

## Les combustibles fossiles

Les combustibles fossiles sont des ressources du sous-sol qui existent aussi sur notre territoire, par exemple dans le Bassin aquitain pour le gaz, ou le Bassin parisien pour le pétrole.

→ **Qu'est-ce qu'un combustible fossile?**

### Guide d'exploitation

- (Doc 1) Indiquez les caractéristiques communes aux combustibles fossiles.
- (Doc 1) Déterminez la nature et la profondeur de la roche contenant le gaz de Lacq.
- (Doc 2) Calculez la totalité des réserves mondiales pour chacun des combustibles fossiles. Représentez leurs proportions respectives à l'aide d'un diagramme circulaire.
- (Doc 2 et 3) Sachant qu'en 2004, le pétrole représente 40 % de la consommation globale d'énergie, estimez la date d'épuisement de ce combustible.
- (Doc 3) Compte tenu de l'évolution de la consommation globale, discutez de la pertinence du calcul précédent.

### VOCABULAIRE

**Tonne équivalent pétrole (Tep)** : unité d'énergie qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole, égale à 42 GJ. 1 Tep = 733 barils.

**Baril** : unité de mesure du pétrole équivalent à 159 L.

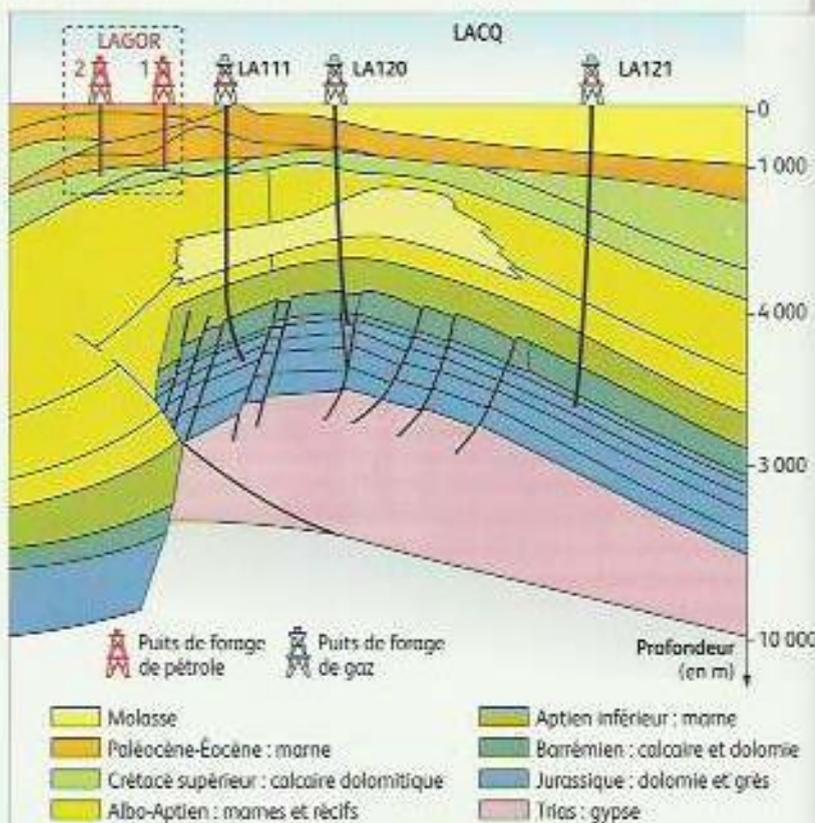
## 1 Les combustibles fossiles

► Le gaz, le pétrole, le charbon sont des combustibles fossiles qui peuvent brûler. Cette combustion libère du carbone sous forme de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) et de monoxyde de carbone (CO) qui sont rejetés dans l'atmosphère.



► Un champ pétrolifère.

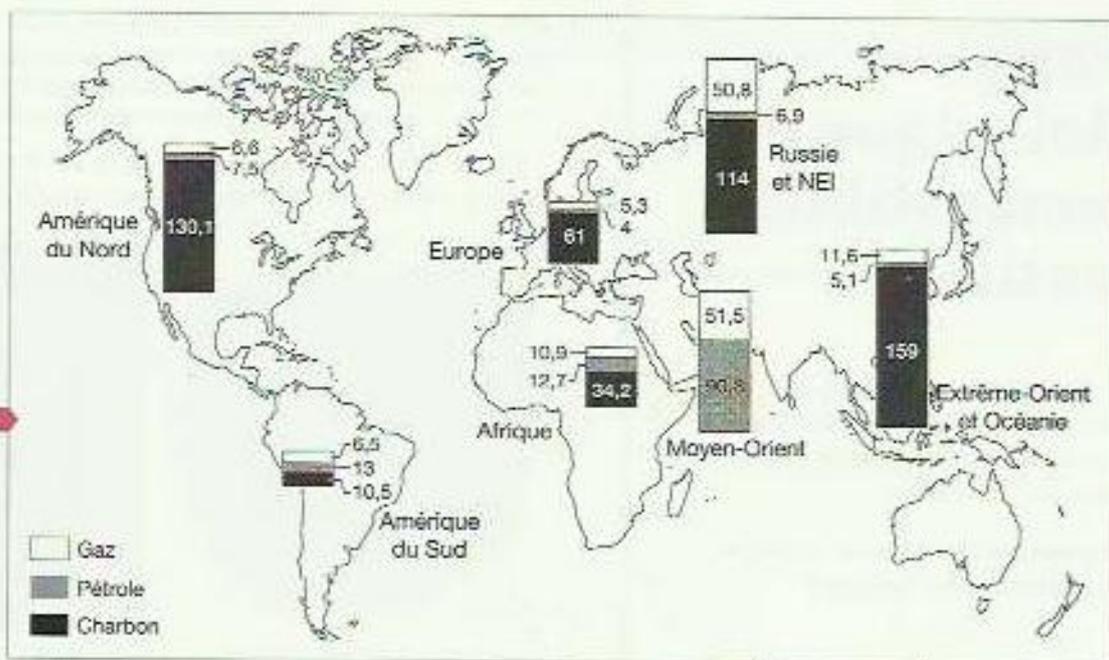
► En 1949, les géologues ont détecté une zone pétrolifère dans un petit village des Pyrénées-Atlantiques, Lacq. Mais en décembre 1951, sous une couche de pétrole assez superficielle, jaillit du gaz naturel à très haute pression. L'exploitation du gisement commença véritablement en 1955.



► Coupe géologique du gisement de Lacq.

## 2 Les réserves mondiales de combustibles fossiles

Carte de la répartition mondiale des réserves des principaux combustibles fossiles, estimées au 1<sup>er</sup> janvier 2003 (en Gtep : 10<sup>9</sup> Tep).



## 3 La consommation énergétique

Les différentes formes de combustibles fossiles carbonés représentent aujourd'hui plus de 85 % des ressources énergétiques consommées dans le monde. En 2004, la consommation globale d'énergie était de 10 Gtep.

Consommation de charbon dans le monde (en millions de tonnes par an).



Consommation de pétrole dans le monde (en barils par jour).



## L'origine biologique des combustibles fossiles

Les combustibles fossiles, stockés dans des roches appelées réservoirs, renferment de l'énergie que l'on peut libérer par combustion.

→ Quelle est l'origine du carbone des combustibles fossiles ?

### Guide d'exploitation

1 (Doc 1) Que suggèrent les empreintes observées dans les charbons quant à l'origine de leur matière carbonée ?

2 (Doc 2) Comparez les structures moléculaires des hydrocarbures et les structures des molécules biologiques proposées.

3 (Doc 2) Justifiez le terme de fossiles géochimiques souvent attribué aux porphyrines, stéranes, hopanes et phytanes des pétroles.

4 (Doc 2) Schématisez le devenir probable d'une molécule de chlorophylle lors de la maturation qui conduit aux hydrocarbures.

5 (Doc 2 et 3) Indiquez l'origine probable du carbone des pétroles.

6 (Doc 1 à 3) En conclusion, comment peut-on justifier l'origine biologique du carbone des combustibles fossiles ?

### VOCABULAIRE

**Grès** : roches sédimentaires constituées de particules cimentées entre elles.

**Schistes** : roches sédimentaires de nature argileuse présentant un aspect en feuillets.

**Hydrocarbure** : molécules carbonées organiques constitutives des pétroles, formées principalement de carbone et d'hydrogène.

## 1 Des fossiles dans les charbons

Les gisements de charbon partagent des caractères communs : ils se présentent en couches rocheuses (veines) intercalées dans des formations sédimentaires d'origine détritique, des grès et des schistes, témoignant d'un dépôt probable dans des zones marécageuses lacustres ou côtières.

Ces gisements ont révélé la présence de nombreux fossiles, aussi bien dans les veines de charbon, que dans les roches les encadrant.



a Empreintes dans un charbon.



b Troncs de fougère fossilisés dans une veine de charbon.

Dans les forêts des régions tempérées, les fougères se présentent sous forme de plantes à la taille souvent modeste (< 2 m) dont les feuilles ont des formes spécifiques en forme de fronde.

Cependant, les régions tropicales humides abritent également des fougères arborescentes dont les frondes, bien plus grandes, sont portées en bouquet au sommet d'un « tronc ».



c Fronde de fougère et fougère arborescente.

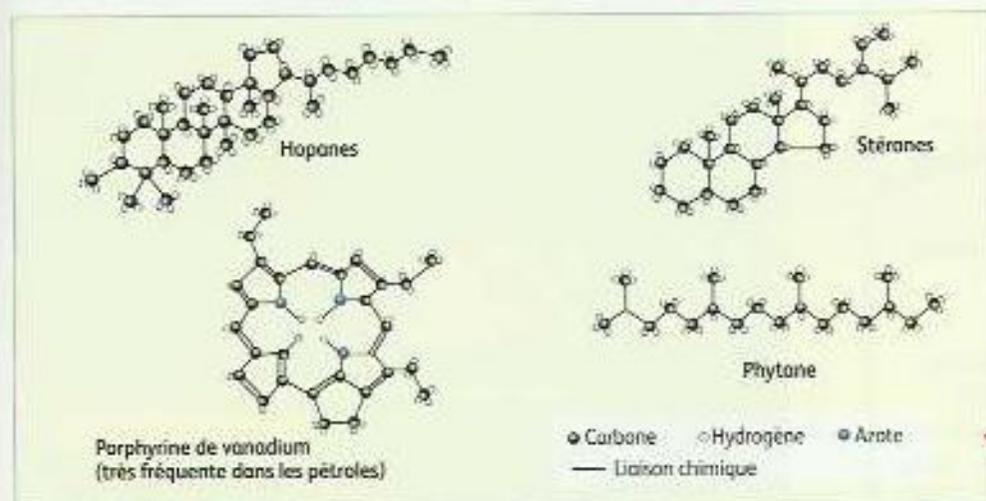
## 2 Des molécules fossiles dans les pétroles

► D'abord considéré par les alchimistes du Moyen-Âge comme issu de « la condensation du mercure et du soufre », le pétrole fut jusqu'à la fin du <sup>xix</sup> siècle considéré comme un produit sans rapport avec la conservation de molécules héritées du vivant.

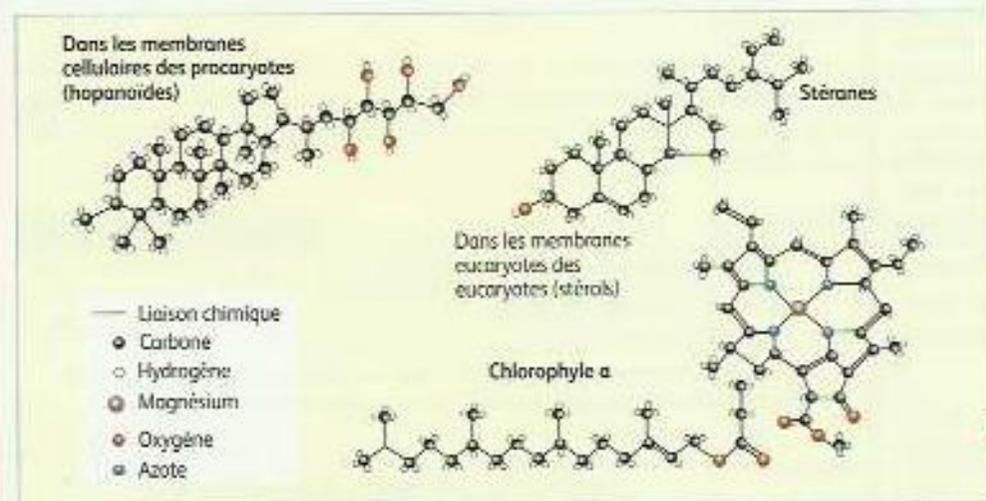
► Depuis cette époque, l'essor de la biochimie et de la géochimie a permis d'imposer l'idée que les molécules constitutives des pétroles sont d'origine biologique.

Élément chimique	Quantité (en % de la masse)
C	82,0 à 86,5
H	10,0 à 13,6
O	0,01 à 3,50
N	0,03 à 1,20
S	0,06 à 5,50

Composition élémentaire des pétroles.



Structures moléculaires de quelques hydrocarbures trouvés dans les pétroles.



Structures de quelques molécules constitutives du vivant.

## 3 De la matière organique à transformer

► Les connaissances des géologues sur la constitution de diverses roches combustibles, et les processus de maturation des matières organiques sédimentaires, leur ont permis de définir le potentiel de maturation d'un certain nombre de matières organiques d'origine biologique.

Origine biologique des matières organiques	Potentiel de maturation en pétrole	Roches combustibles probables après maturation
Plancton lacustre	Bonne à excellente	Schiste bitumineux Pétrole
Plancton marin		
Végétal supérieur continental	Médiocre	Charbon

Potentiel de maturation de matières organiques sédimentaires en fonction de leur origine biologique.

# Activité 3

## De la biomasse aux combustibles fossiles

La matière organique produite par photosynthèse dans un écosystème peut être transformée en combustibles fossiles dans des conditions particulières.

→ Dans quelles conditions se forment les combustibles fossiles ?

### Guide d'exploitation

1 (Doc 1) Localisez les zones de forte productivité océanique.

2 (Doc 1b) Comparez la quantité de matière organique produite chaque année dans les océans à celle accumulée dans les sédiments.

3 (Doc 1 c) Comparez la localisation des zones de haute productivité à celle des zones de dépôts les plus importants.

4 (Doc 2) Établissez le lien entre la transformation de la matière organique sédimentaire en combustible et la profondeur d'enfouissement.

5 (Doc 2) En utilisant les données, expliquez pourquoi la teneur en combustible est plus importante dans les argiles d'Essises que dans celles de Fécocourt.

6 (Doc 1 et 2) Réalisez une série de schémas résumant les différentes étapes de la transformation de la matière organique du plancton au combustible fossile.

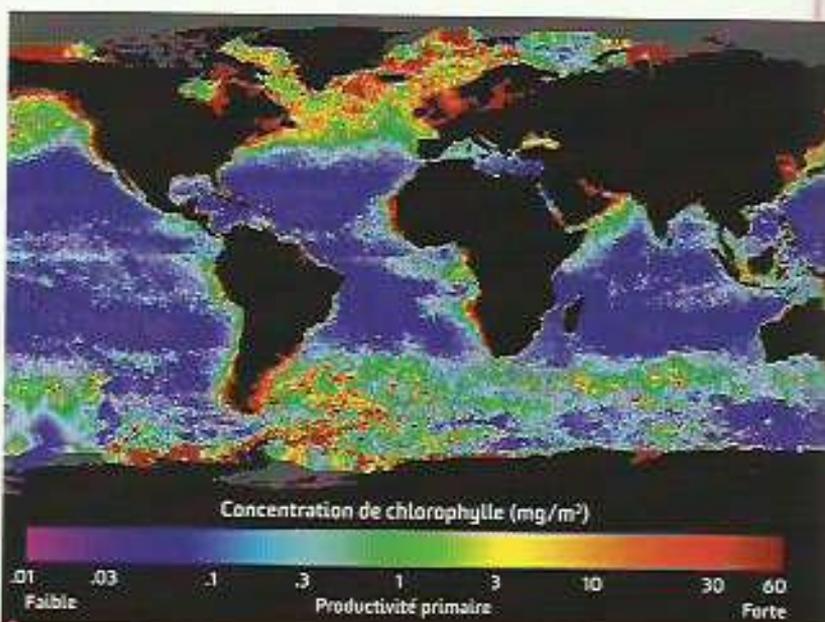
### VOCABULAIRE

**Productivité primaire** : quantité de matière organique produite par les végétaux chlorophylliens par unité de temps.

**Subsidence** : enfoncement progressif du fond d'un bassin sédimentaire.

## 1 Production et conservation de la matière organique

Le phénomène fondamental de la production de matière organique est la photosynthèse. On peut évaluer la **productivité primaire** des océans en détectant par satellite la quantité de chlorophylle présente à leur surface.

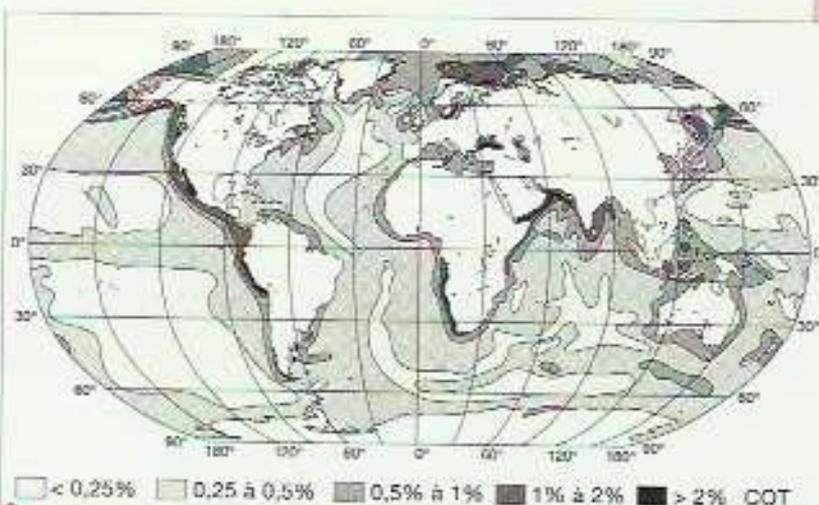


Carte satellitaire de la concentration moyenne annuelle en chlorophylle.

La matière organique d'un écosystème est très rapidement recyclée par l'action des décomposeurs, mais une partie de cette matière peut échapper à la dégradation si elle est piégée dans les sédiments qui se déposent au fond des océans.

	Océan	Zones côtières
Production primaire	50	entre 150 et 250
Carbone organique accumulé dans les sédiments	0,01	entre 3 et 13

Comparaison entre la quantité de carbone organique produite et celle accumulée dans les sédiments (en g de carbone organique/m<sup>2</sup>/an).



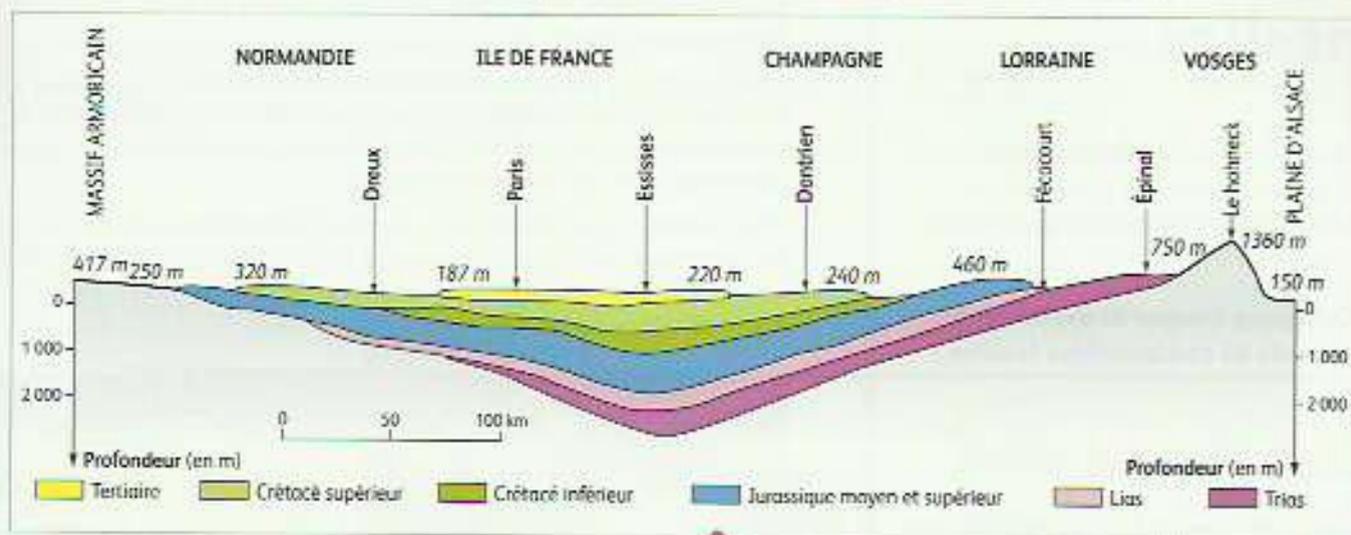
Teneur en carbone organique des sédiments marins actuels.

## 2 Transformation de la matière organique

► La matière organique piégée dans les sédiments peut se transformer progressivement en combustible fossile.

► Une couche sédimentaire argileuse du Bassin de Paris, datée de 180 Ma (Lias) est étudiée. Cette couche a été déposée à fai-

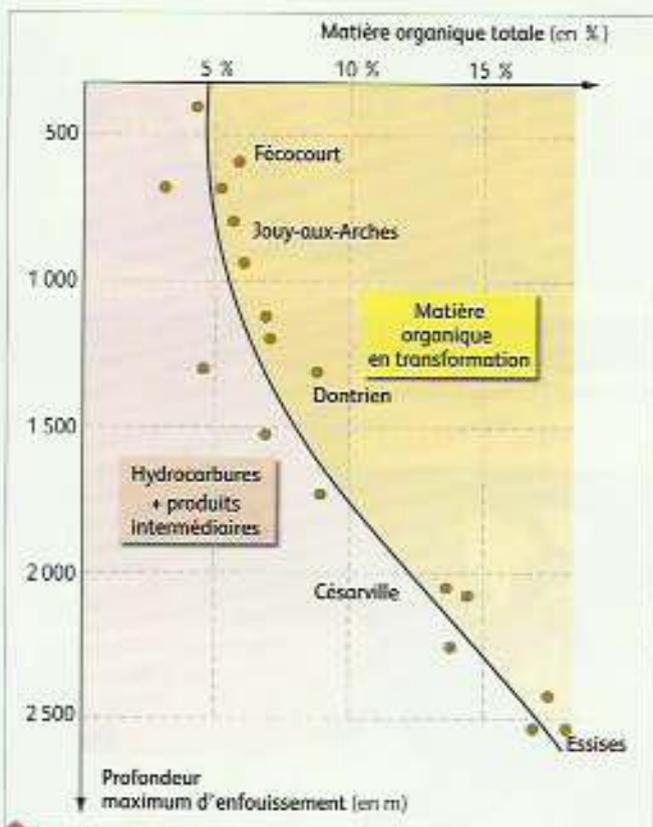
ble profondeur. L'enfoncement progressif et variable en fonction des endroits, du fond du bassin, ou **subsidence**, a permis la superposition d'une grande quantité de sédiments. Ainsi, la couche étudiée a été plus ou moins enfouie depuis sa formation.



**a** Coupe Ouest-Est du Bassin de Paris.

► On prélève des échantillons à différentes profondeurs par forage et on évalue le pourcentage de la matière organique totale transformée en combustible fossile.

► De la matière organique prélevée à faible profondeur dans la couche argileuse étudiée est soumise pendant des durées variables à des températures différentes. On mesure la quantité de matière organique transformée en combustible.



**b** Pourcentage de matière organique transformée en combustible en fonction de la profondeur d'enfouissement.

► Les combustibles obtenus sont semblables à ceux extraits de l'argile. Maintenus à température constante, mais soumis à des pressions croissantes, la matière organique extraite de ces mêmes argiles donne toujours la même quantité de combustibles quelle que soit la pression appliquée.

Profondeur (en m)	Température (en °C)
0	15
1 200	40
1 500	64
1 800	85
1 900	80

**c** Température en fonction de la profondeur dans le Bassin de Paris.

Temps (en jours)	mg d'hydrocarbures par g de kérogène initial		
	180 °C	200 °C	220 °C
1	5,9	6,8	9,2
3	6,6	8,7	13,1
10	6,6	9,2	14,0
30	8,8	14,8	21,4
90	10,4	12,2	30,0
180	10,7	22,2	30,4
270	12,8	21,1	36,2

**d** Quantité de combustible formé en fonction de la température et du temps.

## Les gisements de combustibles fossiles

La matière organique sédimentaire peut se transformer en combustibles fossiles dans des conditions géologiques particulières.

→ **Comment trouver et exploiter des gisements de combustibles fossiles ?**

### Guide d'exploitation

1 (Doc 1) Comparez la localisation des gisements de pétrole et de gaz avec la répartition des bassins sédimentaires au cours des temps géologiques.

2 (Doc 2) Déterminez les caractéristiques, porosité et perméabilité, de la roche riche en hydrocarbure ou roche réservoir.

3 (Doc 2) Analysez la nature des roches sédimentaires situées au-dessus des roches qui contiennent des hydrocarbures.

4 (Doc 2) Proposez une explication à la localisation des combustibles dans la roche réservoir.

5 (Doc 2) Réalisez une série de schémas présentant le devenir du combustible fossile de sa roche mère à sa roche réservoir.

### VOCABULAIRE

**Roche réservoir** : roche poreuse et perméable capable de contenir des fluides.

**Perméabilité** : aptitude d'une roche à se laisser traverser par un fluide.

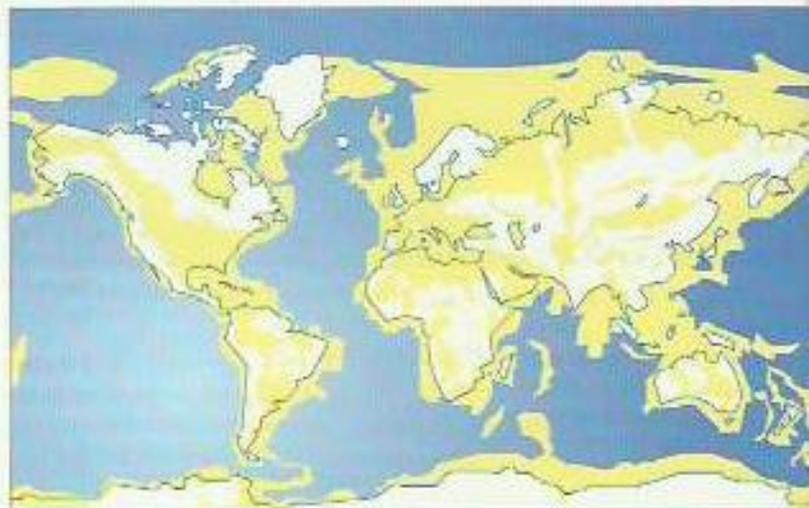
**Porosité** : volume relatif des espaces présents dans la roche.

## 1 Localiser les gisements de combustibles fossiles dans le monde

► En temps normal, l'essentiel de la matière organique est recyclée par les décomposeurs. Tout ce qui échappe à ce phénomène est donc associé à un environnement spécifique.

► Des conditions géologiques particulières sont nécessaires pour qu'il y ait formation de combustibles fossiles : production de biomasse, dépôt et enfouissement d'une partie de cette biomasse, puis transformation progressive au cours des temps géologiques.

► Ces conditions sont réunies sur les marges continentales et dans les mers peu profondes, qui forment des bassins sédimentaires. Actuellement, on trouve des bassins sédimentaires en mer mais aussi sur des continents dans des zones autrefois immergées.



■ Bassins sédimentaires

a Répartition géographique mondiale des bassins sédimentaires actuels et passés.



b Répartition géographique mondiale des gisements exploités de gaz et de pétrole.

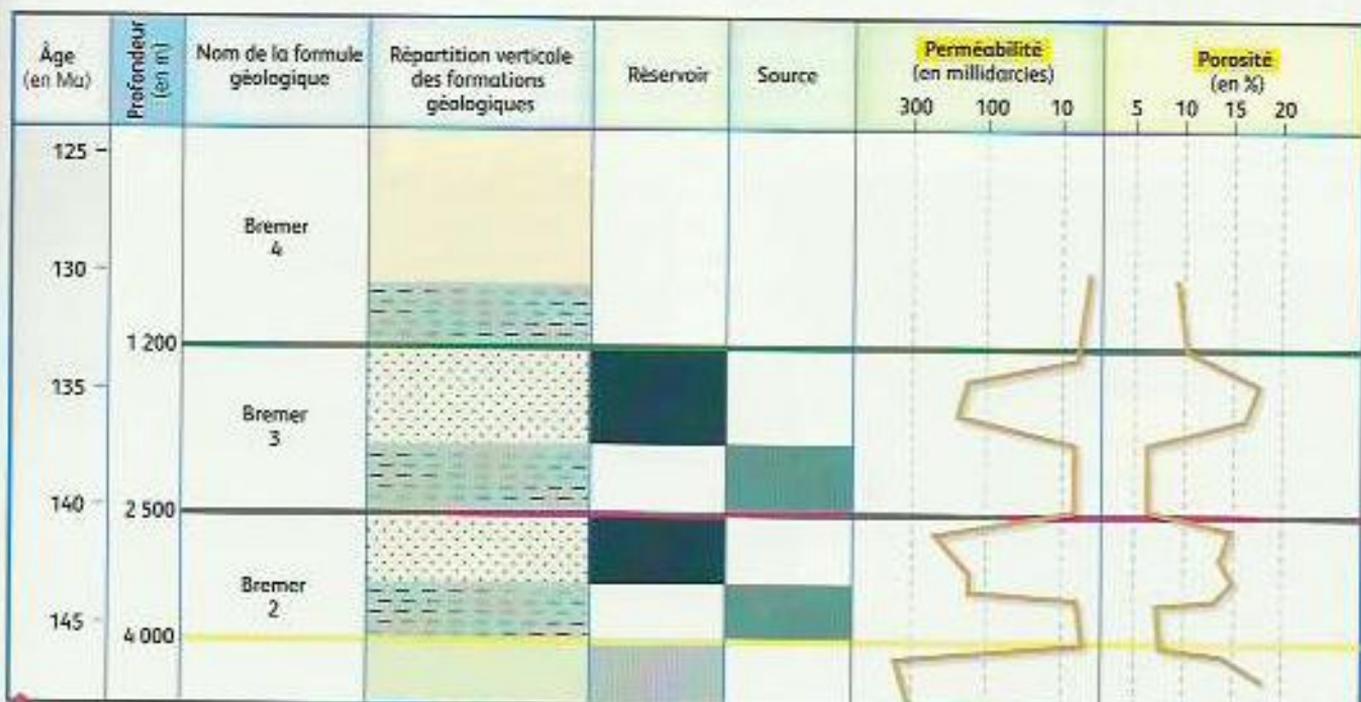
## 2 De la roche réservoir au gisement

Des études ont été réalisées dans un bassin sédimentaire au large de l'Australie afin d'établir les caractéristiques d'un gisement de combustibles.

La transformation de la matière organique en combustibles fossiles s'effectue dans la roche mère. Les combustibles formés,

pétrole et gaz, peu denses, migrent lentement vers la surface et peuvent s'accumuler dans une roche appelée **roche réservoir**.

Des forages permettent de caractériser les niveaux riches en combustibles fossiles dans les roches sédimentaires et de les analyser.



Carottage de la zone ayant livré des indices pétroliers.

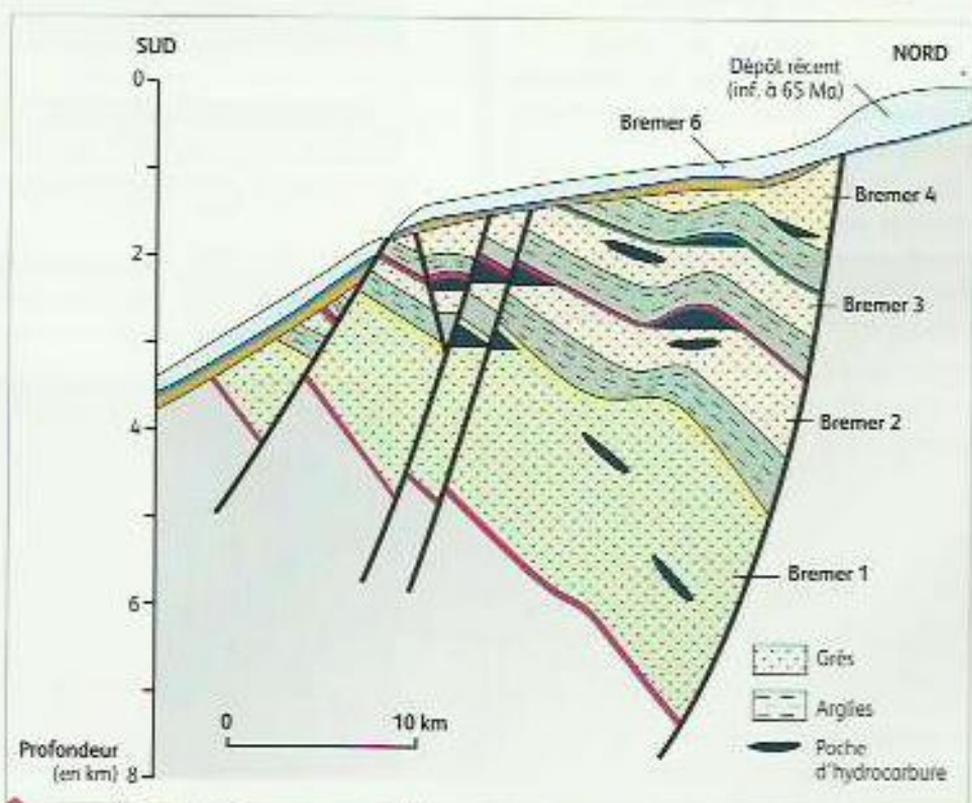
Grès Argiles



Observation au microscope d'une roche réservoir : le pétrole imprègne la roche.

La disposition des différentes formations géologiques est précisée.

Au cours de leur enfouissement, les argiles subissent une compaction qui entraîne l'expulsion des fluides qu'elles contiennent (dont les hydrocarbures) et deviennent ainsi progressivement imperméables.



Coupe géologique de la marge australienne.

## Recherche de nouveaux gisements

De nombreux processus biologiques et géologiques se succèdent pour transformer l'énergie solaire en gisements de combustibles fossiles. L'Homme utilise ces énergies non renouvelables à un rythme croissant.

→ Comment localiser de nouveaux gisements de combustibles fossiles ?

→ Quelles sont les implications économiques et environnementales ?

### Guide d'exploitation

1 (Doc 1) Recensez les données nécessaires pour établir une image numérique.

2 (Doc 2) Donnez les caractéristiques d'un gisement des grands fonds.

3 (Doc 2) Repérez au moins une contrainte rencontrée par les industries pétrolières qui exploitent les gisements des grands fonds.

4 (Doc 3) Sachant que le prix du baril de pétrole est passé de 16 à 70 dollars en quelques années, proposez une explication à l'exploitation récente des sables bitumineux.

5 (Doc 3) Identifiez les conséquences écologiques dues à l'exploitation de ces gisements.

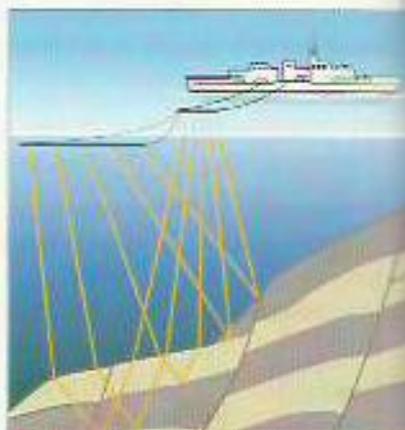
### VOCABULAIRE

**Réflecteur sismique** : interface entre deux couches géologiques distinctes sur laquelle les ondes sismiques se réfléchissent.

## 1 Faire parler le sous-sol

Les techniques de prospection ont beaucoup évolué afin de permettre de localiser de nouveaux gisements.

Utiliser la propagation des ondes : on envoie des ondes qui pénètrent dans le sous-sol. Quand elles rencontrent une limite entre deux couches géologiques, un **réflecteur sismique**, elles sont renvoyées vers la surface où elles sont reçues par des capteurs. On parvient ainsi à reconstituer une image en deux dimensions de la disposition des couches géologiques.



Récolter des données de sismique réflexion.

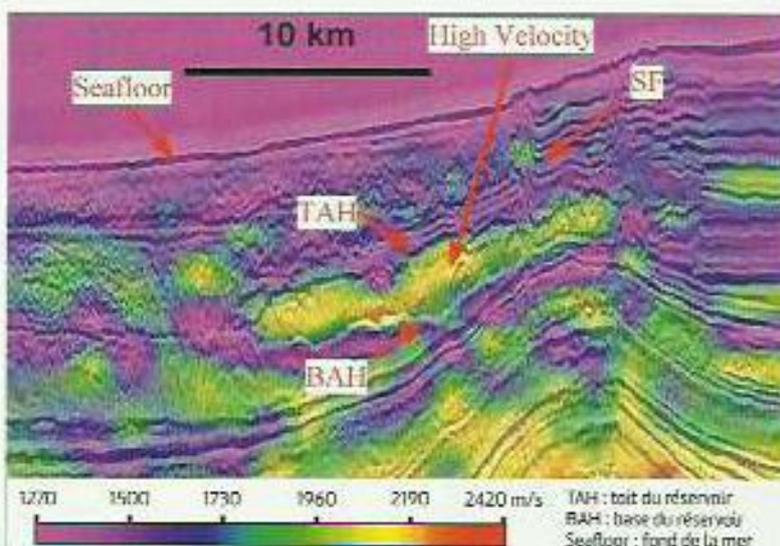
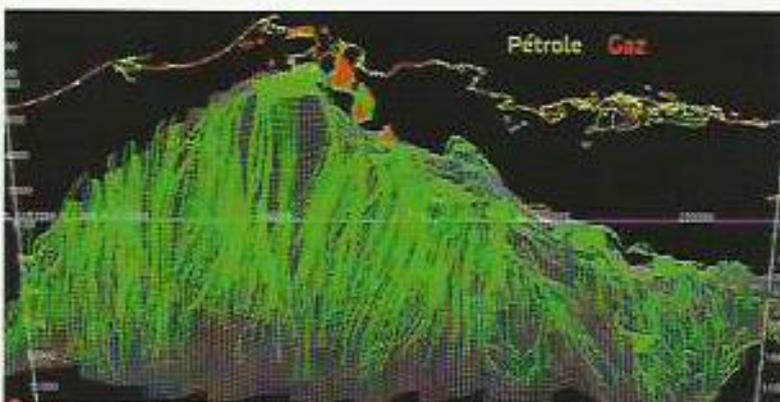


Image sismique réflexion : réflecteurs et vitesse des ondes.

Vitesse dans les sédiments de 1 500 à 1 600 m/s. Vitesse dans les combustibles de 2 000 à 2 100 m/s.

Utiliser la modélisation informatique : à partir de l'ensemble des données, on peut reconstituer une image en trois dimensions de la localisation des combustibles fossiles dans le sous-sol.



Modèle numérique en 3D de prédiction des voies de migration et de stockage du pétrole dans une roche réservoir au large de l'Alaska.

## 2 Exploiter des gisements extrêmes : exemple des grands fonds

▶ Dans les domaines conventionnels peu profonds, les découvertes de nouveaux gisements sont rares. Les compagnies pétrolières développent donc des technologies leur permettant d'exploiter les hydrocarbures des grands fonds.

▶ À 1 500 m sous la surface de la mer, la température n'est que de 4 °C, et la pression atteint 150 bars, soit 150 kg/cm<sup>2</sup>. Dans de telles conditions, le pétrole se fige instantanément pouvant paralyser tout le système de production. De nouvelles

technologies sont indispensables afin de limiter le refroidissement des fluides tout au long du parcours à travers les flexibles qui les conduiront jusqu'à la surface.

▶ Des conséquences écologiques : en avril 2010, une plateforme pétrolière située dans le golfe du Mexique, non loin des côtes américaines, a sombré provoquant une importante marée noire.



a Unité flottante de production.



b Incendie d'une plate forme pétrolière.

## 3 Implications environnementales : les sables bitumineux du Canada

▶ Découverts à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle, les sables bitumineux du Canada ne sont exploités que depuis 2004.

▶ Les combustibles sont riches en soufre et métaux lourds et sont visqueux car ils sont mélangés avec du sable. Ils nécessitent des traitements supplémentaires et leur exploitation a une forte empreinte écologique :

- déforestation : 3 000 km<sup>2</sup> de forêts ont déjà été abattus ;
- pollution : de grandes quantités d'eau sont nécessaires pour séparer le combustible du sable ;
- émission de gaz à effet de serre : cette production engendrerait 45 % d'émissions supplémentaires par rapport à une production classique.

Carrière de sables bitumineux exploités à ciel ouvert au Canada.

