

Formaterre 2013 : "La Terre : un système global"
vendredi 15 novembre 2013



UNICITE ET DIVERSITE

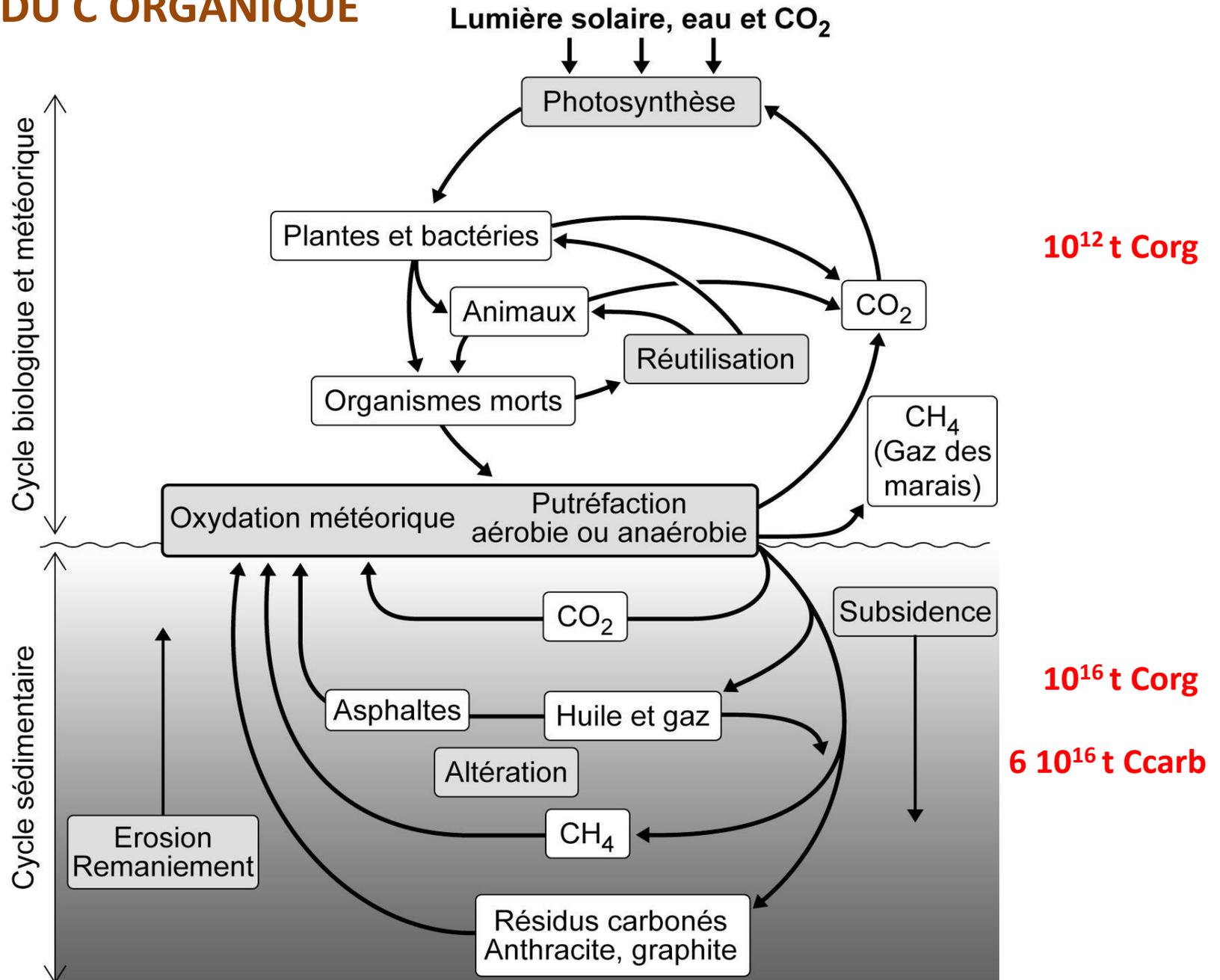
DES COMBUSTIBLES FOSSILES CARBONES

François Baudin

(francois.baudin@upmc.fr)



CYCLE DU C ORGANIQUE



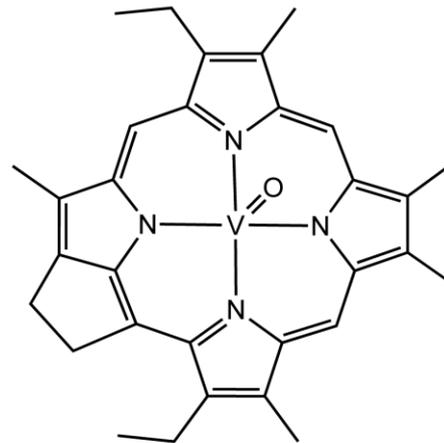
LES COMBUSTIBLES FOSSILES ONT UNE ORIGINE BIOLOGIQUE

Incontestée pour les charbons -> restes végétaux

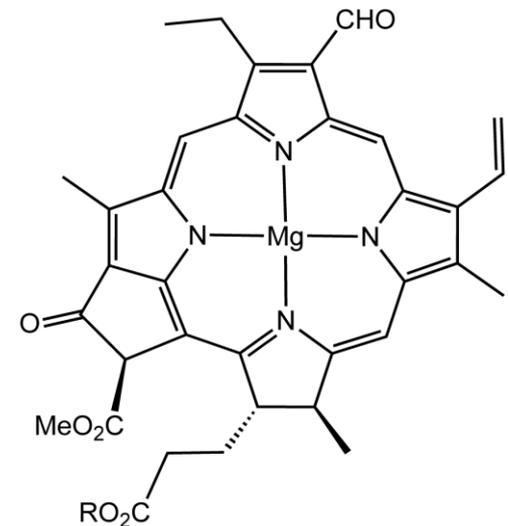
Contestée pour les pétroles ... HC dans les météorites, dans le manteau, etc.

MAIS prouvée par :

- 1) abondance de C, H, O, N comme dans le vivant
 - 2) rapports isotopiques du C et O
 - 3) similitudes entre porphyrines et chlorophylle (A. Treibs, 1936)
 - 4) autres « biomarqueurs » = fossiles géochimiques
 - 5) propriétés optiques
- etc.

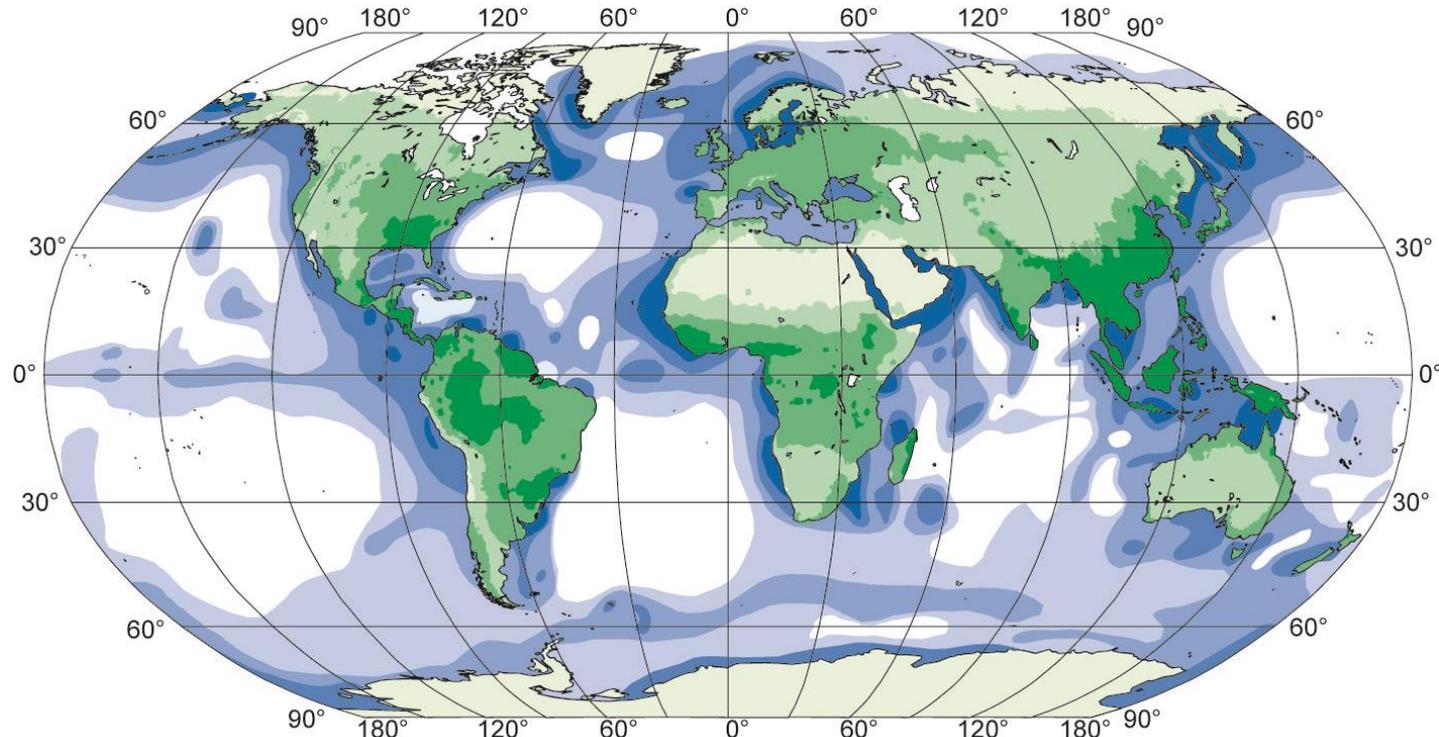


porphyrine



chlorophylle

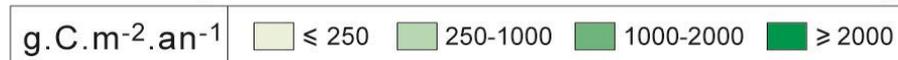
PRODUCTION PRIMAIRE DE MO = $\sim 10^{11}$ t Corg. an⁻¹



Productivité primaire de l'océan global

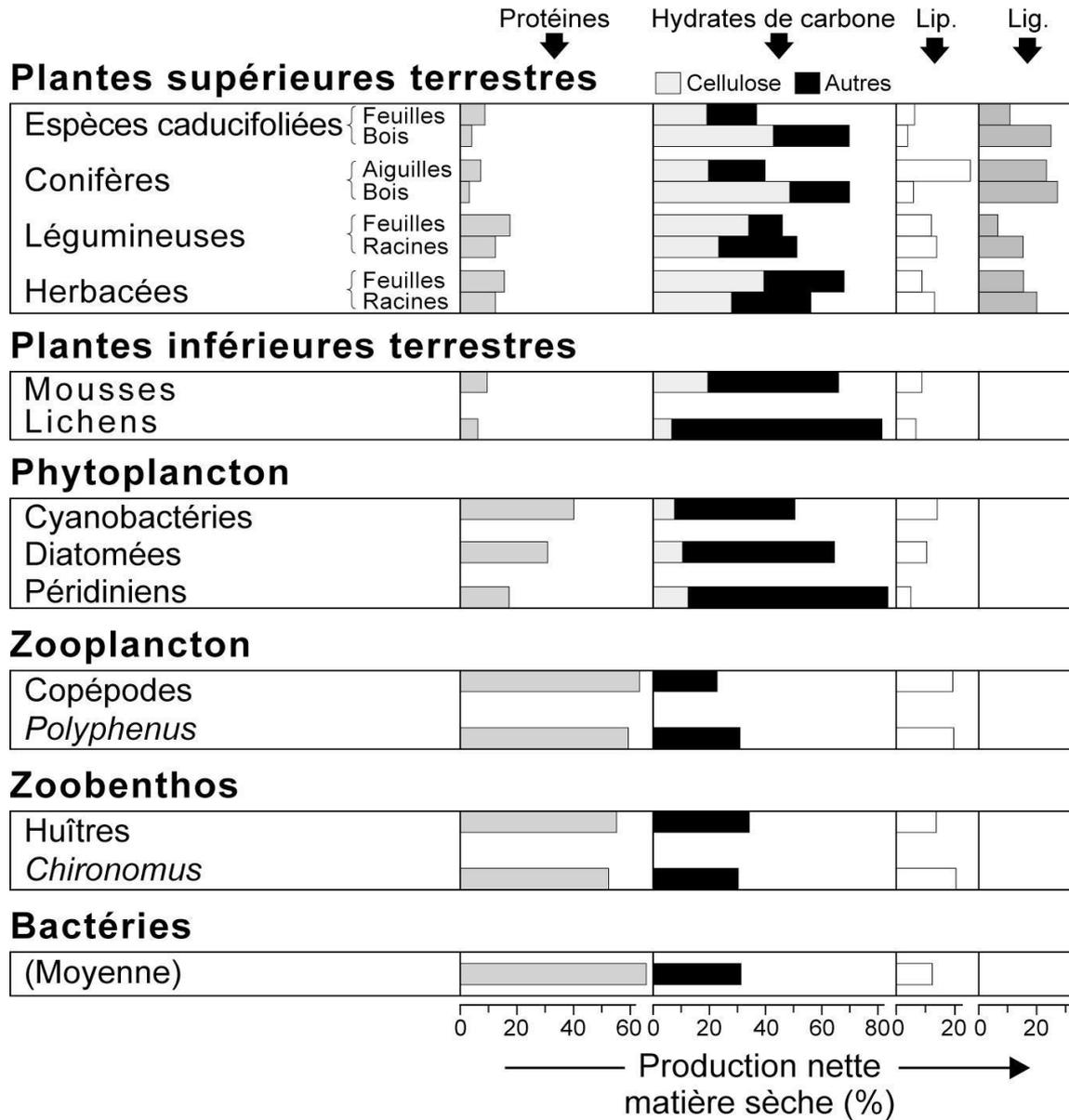


Productivité primaire nette sur les terres émergées

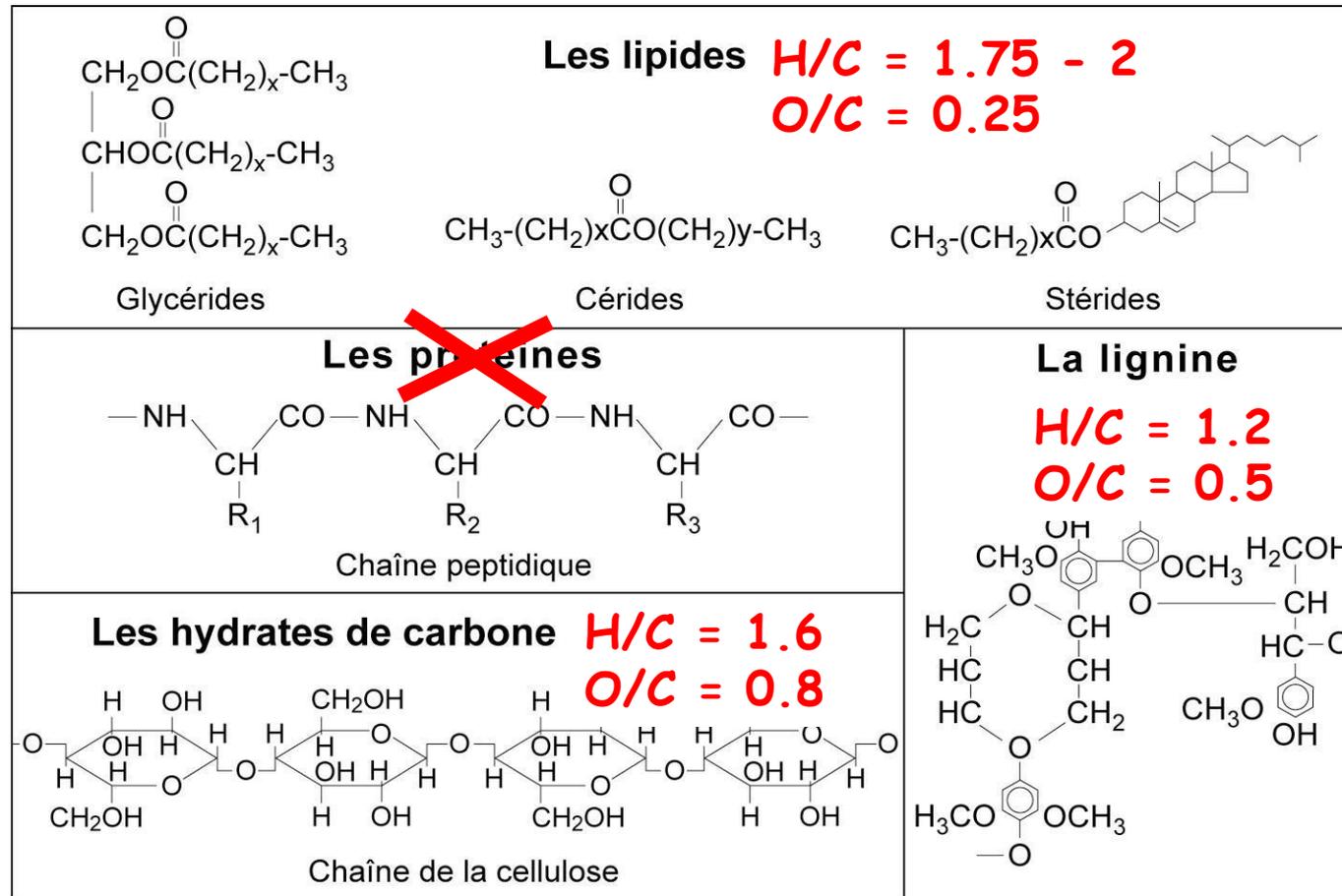


- **Equi-répartie en masse (pas par m²) entre continents et océans**
- **Contrôle climatique à terre. Disponibilité des nutriments + climat en mer**
- **Quantité biomasse bactérienne très mal connue ...**

DES MOLECULES EN PROPORTION VARIEE

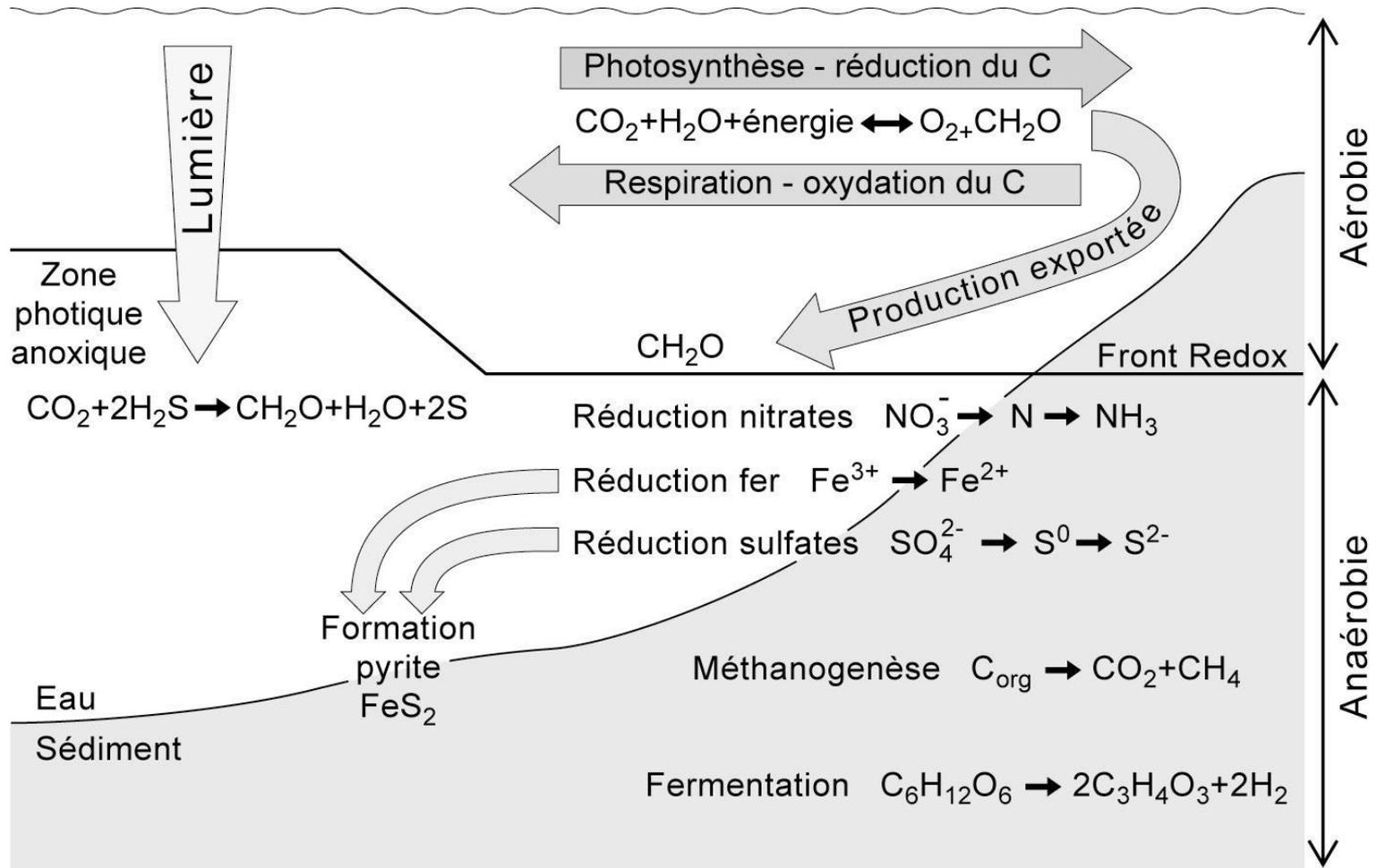


COMPOSITION CHIMIQUE DES MOLECULES ORGANIQUES



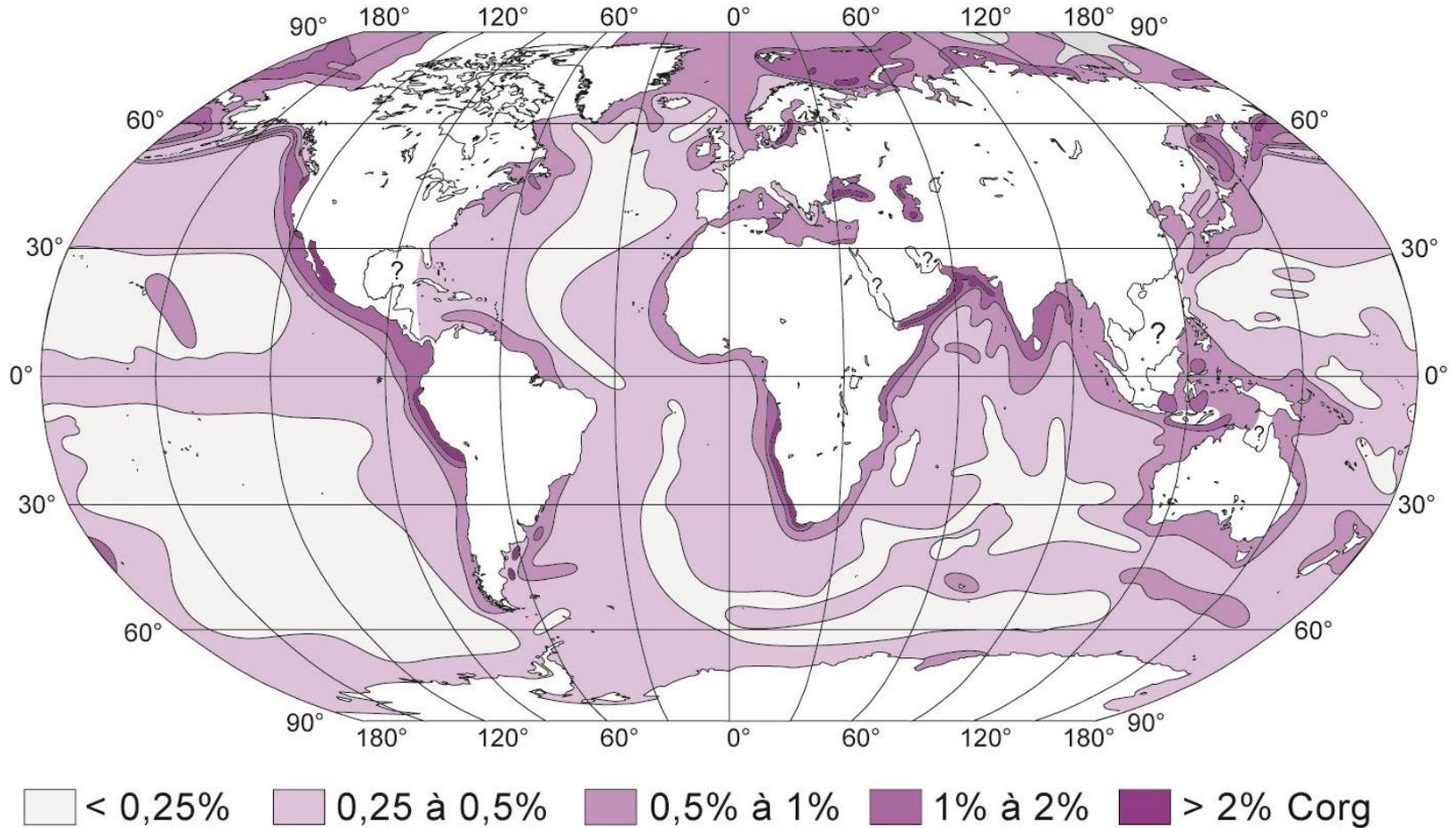
- Evolution de la vie ... évolution de la chimie de la MO (apparition plantes sup.)
- Rapports H/C et O/C très variables

INTENSE DEGRADATION DE LA MATIERE ORGANIQUE



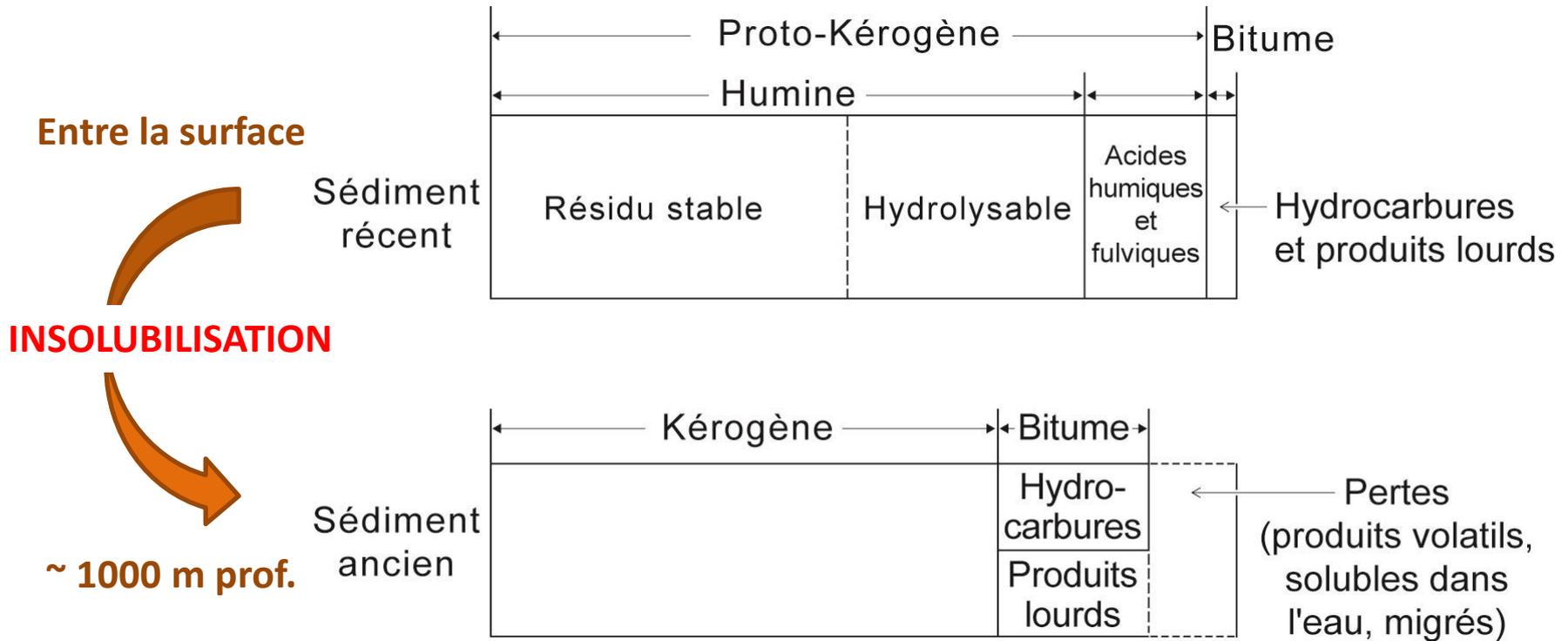
- **Fonction de la réactivité des molécules ... préservation sélective**
- **<< 1% de la production primaire est finalement préservée**
- **Production de CH_4 : gaz biogénique**

RICHESSSE EN MO DES SEDIMENTS MARINS



- % Corg très rarement > 0,5%
- Zone de haute productivité (upwelling) ou bassins fermés (Mer Noire)
- Très faible potentiel de fossilisation à terre ... sauf tourbières (~ 50% Corg)

TRANSFORMATION EN KEROGÈNE



Processus physiques/chimiques

- Adsorption sur minéraux (argiles)
- Encapsulation
- Molécules intrinsèquement résistantes
- Polymérisation/recondensation
- Sulfuration naturelle

TYPES DE KEROGENES

Analyse élémentaire

- C : 50 à 95% (moyenne 75%)
- H : 1 à 10% (moyenne 5%)
- O : 5 à 25% (moyenne 10%)
- N
- S

+ traces d'autres éléments
(Va, Mo, Cu, Cr, ...)

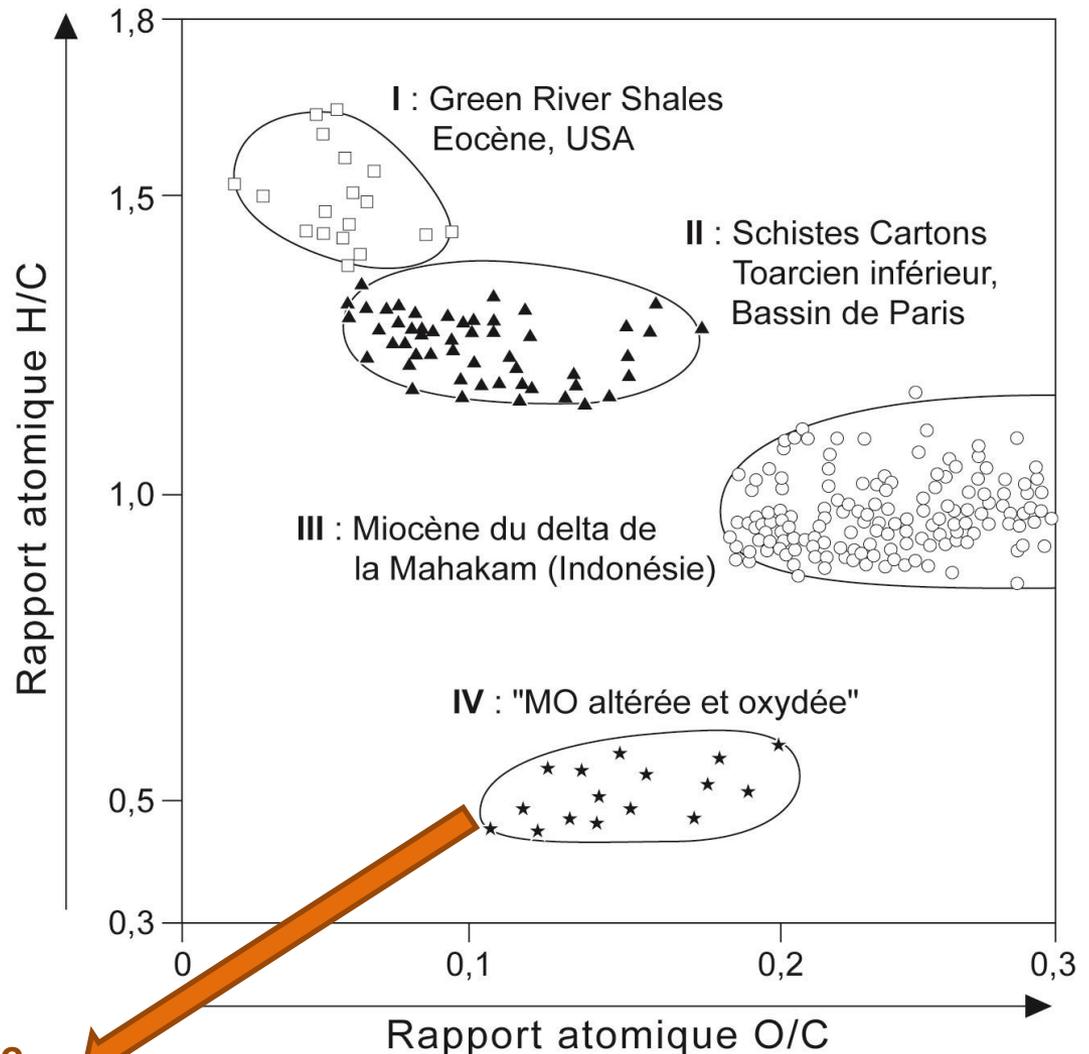
Rapports atomiques

- H/C : 2 à 0.75
- O/C : 0.05 à 0.4
- Sorg/C : 0.01 à 0.06

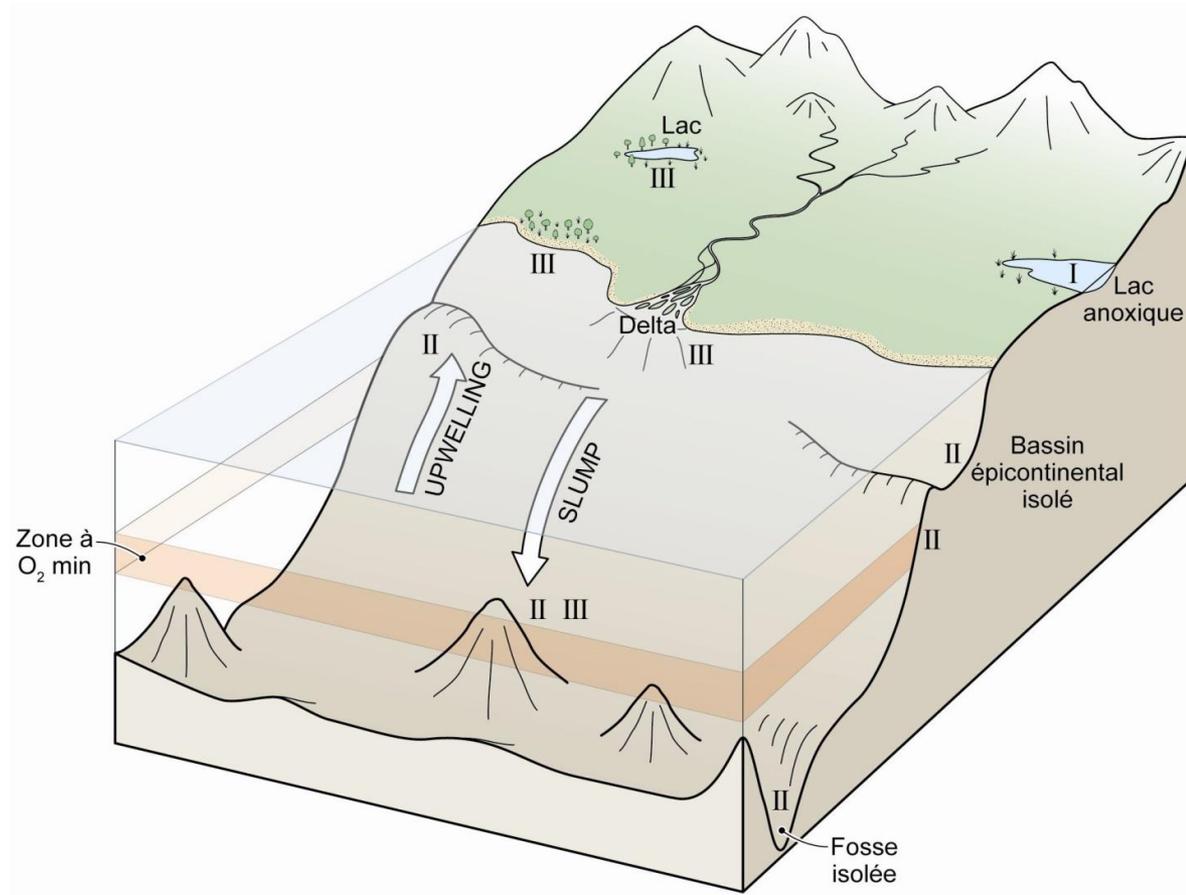
MO soufrée si Sorg/C > 0.04

La majorité de la MO sédimentaire

MAIS qui n'est pas à l'origine de combustibles fossiles



MILIEUX FAVORABLES A LA PRESERVATION DE LA MO ... ET A LA FORMATION DE FUTURS COMBUSTIBLES FOSSILES



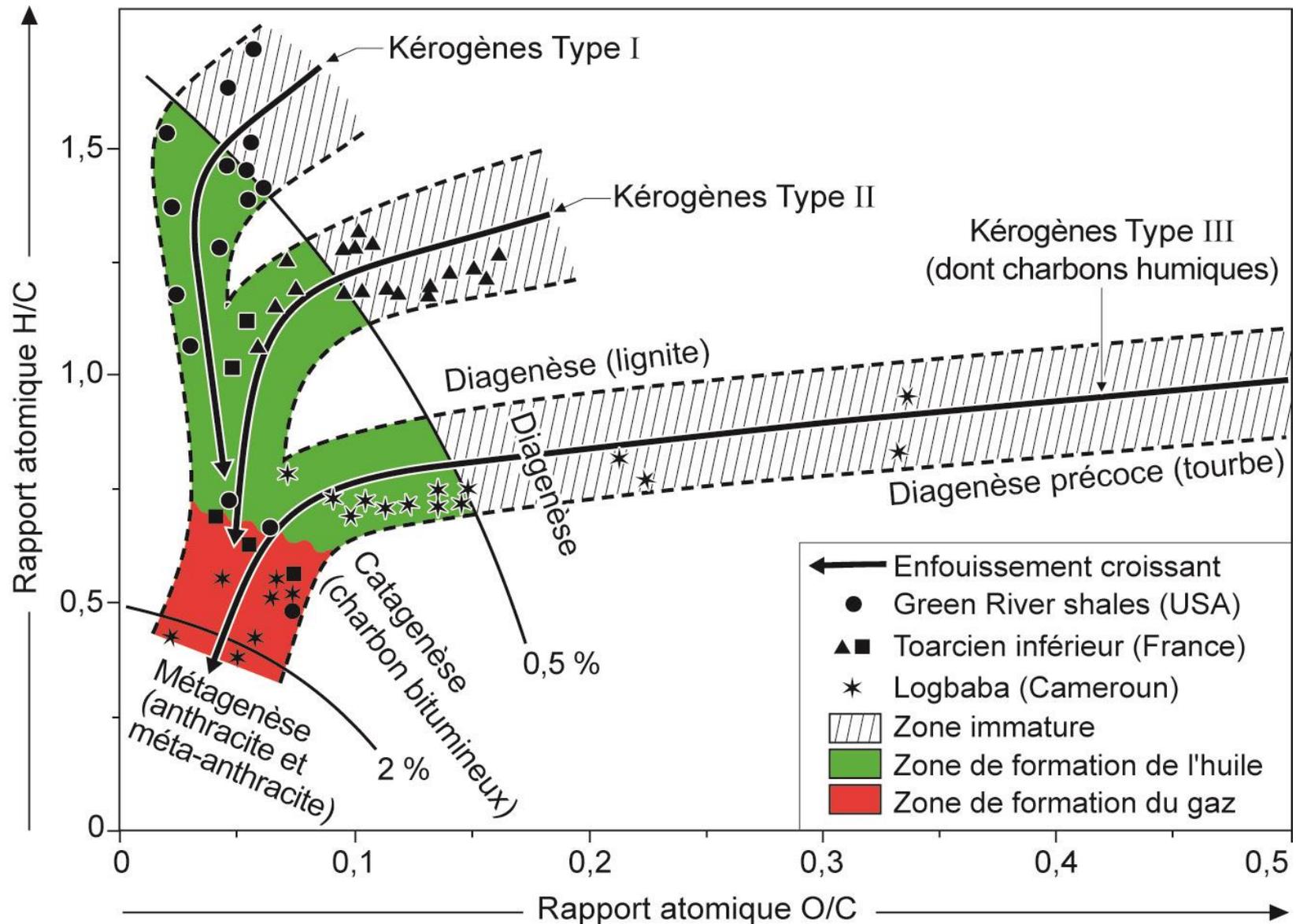
Type I : rare – excellente roche mère pétrolière

Type II : très fréquent – bonne roche mère pétrolière

Type III dispersé : très fréquent – roche mère de médiocre qualité

Type III concentré : rare – charbons

EVOLUTION CHIMIQUE DES KÉROGÈNES AVEC L'ENFOUISSEMENT : DIAGRAMME DE VAN KREVELEN



Evolution structurale d'un kérogène de Type III

Hydrocarbures saturés

Cyclanes
(=Naptènes)



Alcanes
(=Paraffines)

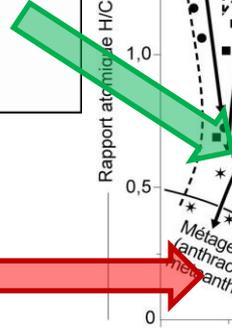
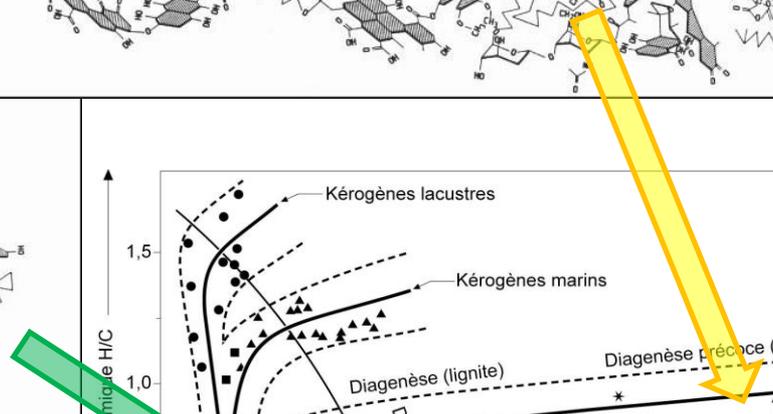
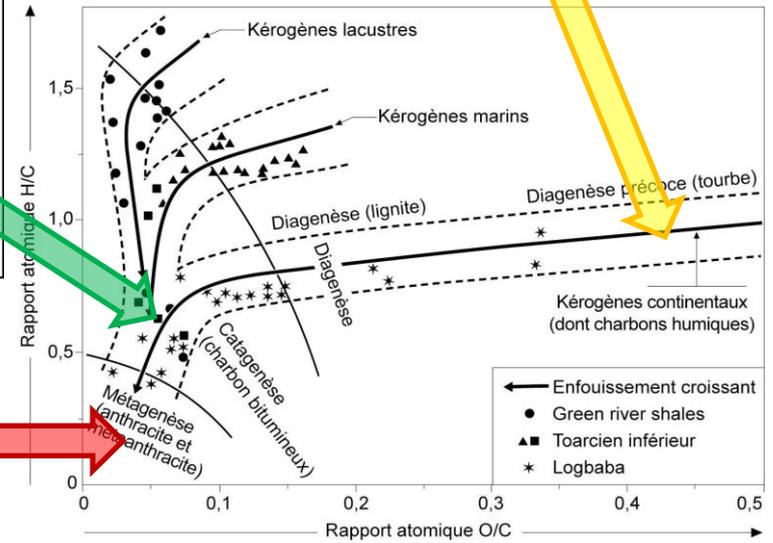
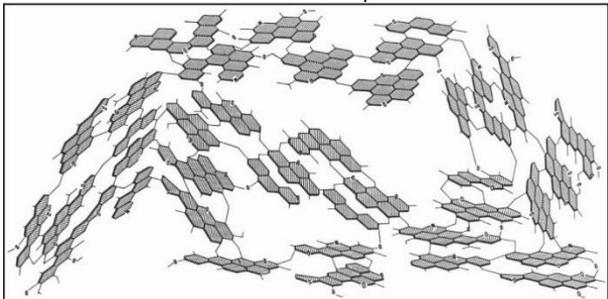
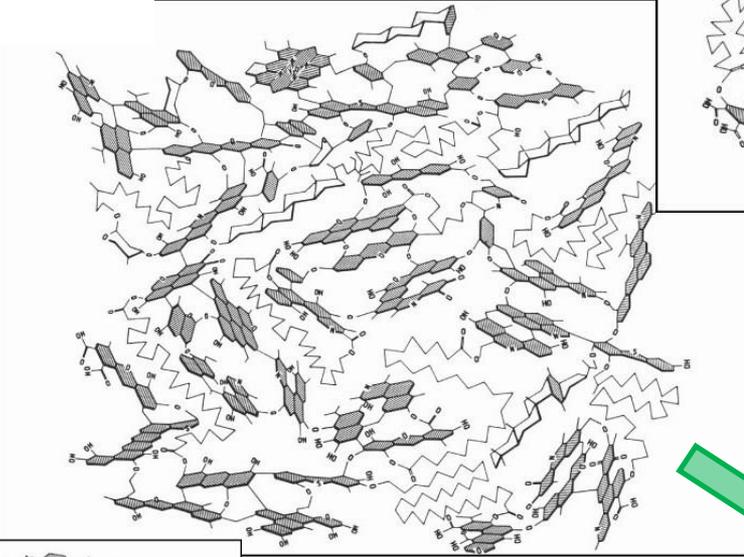
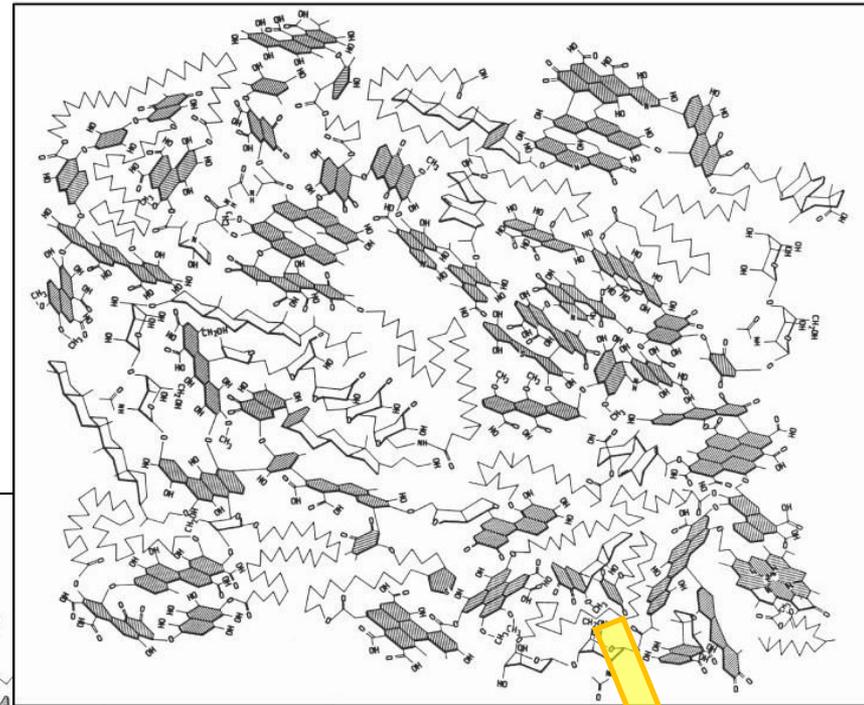
Linéaires
(=Normaux)



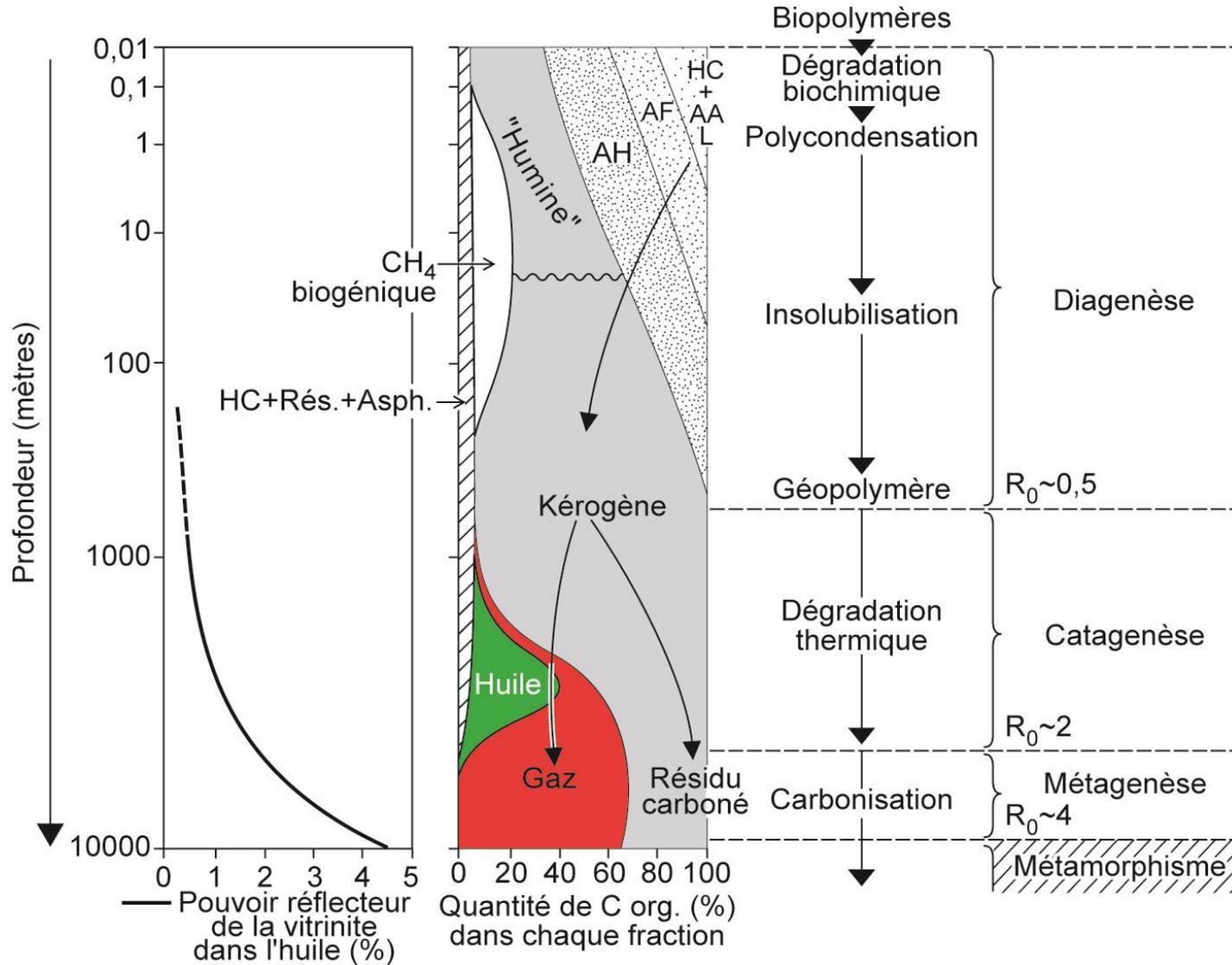
Ramifiés
(=Iso)



Hydrocarbures aromatiques

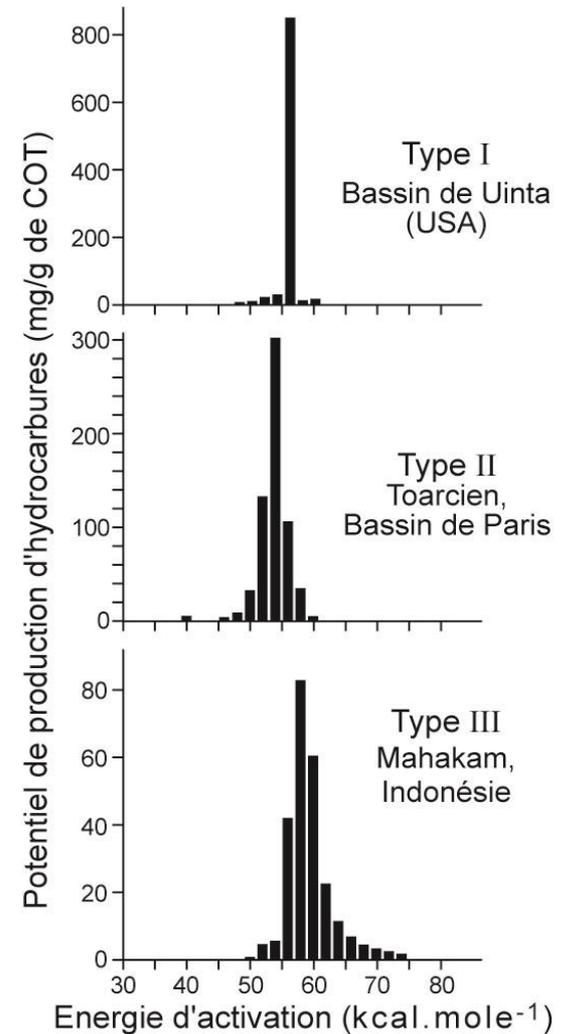
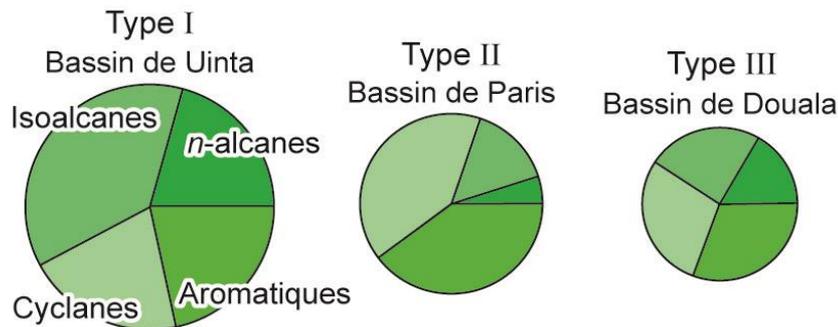
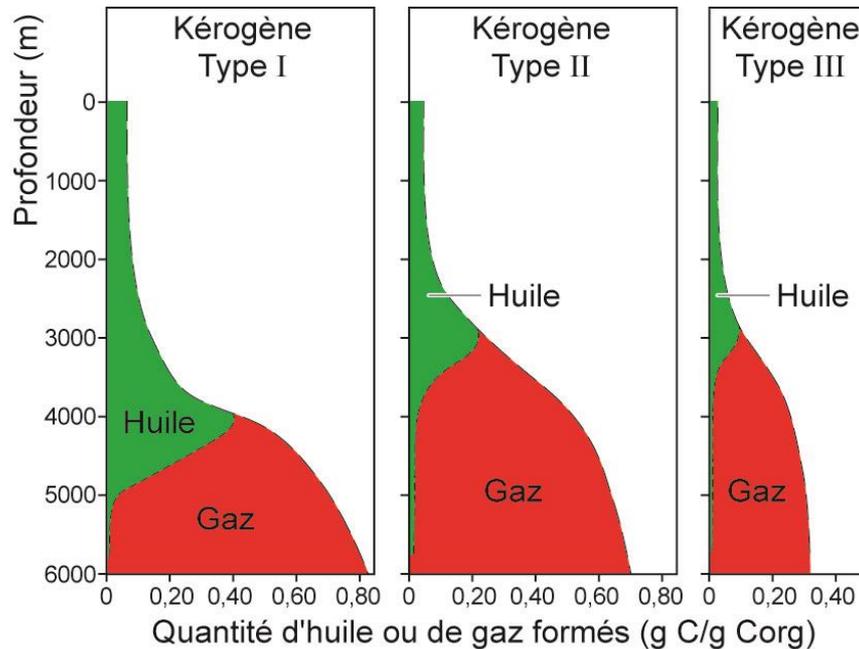


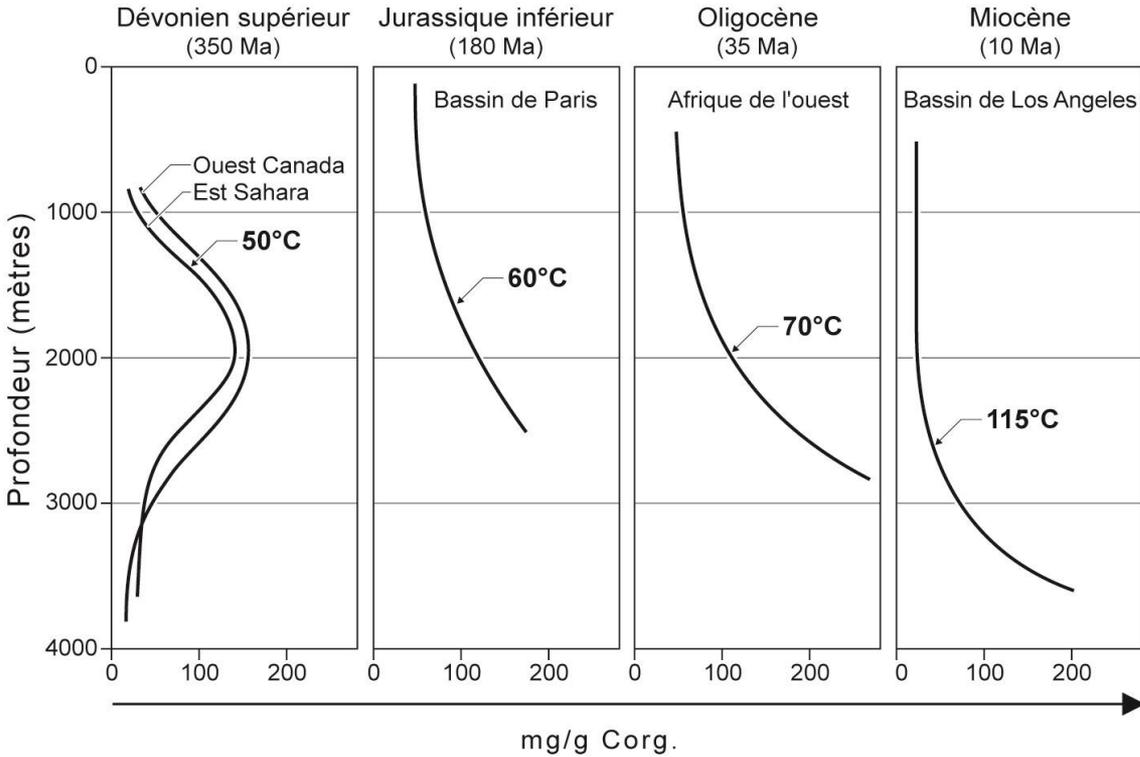
EVOLUTION AVEC LA PROFONDEUR



- Notion de fenêtre à huile et à gaz
- Trois domaines au cours de la maturation thermique

QUANTITES ET COMPOSITIONS DES HC FORMES – POSITION FENETRE A HUILE ET GAZ SELON LES TYPES DE KEROGENE





LE COUPLE TEMPS/TEMPERATURE

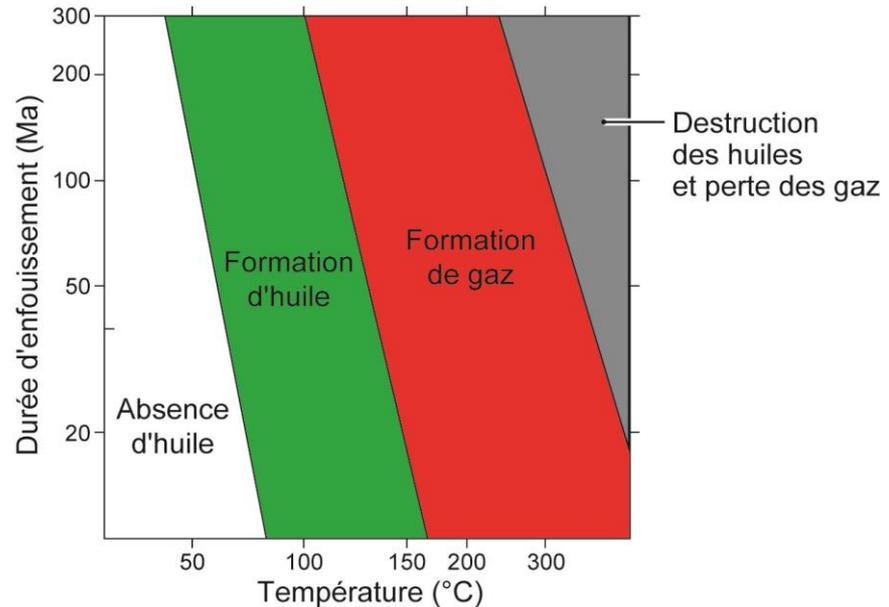
Transformation des kérogènes
fonction linéaire du temps

MAIS

exponentielle avec T °C

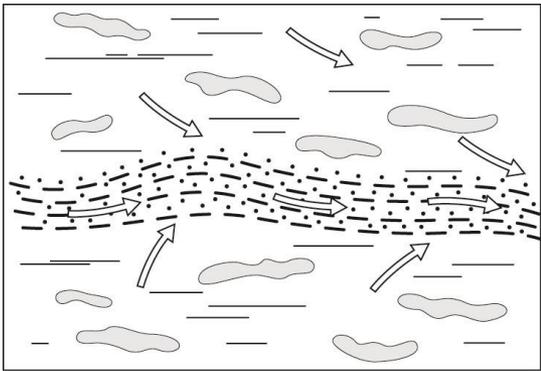
Température minimale (50 °C) nécessaire
initier et entretenir réactions pétrolières
Huiles générées entre 100°C et 150°C
Gaz entre 150°C et 230°C

Fonction gradient géothermique ...
Temps de génération de la 10^{aine} à 100^{aine} Ma

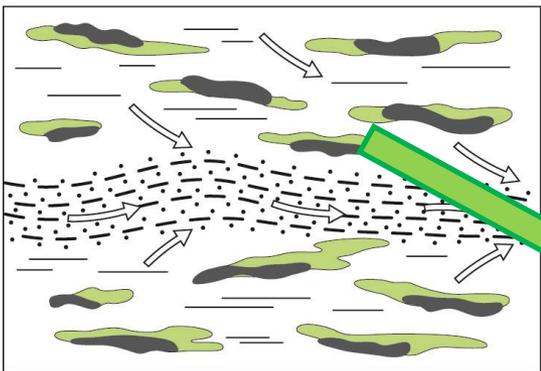


0 1 mm

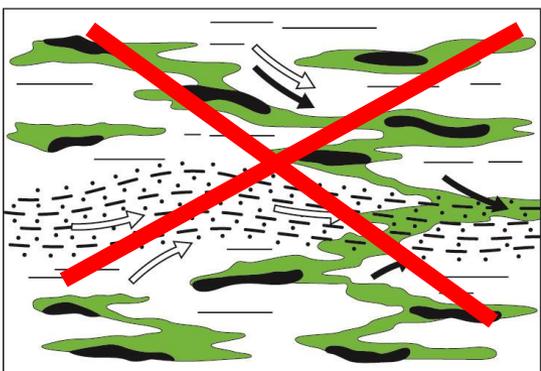
MIGRATION PRIMAIRE = EXPULSION DES HC DE LA ROCHE MERE



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



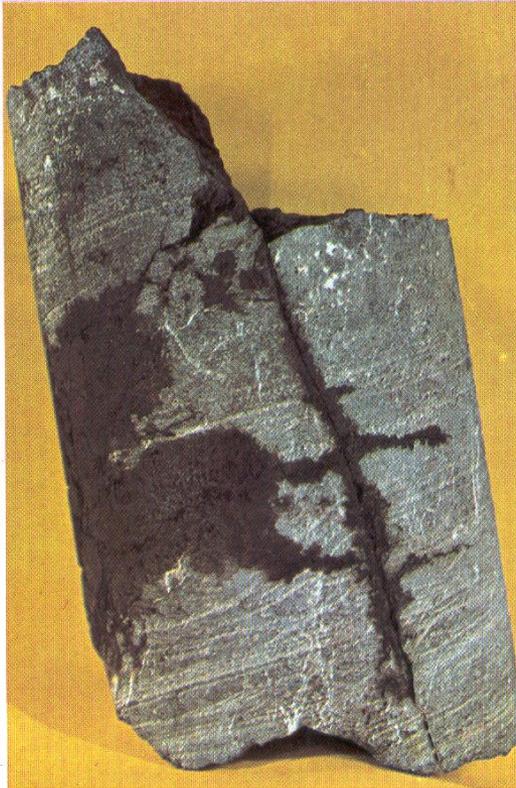
MILIEU OU FIN DE LA FORMATION DE L'HUILE
Porosité = 8%
Saturation en huile = 20%
La migration primaire est possible

- Migration diphasique
- Nécessité seuil saturation en huile

Si pas d'expulsion ...
Huile de roche mère
= Huile de 'schistes'
Shale oil

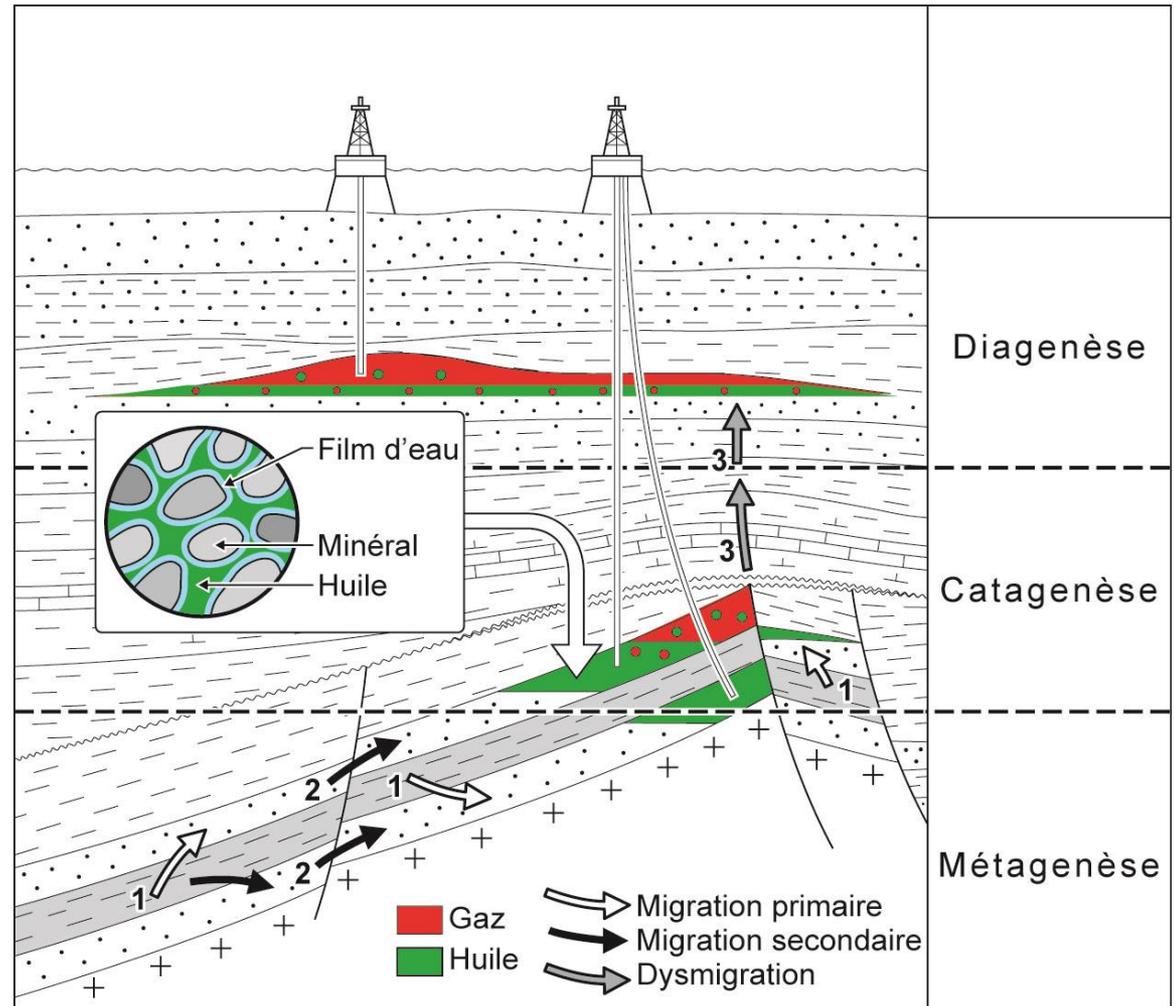
 Argile	 Matière organique (2,5 %)
 Lit silteux	 Ecoulement de l'eau
 Zones où la porosité est envahie par l'huile ou le gaz	 Ecoulement de l'huile

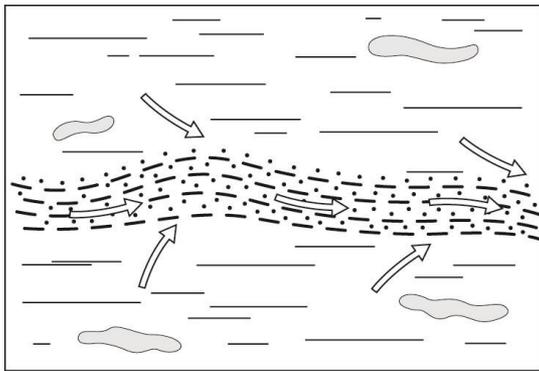
MIGRATIONS ET SYSTÈME PETROLIER



Éléments système pétrolier

- Roche mère mature
- Roche réservoir
- Roche couverture
- Piège
- Calendrier favorable

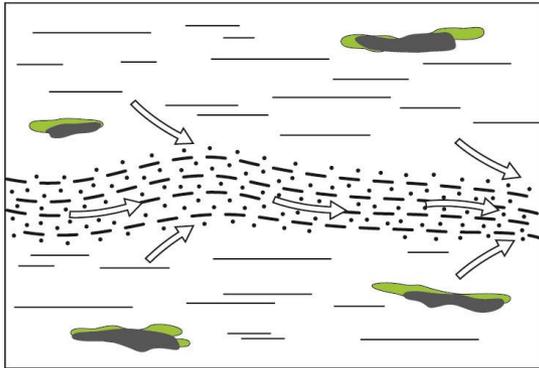




0 1 mm

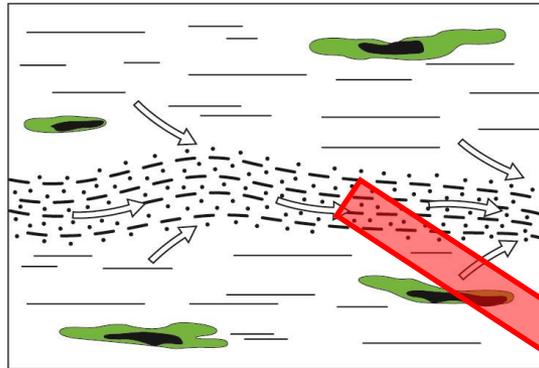
ZONE IMMATURE (Diagenèse)

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

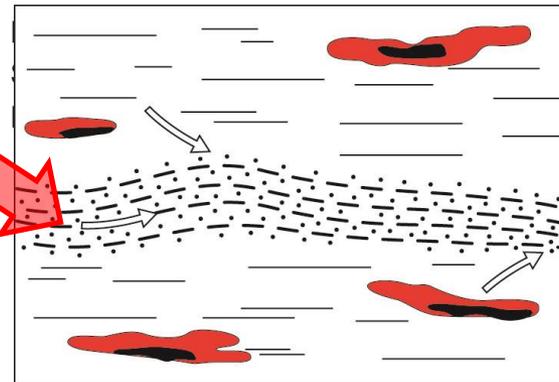


DÉBUT DE FORMATION DE L'HUILE

Les hydrocarbures formés envahissent la porosité
 Porosité = 10%
 Saturation en huile = 2%
 Pas d'expulsion de l'huile

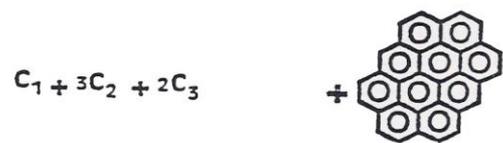
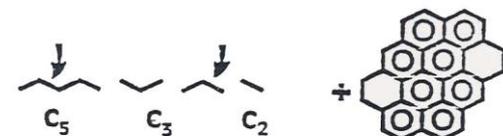
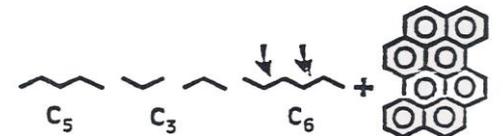
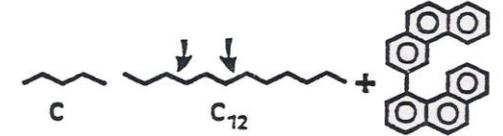
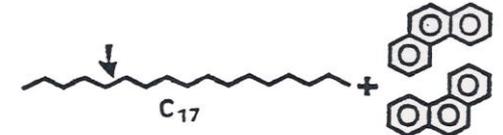


MILIEU OU FIN DE LA FORMATION DE L'HUILE



CRAQUAGE SECONDAIRE

> 150 °C



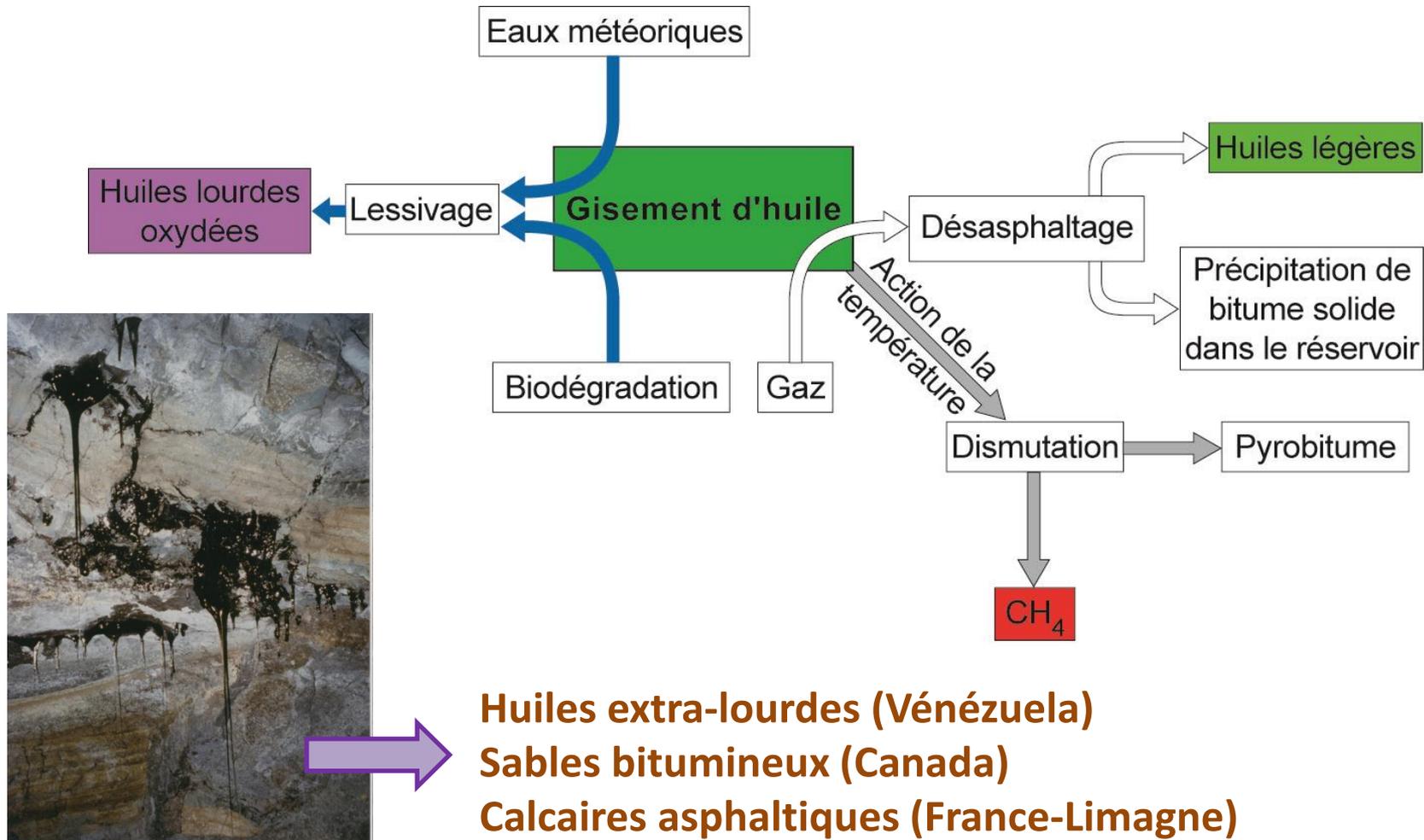
MILIEU OU FIN DE LA FORMATION DU GAZ

Craquage secondaire
 Formation du gaz tardif
 Expulsion possible ou non

Gaz de roche mère
 = Gaz de 'schistes' *Shale gas*

ALTERATION DES HUILES DANS LES RESERVOIRS

Processus physiques, chimiques et biologiques

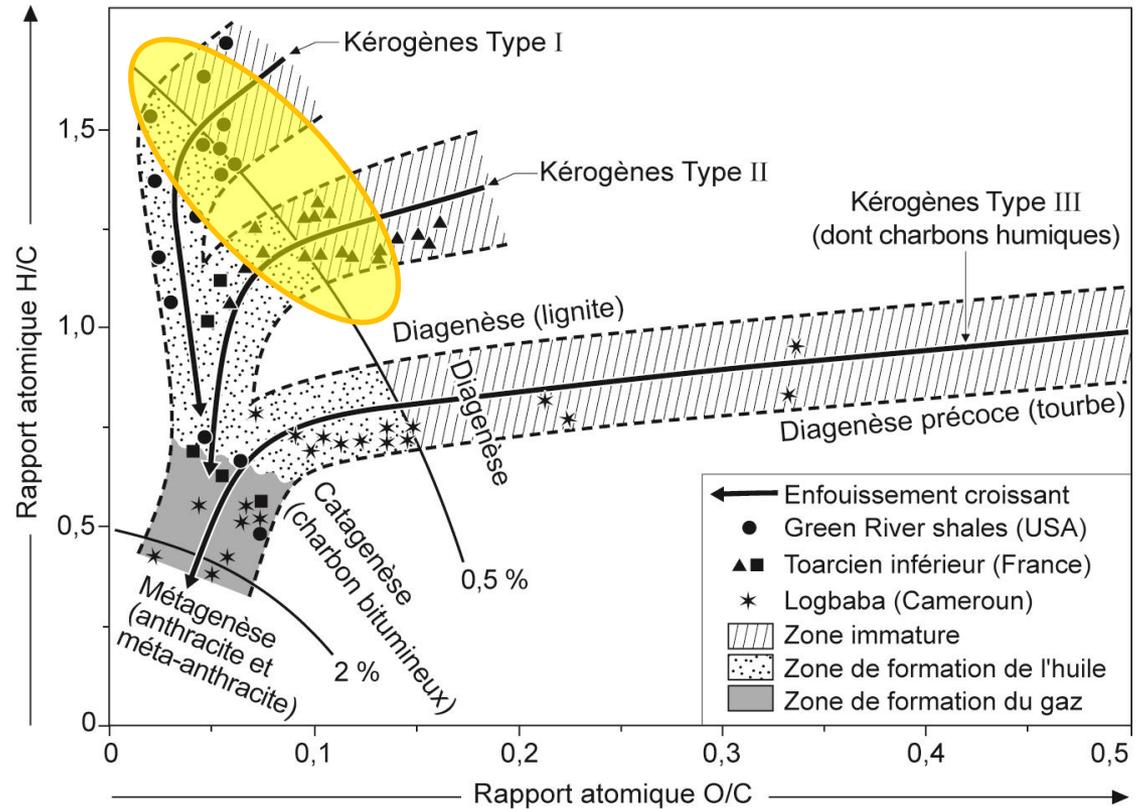


SCHISTES BITUMINEUX – OIL SHALES

Roches mères très riches (> 20% Corg) limite de la catagenèse

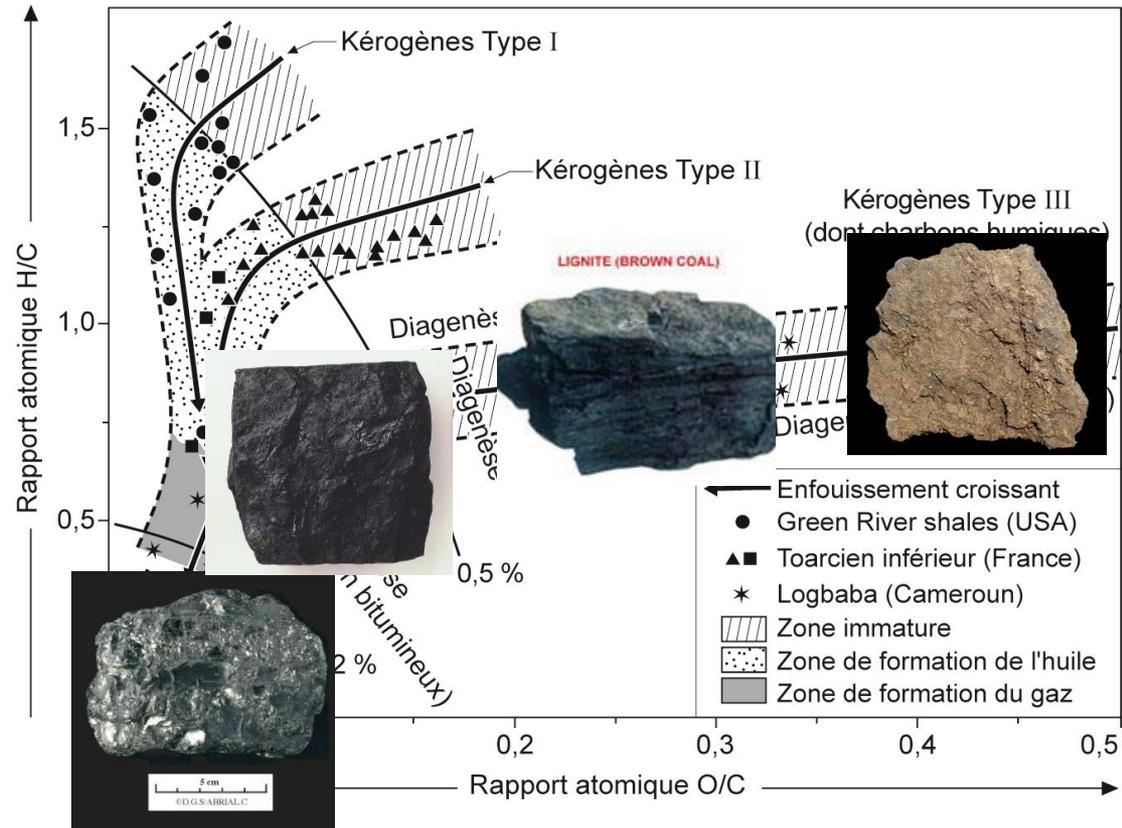
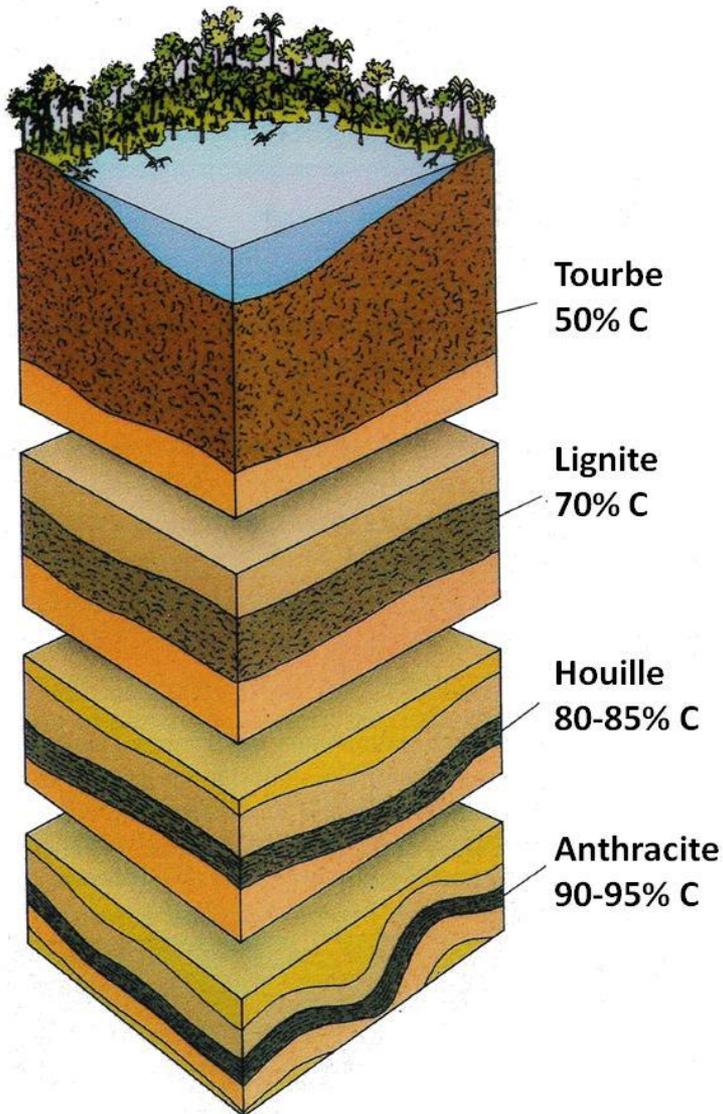


Pas des schistes ! Argilites
Pas du bitume ! Kérogène



Grands gisements : USA, Russie, RDC, Brésil, ...
France : Bassin d'Autun

LIGNEE DES CHARBONS



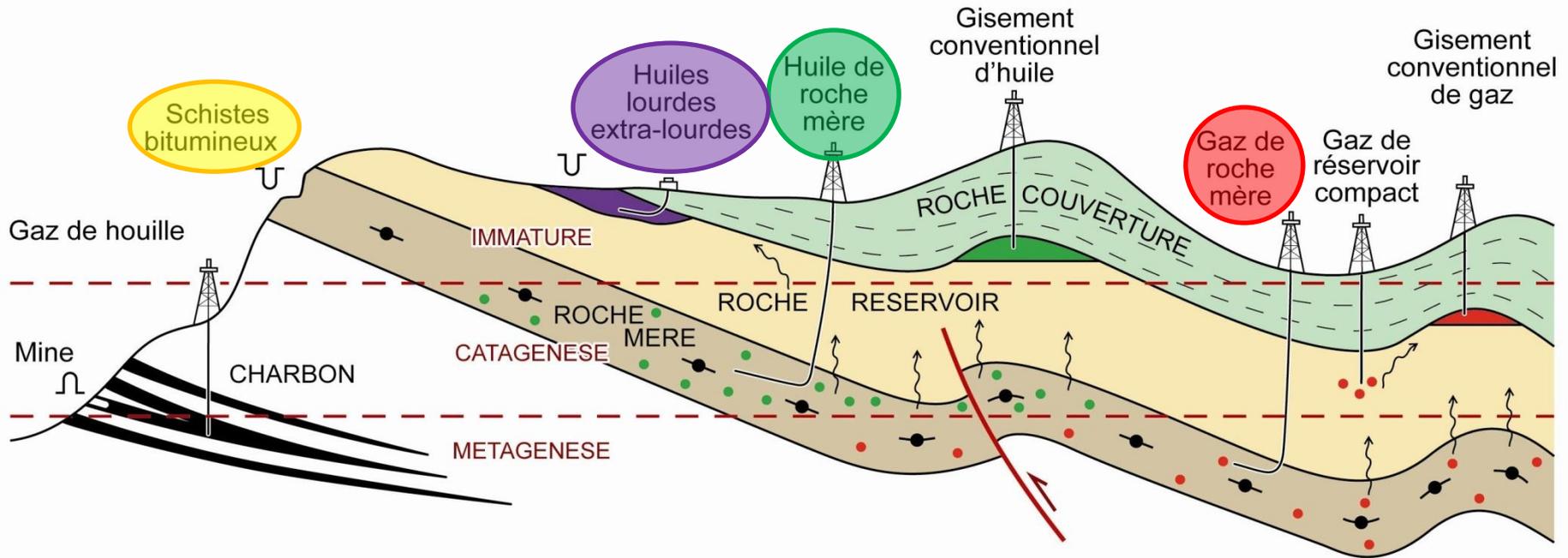
Faible potentiel à huile

Potentiel à gaz

'Gaz de houille' (à l'origine coups de grisou)

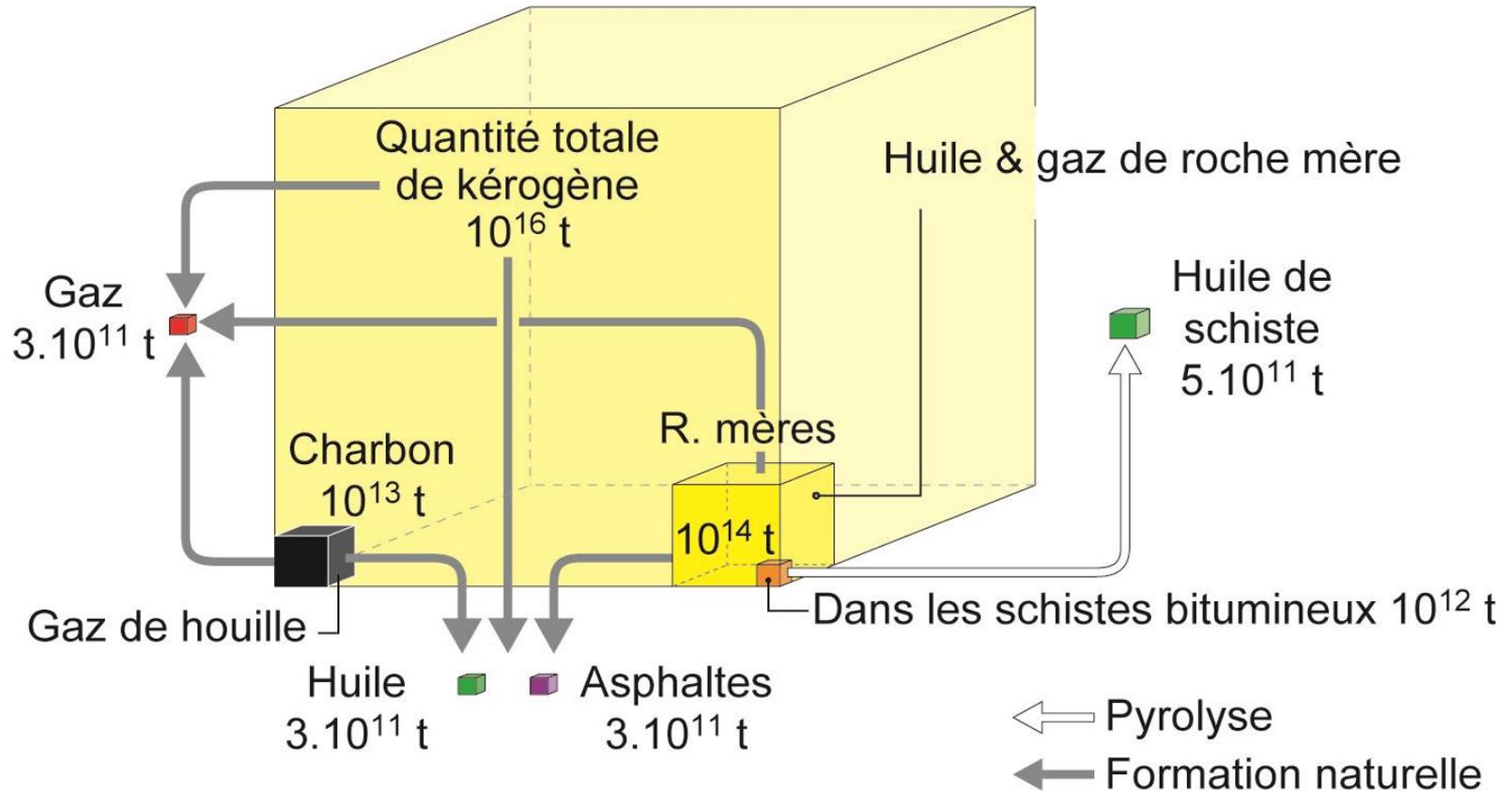
Coal Bed Methane (CBM)

LES COMBUSTIBLES FOSSILES CARBONES



**Les ressources non conventionnelles le sont par leur mode d'exploitation ...
... pas par leur mode de formation**

TAILLE DES RESERVOIRS ET DES RESERVES ...



Des réserves conventionnelles pour le milieu du XXI^e siècle

Des réserves non conventionnelles pour la fin du XXI^e voire milieu XXII^e siècle

D'autres à explorer : clathrates ou hydrates de méthane ?