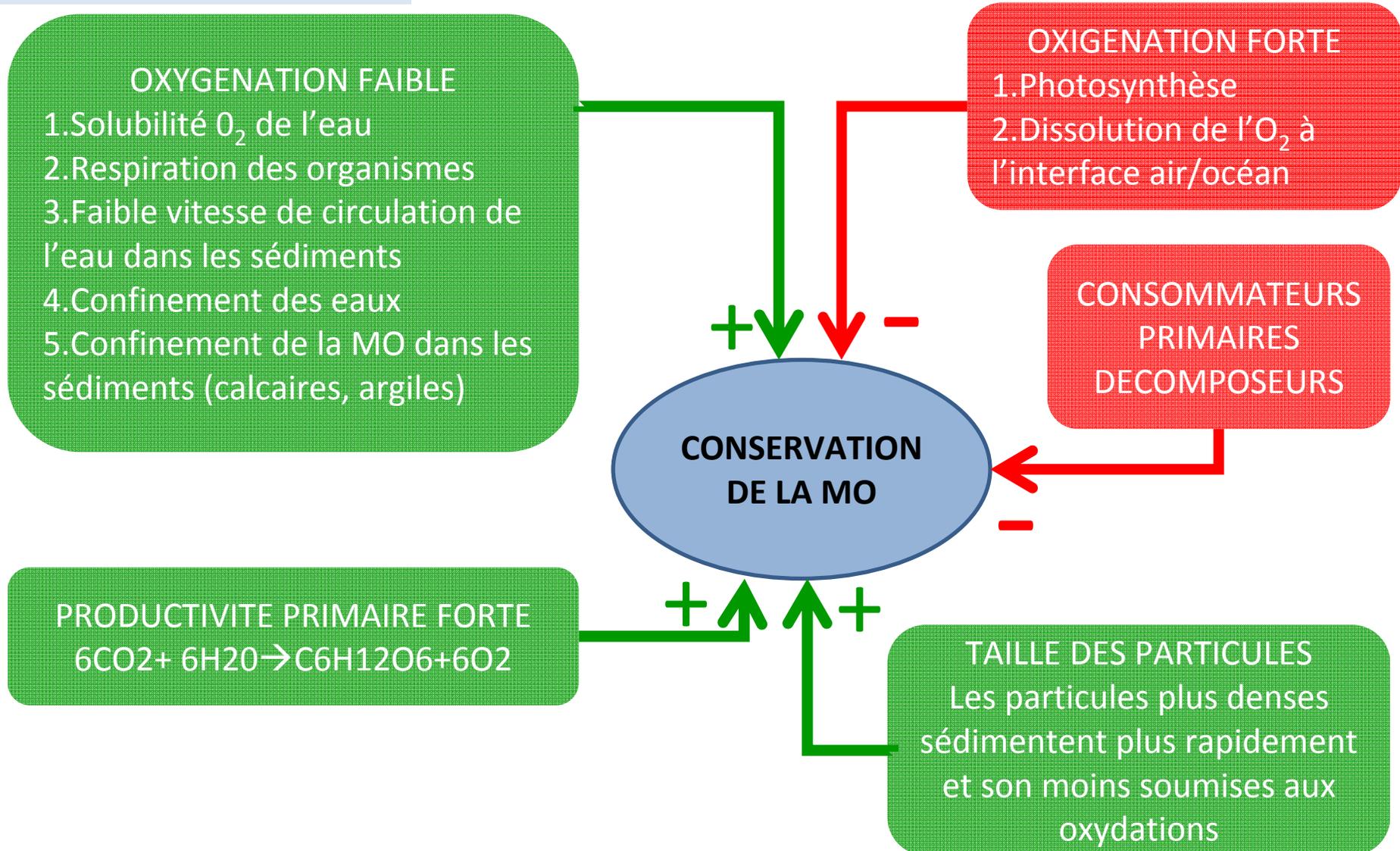
2. 2. 1. La matière organique dans l'eau et les sédiments

Le passage en milieu anaérobie



2. 2. 2. Conservation de la matière organique carbonée

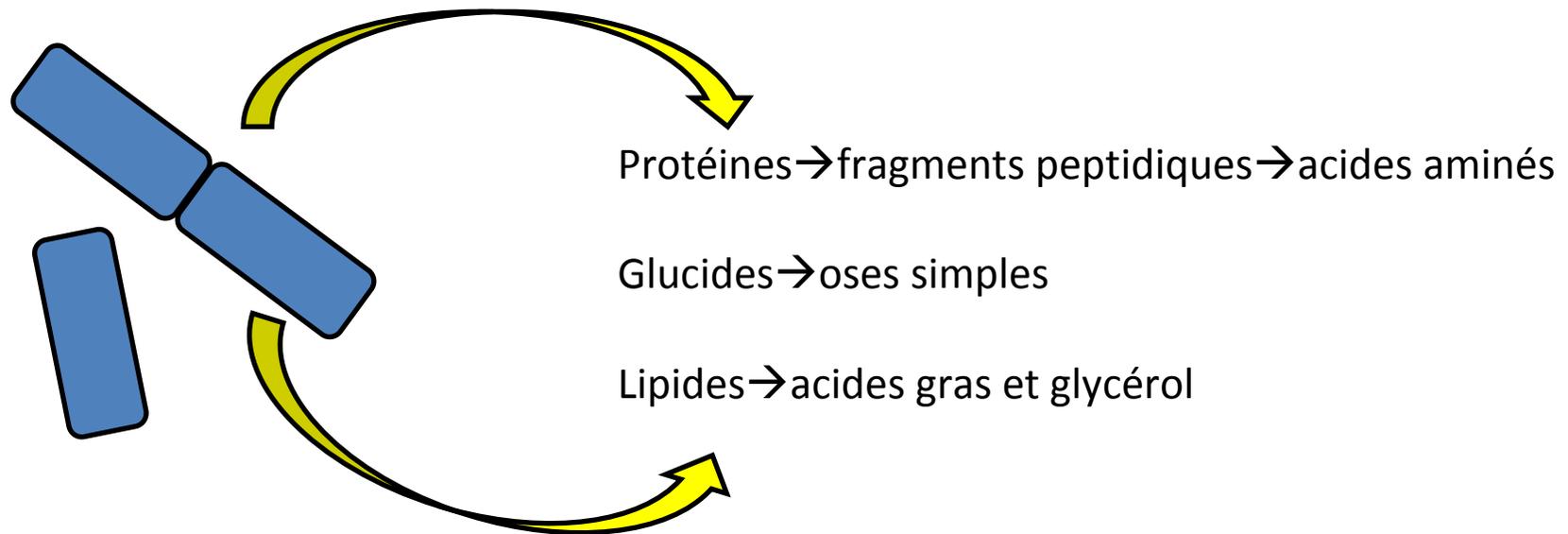
Facteur #1 : l'oxygénation



2. 2. 2. Conservation de la matière organique carbonée

Facteur #2 : les bactéries sécrètent des exo-enzymes (dans le milieu extra-cellulaire)

Elles scindent les macromolécules organiques en molécules de plus petite taille et les ingèrent à travers leur membrane cytoplasmique:



Les bactéries aérobies disposent d'une gamme étendue d'exo-enzymes et s'attaquent donc à de nombreux substrats organiques.

Les bactéries anaérobies ne disposent que d'exo-enzymes spécialisées qui s'attaquent à des substrats simples.

Donc, si la MO est peu dégradée en surface, par des bactéries aérobies, elle est peu dégradée en profondeur par les bactéries anaérobies.

2. 2. 2. Conservation de la matière organique carbonée

Facteur #3 : La dégradation-recondensation

Au cours de l'action bactérienne, les produits de la dégradation des glucides se recombinent avec des ceux des protéines :

Protéines → fragments peptidiques → acides aminés

Glucides → oses simples

Molécules complexes = **mélanoïdines**
peu dégradables

Donc, la MO dégradée en surface, par des bactéries aérobies peut se recondenser.

Facteur #4 : l'incorporation du soufre

Au cours des réaction de sulfato-réduction, des ions sulfures peuvent être incorporés à des molécules organiques créant des pont di-sulfures intra et inter-moléculaires :

Le changement de configuration spatiale ne permet pas aux exo-enzymes de les reconnaître comme substrats.

Facteur #5 : l'adsorption des molécules organiques aux molécules minérales

A l'issue de la dégradation bactérienne, les molécules organiques de faible poids sont adsorbées à la surface de minéraux argileux ce qui les protège des attaques bactériennes

Donc, la MO transformée par le soufre n'est plus dégradée par des bactéries.

2. 2. 2. Conservation de la matière organique carbonée

Diminution de la MO avec la profondeur :

40% détruite à 1m
70% détruite à 5m
90% détruite à 10m

On estime que la fraction organique des sédiments se réduit à 1% :

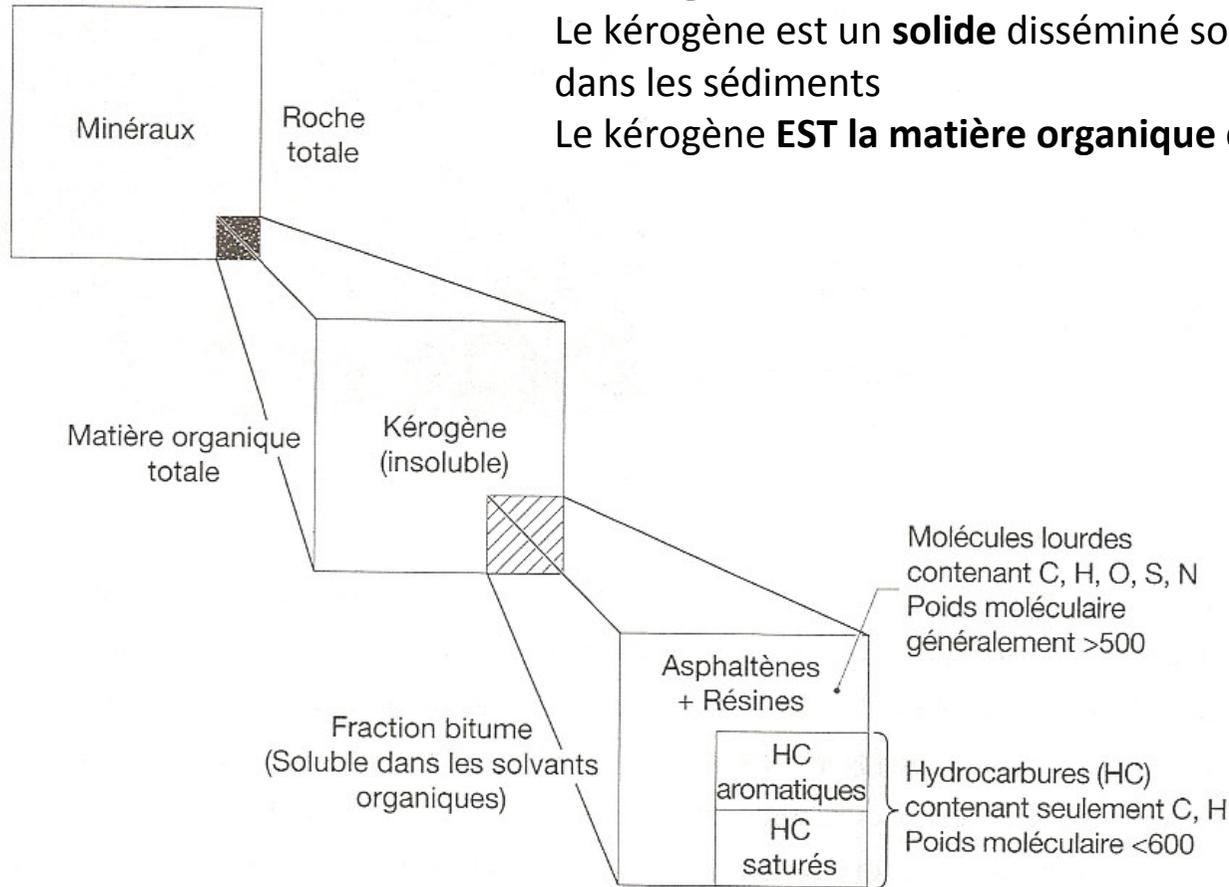
La MO restante est
incomplètement minéralisée :
d'où préservation
et

FORMATION DU KEROGENE

NIVEAU (cm)	KEROGENE	% C ORGANIQUE
5-15	47,6	52,4
50-62	46,7	53,3
120-130	49,3	50,7
183-198	60,4	39,6

D'après O.K. Bordovskiy, 1965 : composition de la matière organique dans une carotte de la mer de Behring

2.3.1. Définition du kérogène et influence de la MO d'origine

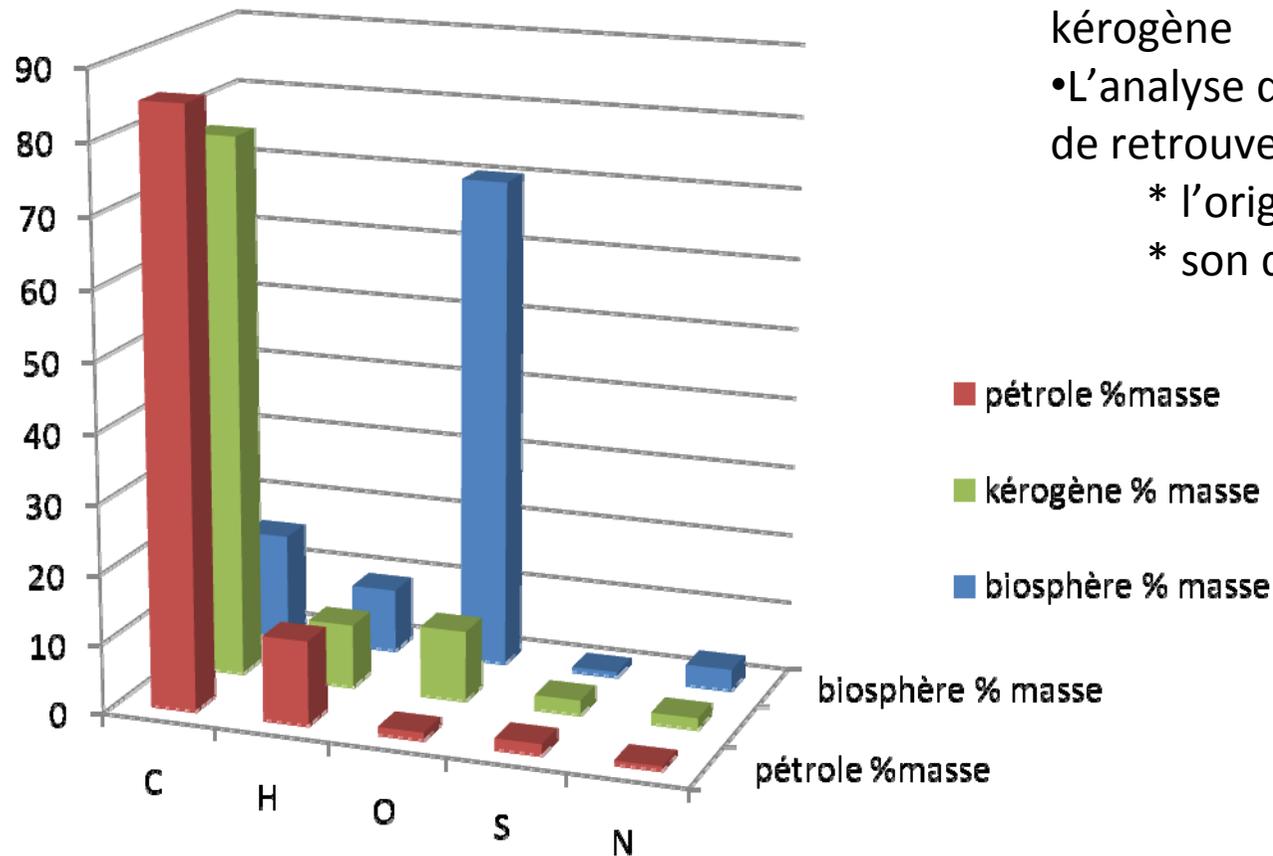


Le kérogène est **un intermédiaire chimique** entre la MO et le pétrole
Le kérogène est un **solide** disséminé sous la forme de filets sombres, dans les sédiments
Le kérogène **EST la matière organique des sédiments**

2.3.1. Définition du kérogène et influence de la MO d'origine

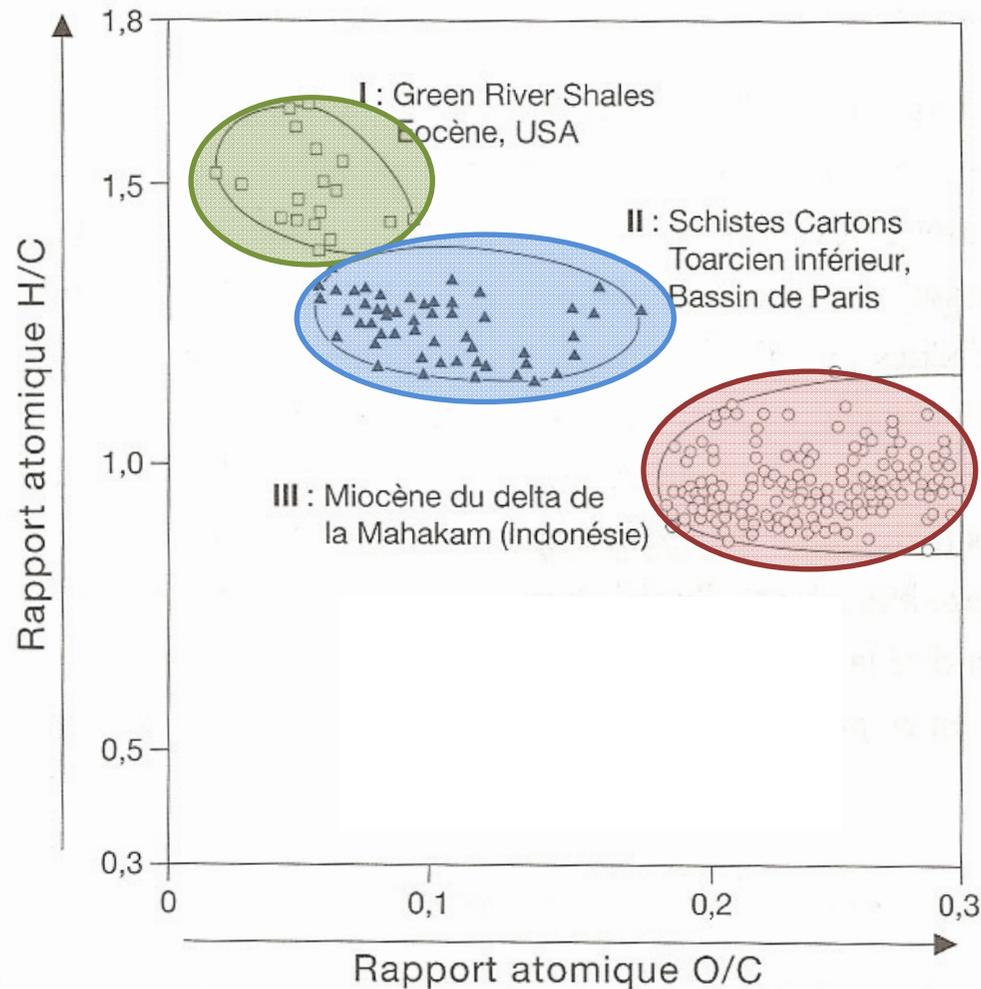
L'analyse élémentaire montre :

- C, O, H, S et N sont majoritaires dans le kérogène
- L'analyse de cette composition permet de retrouver
 - * l'origine du kérogène
 - * son degré d'évolution



2.3.1. Définition du kérogène et influence de la MO d'origine

On reporte les rapports H/C et O/C dans un diagramme :



TYPE I : environnement lacustre

(kérogène formé d'algues résistantes et de procaryotes constitués de nombreuses molécules aliphatiques)

TYPE II : environnement marin

(kérogène formé de MO organique marine dégradée par des bactéries)

TYPE III : environnement deltaïque

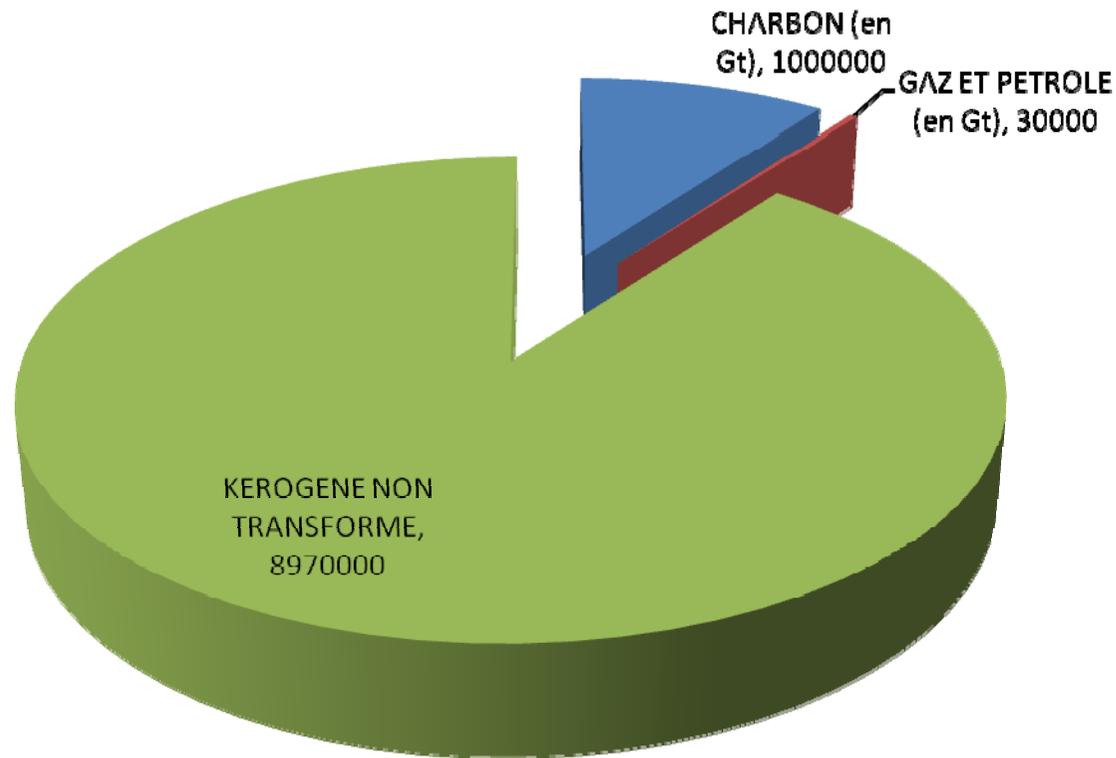
(kérogène formé de MO de végétaux supérieurs)

2.3.1. Définition du kérogène et influence de la MO d'origine

A l'échelle de la planète, on estime la masse de kérogène égale à 10 000 000 Gt

0,1% de ce kérogène se transforme en charbon : 1 000 000 Gt

0,003% de ce kérogène se transforme en gaz et pétrole: 300 000 Gt



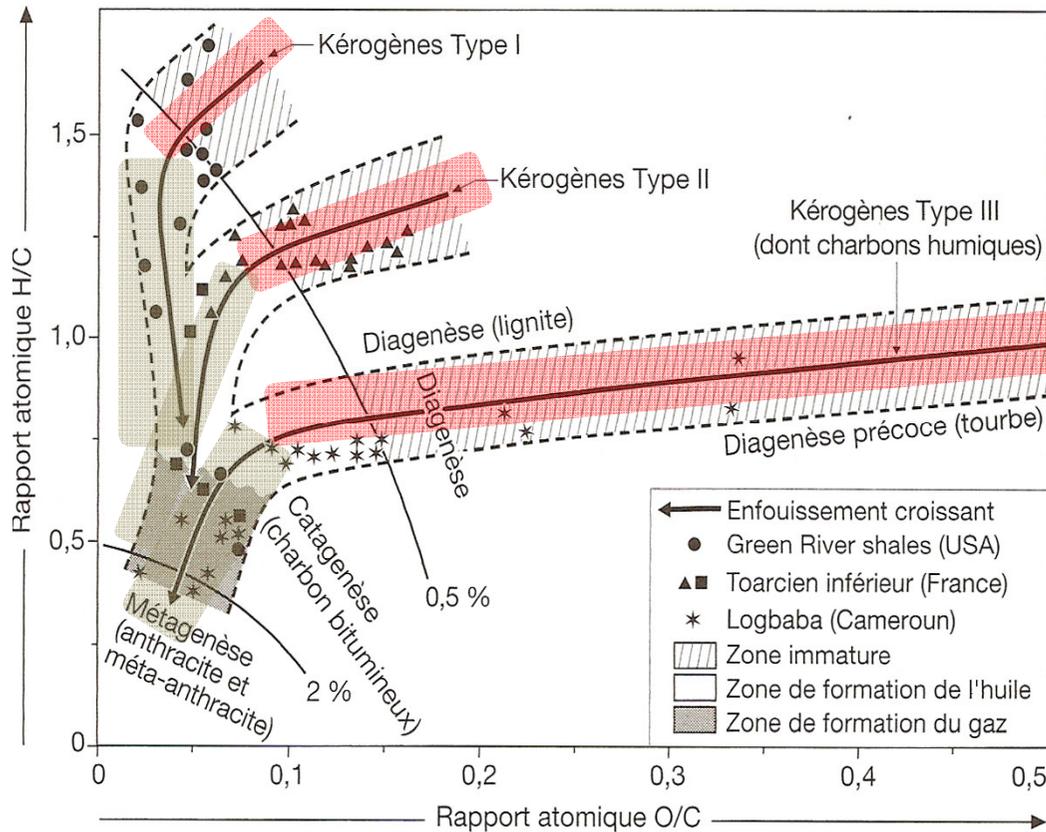
2. 3. 2. Influence de la température et de la pression

La transformation du kérogène des sédiments est une **transformation chimique** : elle dépend:

- De la Pression
- De la Température

2.3.2. Influence de la température et de la pression

DIAGRAMME DE VAN KREVELEN



3. METAGENESE : métamorphisme du résidu carboné

Selon l'évolution des rapports H/C et O/C précédemment définis, on situe 3 domaines thermiques d'évolution du kérogène :

cette évolution se traduit par

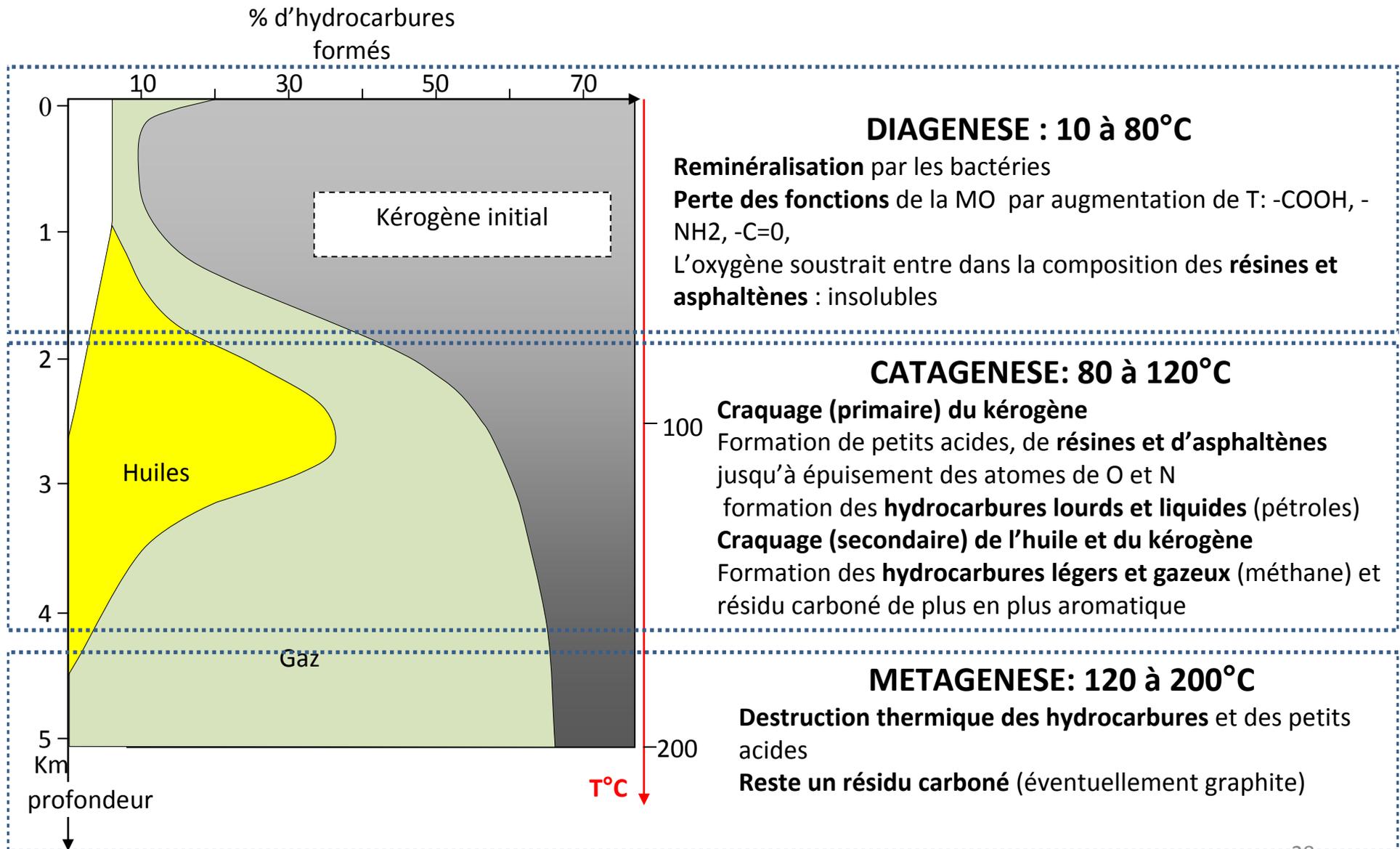
• **DIAGENESE** : époque de l'oxygène
) se dégage sous forme de CO₂, H₂O, acides organiques,

• **Début de CATAGENESE** : époque de l'hydrogène
 l se dégage sous forme d'hydrocarbures
 faible T : les huiles lourdes
 forte T : les huiles légères et les gaz

• **Fin de CATAGENESE** : époque du carbone
 es quantités de O et de H sont réduites : reste C qui évolue

2. DE LA MATIERE ORGANIQUE AU PETROLE > 2.3 La transformation du kérogène en pétrole

2.3.2. Influence de la température et de la pression



2. 3. 3. Les événements anoxiques océaniques (OAE)

Au cours des temps géologiques, des épisodes propices au dépôts d'argiles sombres, riches en matière organique (les black shales) correspondent aux **événements anoxiques océaniques**

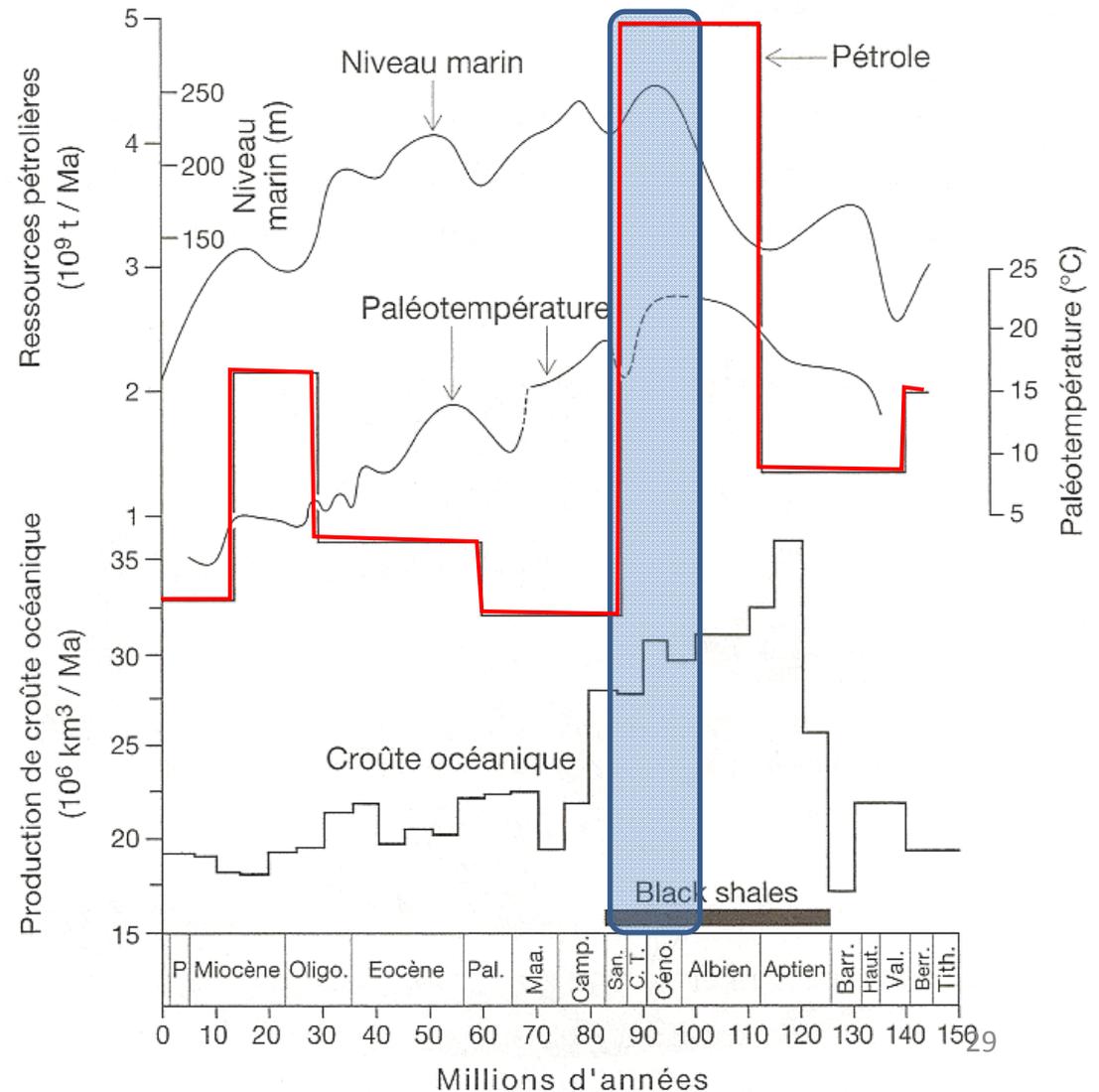
Durée brève : 400 000 ans à 1ma

Le plus important est celui de la limite **Cénomanién-turonien** (90ma)

-**Expansion océanique** importante : transgression marine généralisée

-**Volcanisme actif** : dégagement de CO₂ dont la concentration atteint 6 fois la valeur actuelle

- D'où activation de la photosynthèse
- D'où augmentation de la température par effet de serres

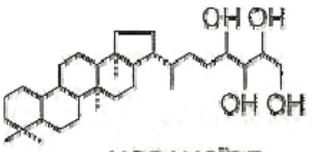
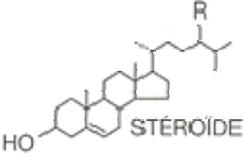
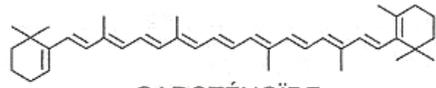
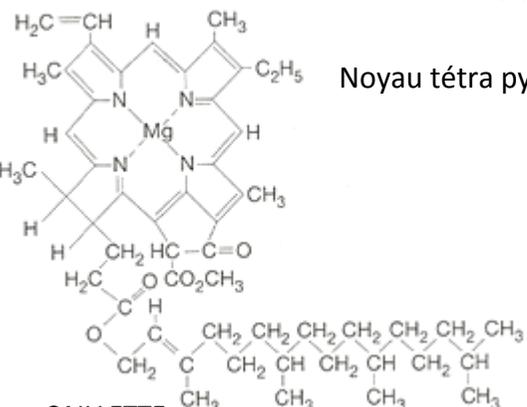
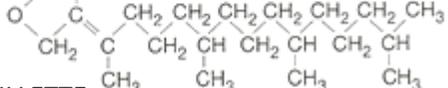
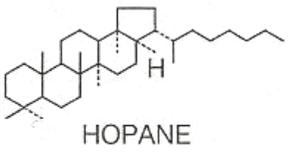
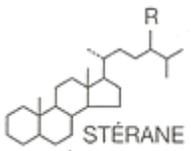
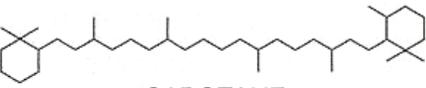
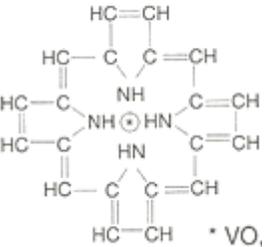


2. DE LA MATIERE ORGANIQUE AU PETROLE > 2.3 La transformation du kérogène en pétrole

2.3.4. Des fossiles moléculaires dans le pétrole

Dans les sédiments ou le kérogène, certains fossiles moléculaires témoignent de son origine organique.

Certaines **biomolécules** (issues des parois cellulaires, cuticules, pigments, ...) s'altèrent peu et conservent leur squelette carboné appelé **géomolécule**.

BIOMOLECULE	GEOMOLECULE
 <p>HOPANOÏDE</p> <p>Paroi bactérienne procaryote</p>  <p>R=H, CH₃, C₂H₅</p> <p>STÉROÏDE</p> <p>Membrane cytoplasmique eucaryote</p>  <p>CAROTÉNOÏDE</p>  <p>Chlorophylle a</p> <p>Noyau tétra pyrrolique</p> <p>Pigments végétaux</p>  <p>phytol</p> <p>Alban CAILLETTE</p>	 <p>HOPANE</p>  <p>R=H, CH₃, C₂H₅</p> <p>STÉRANE</p>  <p>CAROTANE</p>  <p>Noyau porphyrine</p> <p>* VO,</p>  <p>C₂₀ (Phytane)</p> <p>30</p>

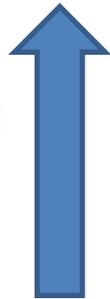
3. ACCUMULATION DU PETROLE

Les hydrocarbures se trouvent dans des roches poreuses et/ou fracturée, souvent perméables:

- Sables
- Grés
- Calcaires oolithiques et récifaux

Roches-réservoirs=roches-magasins, pauvres en kérogène

MIGRATION



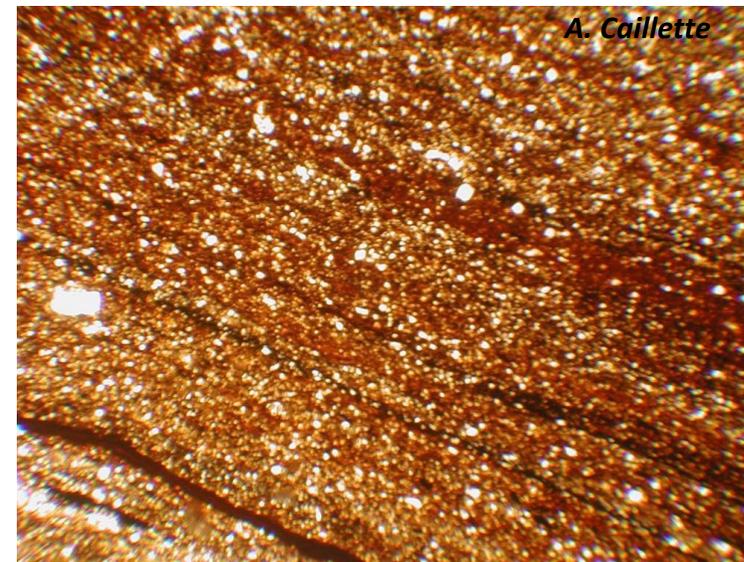
Ex : calcaire asphaltique

Les roches où se forme le kérogène ont une granulation fine, peu perméables:

- Argiles
- Calcaires fins

Roches-mères, riches en kérogène

Ex : schiste bitumineux (argilite=black shale)



La migration se déroule en 2 étapes :

#1 : la migration primaire

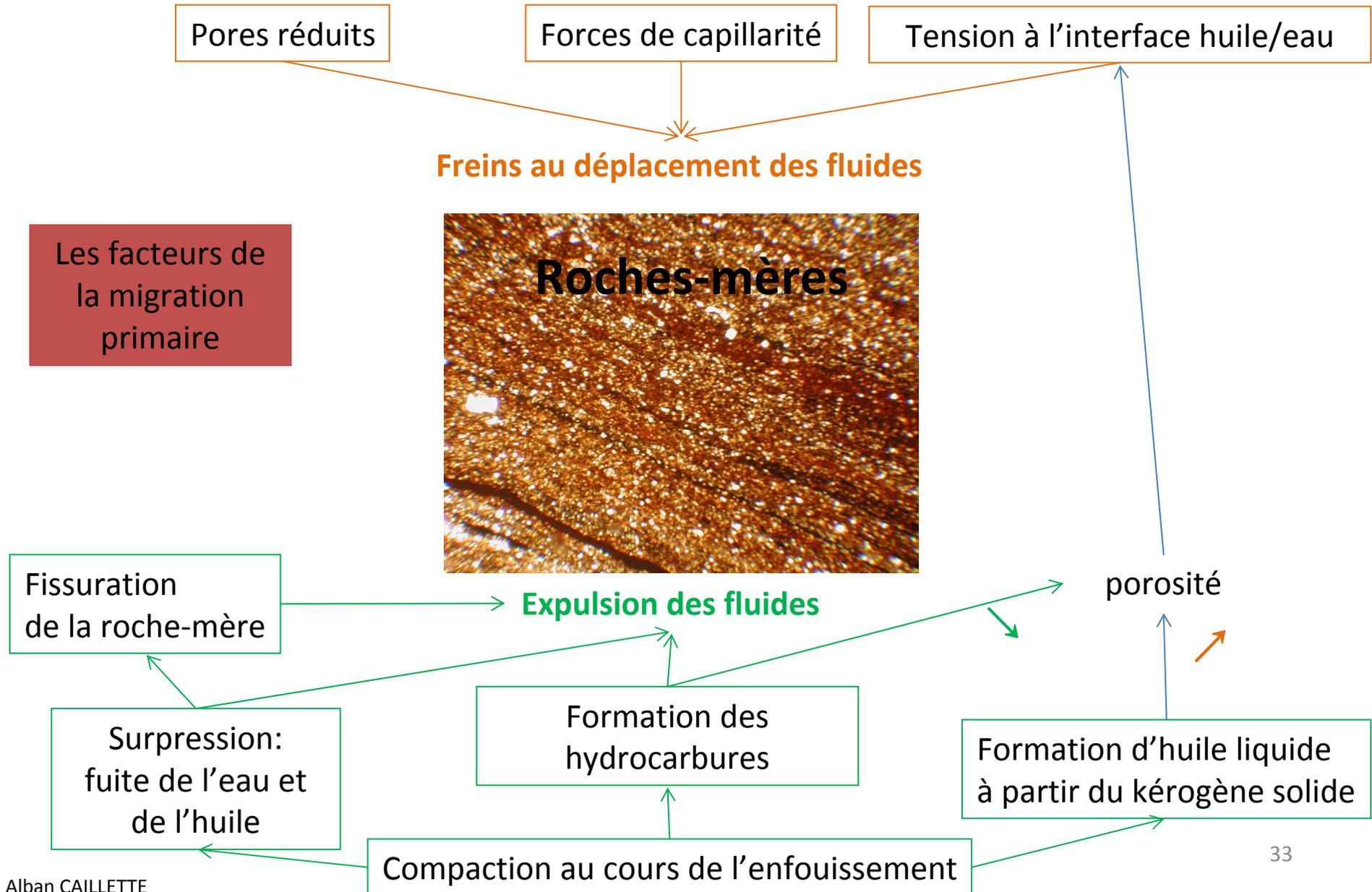
→ expulsion du pétrole de la roche-mère

#2 : La migration secondaire

→ transfert vers la roche-réservoir

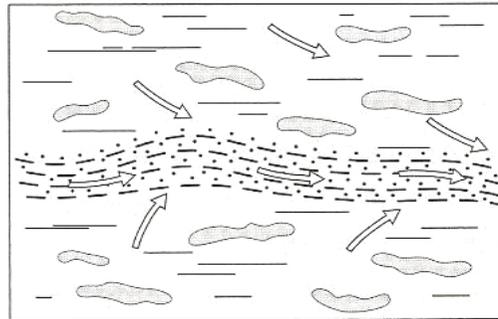
3. ACCUMULATION DU PETROLE > 3.1 Migrations

3. 1. 1. Migration primaire, expulsion du pétrole de la roche-mère



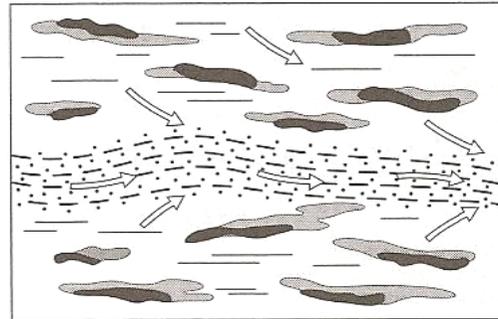
3. ACCUMULATION DU PETROLE > 3.1 Migrations

3. 1. 1. Migration primaire, expulsion du pétrole de la roche-mère



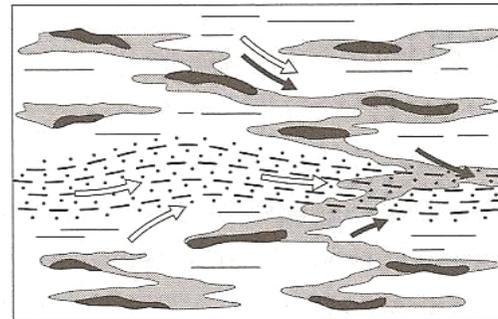
ZONE IMMATURE (Diagenèse)

Porosité = 15 %
Saturation en huile = 0 %
Expulsion de l'eau (compaction)



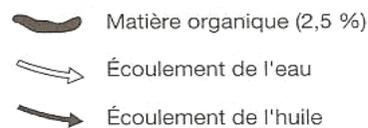
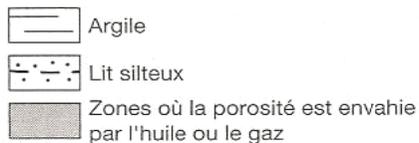
DÉBUT DE FORMATION DE L'HUILE

Les hydrocarbures formés envahissent la porosité
Porosité = 10 %
Saturation en huile = 5 %
Pas d'expulsion de l'huile



MILIEU OU FIN DE LA FORMATION DE L'HUILE

Porosité = 8 %
Saturation en huile = 20 %
La migration primaire est possible



0 1 mm

Si la roche-mère est riche en kérogène

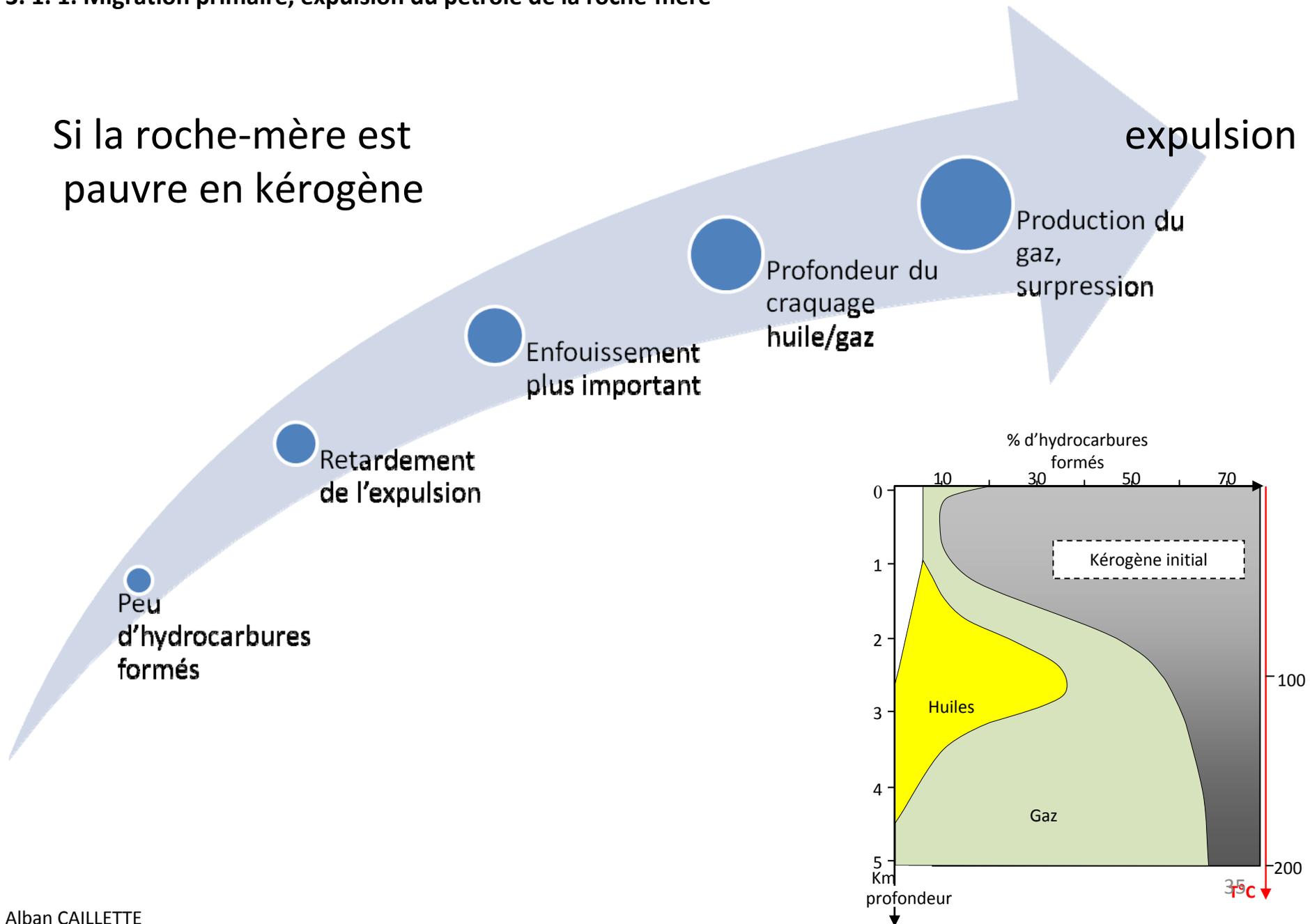
La migration primaire a lieu lorsque les hydrocarbures deviennent dominants et dépassent le seuil de 20% de la porosité

Géologie de la matière organique, F. Baudin, N. Tribovillard, J. Trichet, Vuibert, 2007

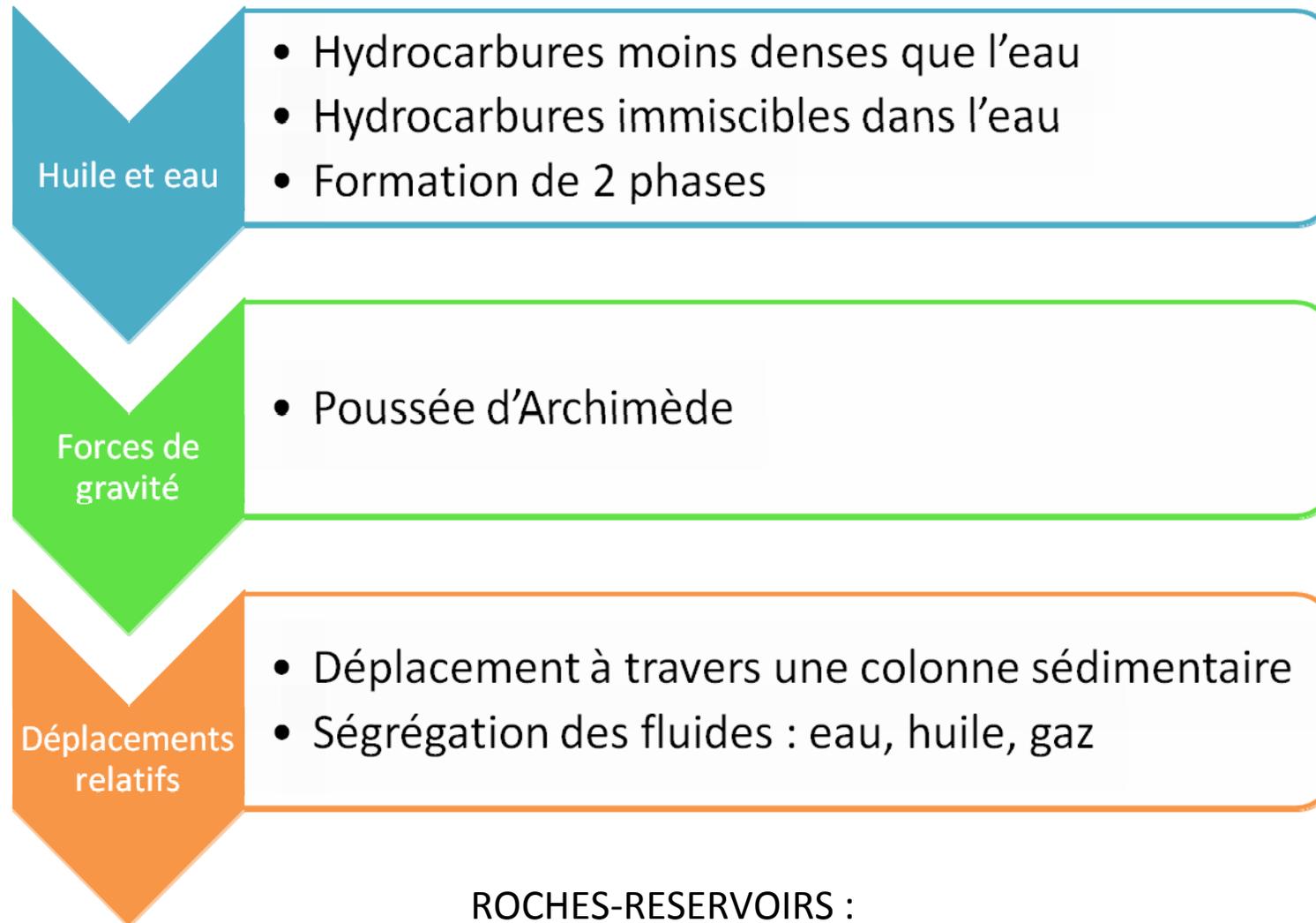
3. ACCUMULATION DU PETROLE > 3.1 Migrations

3. 1. 1. Migration primaire, expulsion du pétrole de la roche-mère

Si la roche-mère est pauvre en kérogène



3. 1. 2. Migration secondaire, stockage dans la roche-réservoir



ROCHES-RESERVOIRS :

- sable et grés : 62% des roches-réservoirs
- Calcaires oolithiques et récifaux : 32%

La charge d'un réservoir nécessite une barrière imperméable qui bloque la migration des hydrocarbures : la roche-couverture

Un piège pétrolier est **d'origine tectonique**

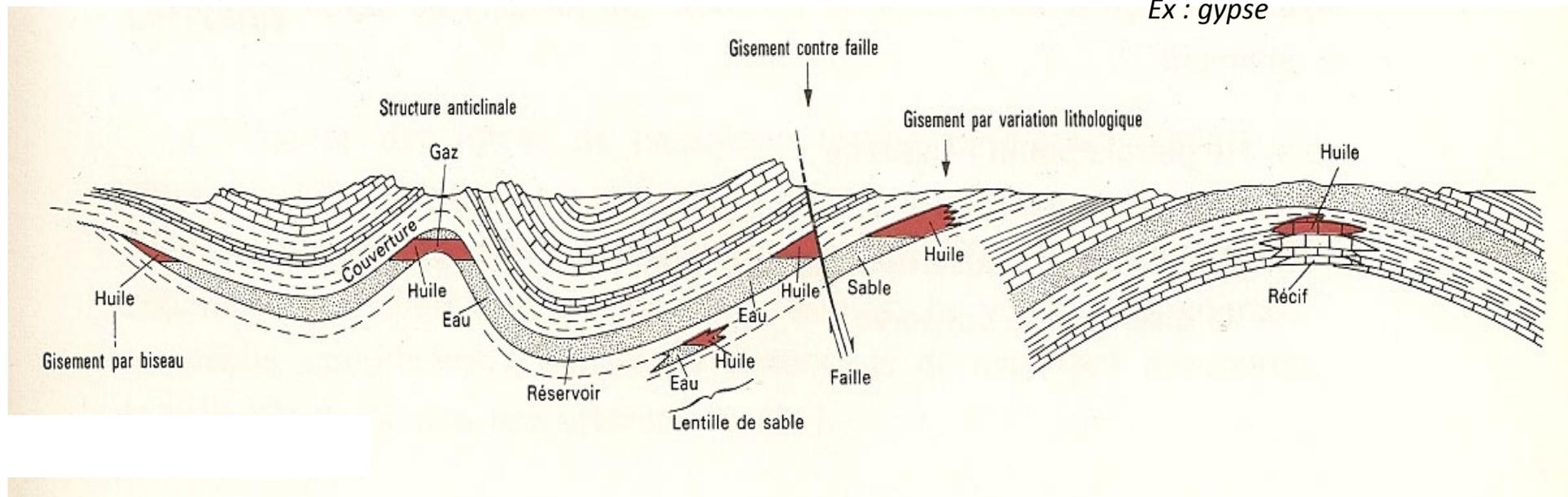
- Anticlinal (80% des réserves)
- Faille (1,2% des réserves)

Un piège pétrolier est **d'origine stratigraphique**

- Discordance (2,8% des réserves)
- Biseau, diapirs de sels et autre (13,6 % des réserves)
- récif (2,2% des réserves)



Ex : gypse



ELEMENTS DE BIBLIOGRAPHIE

« Formation des gisements de pétrole , étude géologiques fondamentaux », C. Sallé et J. Debyser, éditions Technip, 1976

« Géologie de la matière organique », F. Baudin, N. Tribovillard, J. Trichet, éditions Vuibert, 2007

« fossiles moléculaires d'intérêt microbiologique, pétrolier, agronomique et environnemental », E. Lichtfouse, mémoire sur travaux, 1998

« dictionnaire de géologie », A. Foucault, J.F. Raoult, 4^{ème} édition, éditions Masson, 1995