

18e Olympiade internationale des Sciences de la Terre
Épreuve théorique individuelle, partie 1

Numéro d'identification :

Feuille de réponses (ne pas détacher)

1	2	3	4	5
6	7	8	9	10
11	12	13	14	15
16	17	18	19	20
21	22	23	24	25
26	27	28	29	30
31	32	33	34	35
36	37	38	39	40
41	42	43	44	

**N'ouvrez PAS la feuille d'examen avant que le
surveillant annonce le début de l'examen.**

Instructions pour l'examen

1. **Durée de l'examen** : La durée totale de la partie 1 est de **180 minutes**. Une fois l'examen terminé, vous devez **immédiatement cesser d'écrire** et attendre que les feuilles réponses soient ramassées.
2. **Remise des réponses** :
 - Toutes les réponses doivent être reportées dans les cases numérotées correspondantes sur la **page de couverture**. **Ne dépassez pas les limites** de la zone de réponse.
 - Seule la **lettre majuscule** (A, B, C, etc.) correspondant à la ou les bonne(s) réponse(s) doit/doivent être inscrite(s).
 - Même si vous cochez la bonne réponse à côté de la question, vous n'obtiendrez **AUCUN** point si elle n'est **pas** recopiée sur la page de couverture.
 - Si vous devez modifier une réponse, **tracez une ligne unique sur la réponse originale** et écrivez la nouvelle réponse dans la case prévue à cet effet (par exemple, ~~ABC~~AB).

Section A : Les océans et les systèmes terrestres

La mer de Chine du Sud est une mer marginale géologiquement dynamique et écologiquement diversifiée, située à l'intersection de plusieurs plaques tectoniques et de plusieurs régimes climatiques. Bordée par le continent asiatique au Nord et à l'Ouest et par des arcs insulaires à l'Est et au Sud, elle abrite un large éventail d'environnements marins, allant des plateaux continentaux peu profonds aux fosses océaniques profondes et aux bassins océaniques. Comme le montre la figure A-1, la topographie de la mer de Chine du Sud révèle une large marge continentale, des récifs coralliens et des îles éparpillés, ainsi qu'une vaste plaine abyssale atteignant plus de 4 000 mètres de profondeur.

Les processus marins dans la mer de Chine du Sud reflètent les interactions complexes entre la lithosphère, l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère. La figure A-2 illustre un profil typique de marge continentale, montrant la transition entre d'une part la plaine côtière et le plateau continental et d'autre part le talus et le glacis continental, la plaine abyssale et les canyons sous-marins. Ces éléments structurels contrôlent la distribution des sédiments et les gradients d'énergie au niveau des fonds marins. Les courants de turbidité, des flux denses chargés de sédiments qui descendent rapidement le long des canyons sous-marins, souvent déclenchés par des tempêtes, des tremblements de terre ou des crues fluviales, sont particulièrement importants. Ces flux jouent un rôle clé dans la formation des pentes continentales et des cônes abyssaux, et ont causé de multiples ruptures de câbles sous-marins au cours des dernières décennies.

La figure A-3 montre la stratification verticale des masses d'eau océaniques et des zones benthiques. La pleine mer est généralement définie comme la profondeur océanique où la lumière commence à s'estomper, à environ 200 m ou au point de transition entre le plateau continental et le talus continental. Les conditions qui règnent dans les grands fonds marins sont une combinaison de basses températures, d'obscurité et de haute pression. Les grands fonds marins sont considérés comme le biome le moins exploré de la Terre, car leurs conditions extrêmes rendent cet environnement difficile d'accès et difficile à explorer. L'entrée de la lumière, l'activité biologique, la température et la pression varient considérablement avec la profondeur, ce qui affecte à la fois les écosystèmes pélagiques et les

processus au fond des océans.

Dans cette section, vous découvrirez comment la topographie, la dynamique des sédiments et la profondeur de l'eau interagissent pour créer différents environnements écologiques et de dépôt dans la mer de Chine du Sud.

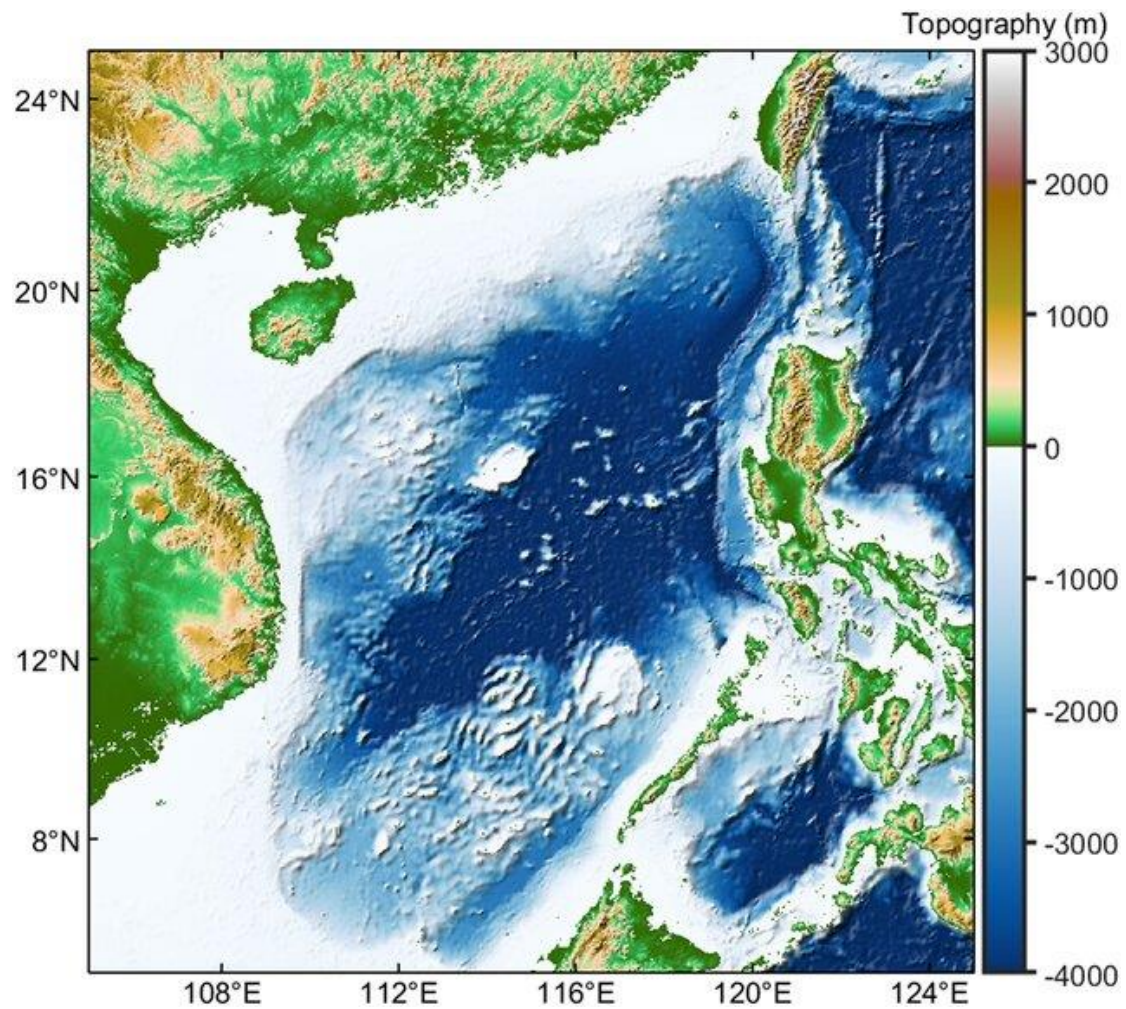


Figure A-1 Carte bathymétrique (profondeur) de la mer de Chine du Sud (Yuan et al., 2024, JGR : Oceans)

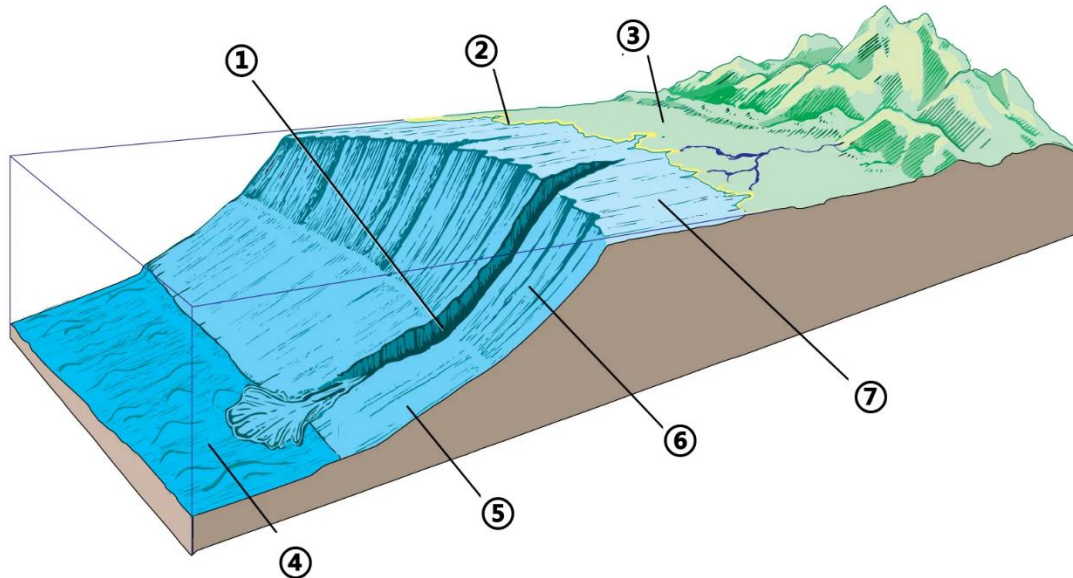


Figure A-2 Une marge continentale

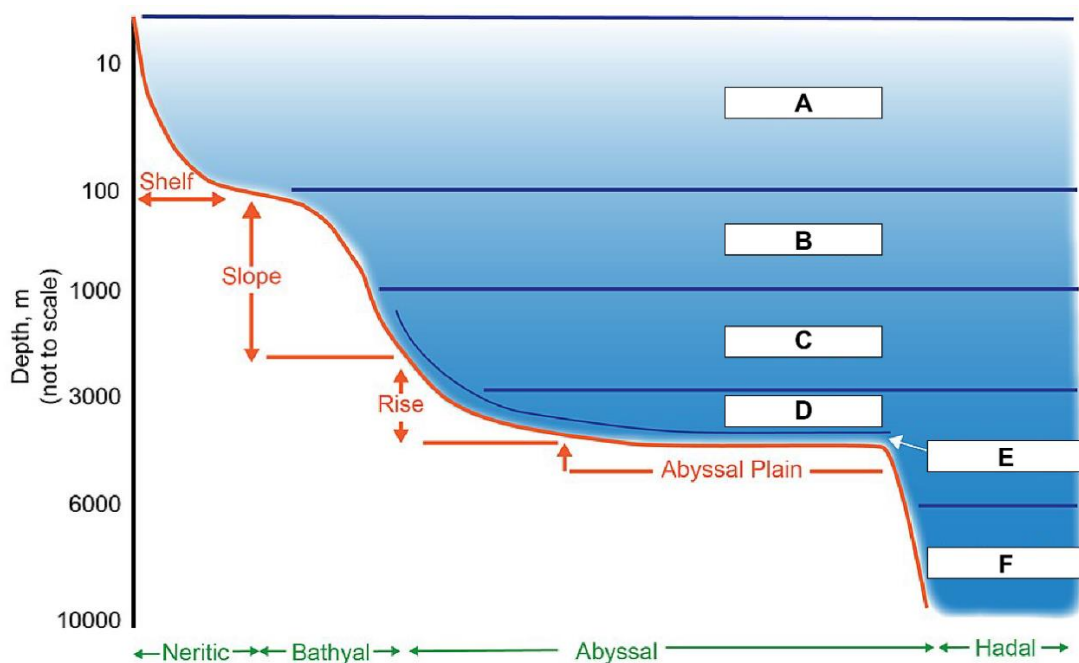


Figure A-3 Représentation schématique des zones pélagiques (colonne d'eau) et benthiques (fond océanique)

Shelf = plateau continental, *slope* = talus continental, *rise* = glacis continental, *abyssal plain* = plaine abyssale, *neritic* = néritique, *bathyal* = benthique, *abyssal* = abyssale, *hadal* = ultra-abyssale

Question 1 :

La figure A-1 montre les caractéristiques bathymétriques de la mer de Chine du Sud et des régions environnantes. Plusieurs zones sont visibles, notamment des bassins profonds, un talus continental et des régions peu profondes parsemées d'atolls et de petites îles.

Parmi les régions de la figure A-1, lesquelles sont les plus susceptibles de favoriser la sédimentation carbonatée ? (une seule réponse correcte)

- A. Un large bassin profond et plat situé dans la partie centrale de la carte
- B. Une région étroite et escarpée qui descend en pente raide depuis la marge continentale
- C. Une zone peu profonde dans la partie sud de la carte, parsemée de petites îles
- D. Une zone abyssale profonde au sud-ouest du bassin principal

Question 2 :

La figure A-2 illustre la coupe transversale d'une marge continentale, montrant la transition entre la plaine côtière d'une part et le plateau continental, le talus continental, le glacis et la plaine abyssale, d'autre part. Parmi les affirmations suivantes concernant la sédimentation en eaux profondes et les courants de turbidité dans le sud de la mer de Chine, lesquelles sont correctes ? (une seule réponse correcte)

- A. Le transport par des courants de turbidité, la chute de poussière éolienne et le dépôt détritique transportés par la glace sont les principaux mécanismes d'entrée des sédiments terrigènes dans les profondeurs marines.
- B. Les courants de turbidité sont très rapides (jusqu'à plusieurs dizaines de mètres par seconde).
- C. Les sédiments des zones ultra-abyssales (à plus de 6 km de profondeur) sont généralement composés d'argile à grains fins et de dépôts gravitaires tels que les turbidites.
- D. Les sédiments silicoclastiques à grains grossiers ne sont pas présents dans les océans profonds.

Question 3 :

Quels systèmes terrestres peuvent interagir dans la formation de roches sédimentaires telles que le calcaire, la craie et le chert sur le plateau continental ? (une seule réponse correcte)

- A. Seules la géosphère et l'hydrosphère.
- B. Seules l'hydrosphère et la biosphère.
- C. Seules la biosphère et la géosphère.
- D. Seules l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère.
- E. Seules l'hydrosphère, la géosphère et la biosphère.
- F. L'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la géosphère.

Question 4 :

Quels systèmes terrestres peuvent interagir dans la formation de roches sédimentaires telles que l'argile et le chert au niveau de la plaine abyssale ? (une seule réponse correcte)

- A. Seules la géosphère et l'hydrosphère.
- B. Seules l'hydrosphère et la biosphère.
- C. Seules la biosphère et la géosphère.
- D. Seules l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère.
- E. Seules l'hydrosphère, la géosphère et la biosphère.
- F. L'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la géosphère.

Question 5 :

Quels systèmes terrestres interagissent le moins au niveau des fosses océaniques ? (une seule réponse correcte)

- A. Seules la géosphère et l'hydrosphère.
- B. Seules l'hydrosphère et la biosphère.
- C. Seules la biosphère et la géosphère.
- D. Seules l'hydrosphère, l'atmosphère et la biosphère.
- E. Seules l'hydrosphère, la géosphère et la biosphère.
- F. L'atmosphère, l'hydrosphère, la biosphère et la géosphère.

Question 6 :

Laquelle des zones suivantes de la figure A-2 est la plus susceptible de servir de point de départ aux courants de turbidité ? (une seule réponse correcte)

- A. Zone ④
- B. Zone ⑤
- C. Zone ⑥
- D. Zone ⑦

Question 7 :

Quel(le)s processus ou caractéristiques suivant(e)s sont généralement associé(e)s à la sédimentation dans la zone ② ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Accumulation de débris sous-marins formant des couches épaisses et stratifiées
- B. Dominance de la profondeur de compensation de la calcite (CCD) dans le contrôle de la préservation des sédiments
- C. Bioturbation active causée par des organismes fouisseurs tels que les vers et les crabes
- D. Changements saisonniers dans la dynamique des événements fluviaux affectant l'apport sédimentaire et sa composition

Question 8 :

Laquelle des zones suivantes de la figure A-3 présente le niveau le plus élevé de productivité biologique ? (une seule réponse correcte)

- A. Zone A
- B. Zone B
- C. Zone D
- D. Zone E

Question 9 :

La figure A-3 comprend la zone F, qui correspond à la zone ultra-abyssale, la couche la plus profonde de l'océan située au niveau des fosses océaniques. Ces environnements sont généralement situés à plus de 6 000 mètres de profondeur et présentent certaines des conditions les plus extrêmes sur Terre. Ils sont isolés, soumis à une pression immense et reçoivent très peu d'apports organiques provenant de la surface de la mer. Malgré cela, des recherches récentes ont révélé la présence d'organismes hautement adaptés et d'écosystèmes microbiens associés à des processus tectoniques ou géochimiques.

Laquelle des affirmations suivantes concernant la zone F (ultra-abyssale) est correcte ? (une seule réponse correcte)

- A. La zone F abrite des récifs coralliens au niveau desquels la photosynthèse est réalisée.
- B. Les taux de sédimentation sont élevés en raison d'une abondante production organique à la surface.
- C. Les organismes de cette zone dépendent souvent de matière organique qui a sédimenté ou de sources d'énergie chimiosynthétiques.
- D. La zone est caractérisée par des dépôts de boue carbonatée provenant du plancton.

Question 10 :

L'océan profond, généralement défini comme situé à des profondeurs au-delà de 200 mètres, constitue un environnement à la fois extrême et stable. Ils se distinguent par des températures basses, une pression élevée, une très faible luminosité, voire une obscurité totale, et une circulation généralement lente. Au-delà de la thermocline, les propriétés de l'eau de mer deviennent relativement uniformes sur de grandes distances horizontales. Ces conditions influencent non seulement la structure physique des masses d'eau océaniques, mais aussi la répartition et l'adaptabilité de la vie marine.

Parmi les affirmations suivantes concernant les environnements océaniques profonds, lesquelles sont correctes ? (plusieurs réponses correctes)

- A. La salinité varie considérablement dans les eaux profondes de l'océan en raison des changements à la surface.
- B. Le phytoplancton et les plantes présentant des racines ne peuvent pas survivre au niveau de l'océan profond.
- C. La température et la densité varient rapidement avec la profondeur dans les zones profondes de l'océan.
- D. Les organismes marins vivant dans les profondeurs océaniques sont adaptés à une pression hydrostatique élevée.

Section B : Énergie et systèmes terrestres

La demande mondiale croissante en énergie, associée à la nécessité de disposer d'approvisionnements énergétiques durables et sûrs, a stimulé l'exploration et le développement de ressources pétrolières et gazières non conventionnelles. Contrairement aux hydrocarbures conventionnels, qui sont extraits de réservoirs poreux par forage traditionnel, les ressources non conventionnelles, telles que le gaz de schiste, le pétrole de schiste dans des pores, le méthane issu du charbon et les hydrates de gaz, sont piégées dans des formations à faible perméabilité, ce qui nécessite des technologies avancées telles que la fracturation hydraulique et le forage horizontal pour leur extraction.

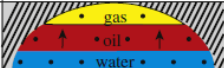
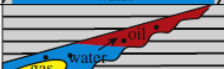
Types of hydrocarbon resources			State of accumulation	Migration mechanism	Accumulation patterns	Resource proportion	Examples
Structural pools				Long distance secondary buoyancy migration	Conventional trap	20% ±	Crataceous, Changhuan in Songliao Basin
Lithological stratigraphic pools							Jurassic, NW Junggar Basin
Unconventional oil & gas	Uncontinuous	Oil sand+heavy oil		Short distance secondary diffusion migration	Unconventional reservoirs	80% ±	Neogene, West Slope of Liaohe
		Igneous reservoir					Crataceous, Songliao Basin
		Fractural & vuggy carbonate reservoirs					Ordovician, Tarim Basin
	Tight oil	Triassic, Ordos Basin					
	Continuous		Shale oil	Carboniferous-Permian, Ordos Basin			
			Tight gas				
		Coal bed methane	Primary diffusion migration	In-place detained			Cambrian–Ordovician, Sichuan Basin
	Shale gas						

Figure B-1 Types de ressources en hydrocarbures et modèles d'accumulation (Zou et al, 2013)

Hydrocarbon = hydrocarbure, pools = réserves, sand = sable, oil = huile (pétrole), igneous = magmatique, vuggy = matrice, tight oil = pétrole de schiste dans des pores, shale oil = huile de schiste, tight gaz = gaz de schiste dans des pores, coal bed methane = méthane issu du charbon, shale gas = gaz de schiste, unconventional = non conventionnel, continuous : continue, uncontinuous : discontinu, buoyancy = flottabilité, basin = bassin.

Question 11 :

Parmi les descriptions suivantes, lesquelles permettent de différencier correctement le pétrole et le gaz non conventionnels du pétrole et du gaz conventionnels ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Les gisements de pétrole et de gaz non conventionnels nécessitent des conditions hydrodynamiques plus élevées pour se former.
- B. Les réservoirs de pétrole et de gaz conventionnels ont souvent des délimitations clairement identifiées.
- C. Les réservoirs non conventionnels sont plus abondants que les gisements de pétrole et de gaz conventionnels.
- D. Le pétrole et le gaz non conventionnels sont plus étroitement liés aux activités tectoniques.
- E. Les réservoirs conventionnels stockent principalement du gaz naturel, tandis que les réservoirs non conventionnels stockent principalement du pétrole.

Question 12 :

Le pétrole et le gaz naturel sont appelés « combustibles fossiles » car ils proviennent des restes d'organismes qui ont vécu il y a des centaines de millions d'années. Dans des conditions géologiques spécifiques, cette matière organique subit finalement une transformation à long terme, formant les sources d'énergie que nous utilisons aujourd'hui.

Parmi les affirmations suivantes concernant les sources organiques du pétrole et du gaz, lesquelles sont correctes ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Principalement formées à partir de l'enfouissement d'anciens organismes planctoniques marins et de restes d'algues.
- B. Principalement formées à partir de l'enfouissement de restes d'animaux de grande taille tels que les dinosaures.
- C. La lignine des plantes terrestres supérieures est la principale source de pétrole.
- D. Doivent être conservées dans un environnement dépourvu d'oxygène (réducteur) pour se transformer en pétrole et en gaz.
- E. Les gaz riches en carbone provenant des éruptions volcaniques peuvent se condenser directement en pétrole.
- F. Les restes organiques des lacs d'eau douce peuvent également former des ressources pétrolières et gazières.

Question 13 :

Par rapport aux réservoirs conventionnels, les réservoirs de gaz de schiste présentent une perméabilité plus faible, mais peuvent stocker des quantités importantes de gaz. Par exemple, le bassin du Sichuan en Chine possède des réserves de gaz de schiste dépassant 1 000 milliards de mètres cubes.

Pourquoi le schiste peut-il stocker de telles quantités de gaz ? (une seule réponse correcte)

- A. Les formations schisteuses présentant d'importantes failles créent des fractures ouvertes qui stockent le gaz libre.
- B. Les formations schisteuses sont toujours adjacentes à des gisements conventionnels, ce qui permet au gaz de migrer et de s'accumuler.
- C. Le schiste présente des pores nanométriques et une quantité de matière organique importante, qui génère et piège le gaz par maturation thermique.
- D. Les bactéries méthanogènes présentes dans le schiste transforment les minéraux carbonatés en méthane.

Question 14 :



Le bassin d'Ordos, situé dans le centre-nord de la Chine, est le deuxième plus grand bassin sédimentaire de Chine (après le bassin du Tarim) avec une superficie d'environ 370 000 km². Il contient d'abondantes ressources pétrolières et gazières non conventionnelles et constitue un pilier stratégique pour la sécurité énergétique de la Chine. Le gaz de schiste dans les pores du bassin d'Ordos représente plus de la moitié de ses ressources totales en gaz naturel, principalement réparties dans des grès du Paléozoïque supérieur avec de multiples réservoirs. Lors de l'exploration du membre He 8 de la formation inférieure de Shihezi, il a été observé que cette unité stratigraphique présente une épaisseur moyenne de grès de 20 mètres dans le bassin d'Ordos. Les données de diagrapie indiquent qu'environ 50 % des couches de grès contiennent du gaz de schiste dans les pores, avec des intervalles gazéifères présentant une porosité de 10 % et une saturation en gaz de 60 %.

En supposant que ces résultats de diagrapie sont représentatifs de l'ensemble de l'unité de grès et compte tenu d'un facteur de volume de formation de gaz de 0,007 (rapport entre le volume de gaz dans les conditions du réservoir et les conditions standard à la surface), estimez le volume de la ressource de gaz de schiste dans les pores, dans les conditions de stockage en surface de ce réservoir.

Sélectionnez la réponse la plus proche. (une seule réponse correcte)

- A. $2,22 \times 10^{11} \text{ m}^3$
- B. $6,39 \times 10^{11} \text{ m}^3$
- C. $7,21 \times 10^{12} \text{ m}^3$
- D. $3,17 \times 10^{13} \text{ m}^3$
- E. $8,88 \times 10^{13} \text{ m}^3$
- F. $5,28 \times 10^{14} \text{ m}^3$

Question 15 :

L'hydrate de gaz naturel (NGH) est une autre source d'énergie dont les réserves estimées sont environ deux fois supérieures à celles de l'ensemble des ressources fossiles connues dans le monde. Cependant, sa technologie d'extraction est peu mature et peut présenter des risques environnementaux, notamment des risques géologiques et des fuites de gaz à effet de serre. Parmi les affirmations suivantes concernant l'hydrate de gaz naturel, lesquelles sont correctes ? (Plusieurs réponses correctes)

- A. L'hydrate de gaz naturel appartient aux réservoirs d'hydrocarbures conventionnels.
- B. L'hydrate de gaz naturel appartient aux réservoirs d'hydrocarbures non conventionnels.
- C. La formation des hydrates de gaz naturel nécessite l'action combinée de l'hydrosphère, de la biosphère et de la lithosphère.
- D. Une exploitation inappropriée des hydrates de gaz naturel ne perturbera la stabilité que de la lithosphère et de l'hydrosphère.
- E. La formation des hydrates de gaz naturel nécessite que la Terre soit dans une période glaciaire de longue durée.

L'extraction des hydrates de gaz naturel nécessite d'abord la dissociation de l'hydrate afin de libérer le méthane libre. Actuellement, quatre techniques principales de dissociation ont été étudiées (Fig. B-2). Toutes ces techniques fonctionnent en rompant l'équilibre de phase des hydrates de gaz (Fig. B-3). La figure B-3 illustre les différents principes impliqués dans la dissociation des hydrates de gaz. Ces principes sont représentés dans la figure par les lettres A, B, C et D.

Veuillez associer chaque technique de dissociation ① à ④ avec son principe de fonctionnement correspondant A à D.

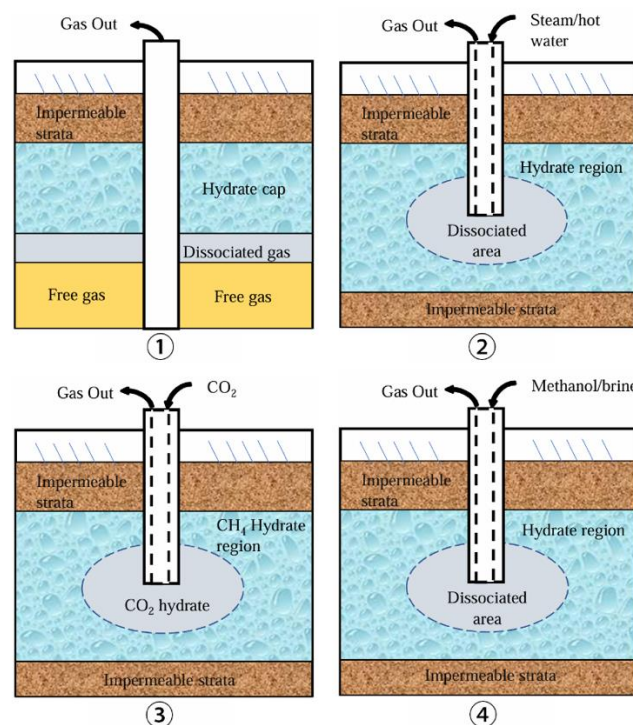


Figure B-2 Techniques de dissociation des hydrates de gaz naturel (Shaibu et al., 2021)

Strata = strate, cap = "couverture", steam = vapeur, brine = saumure

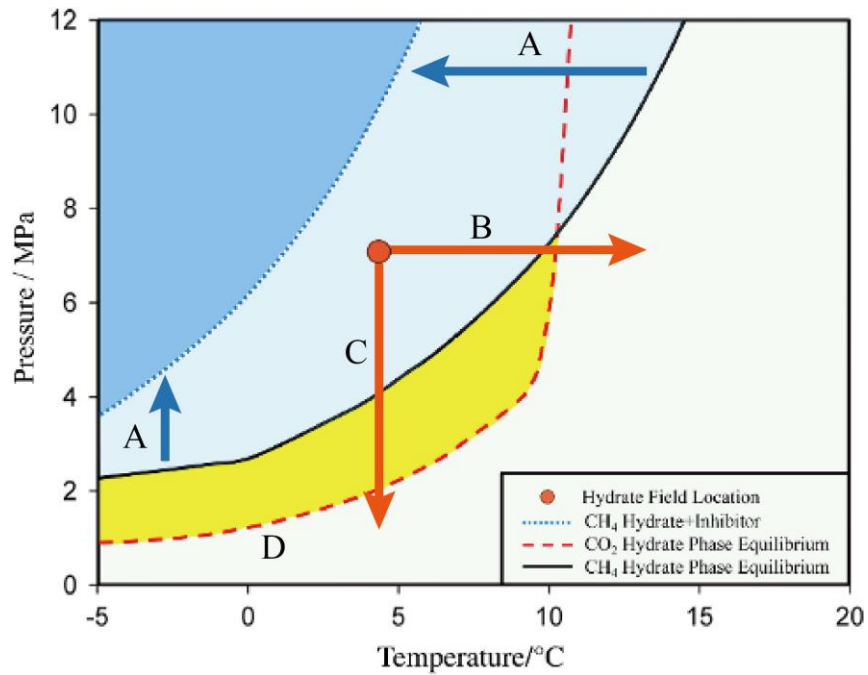


Figure B-3 Schéma présentant un diagramme de phases des hydrates de gaz (Yang et al., 2019) .

Les flèches bleues (A) indiquent le déplacement de la zone de stabilité de l'hydrate de CH₄.

La flèche orange horizontale (B) représente l'augmentation de la température

La flèche orange verticale (C) indique la diminution de la pression.

La zone jaune délimitée par des lignes rouges en pointillés (D) marque le champ de stabilité de l'hydrate de CO₂.

Hydrate field location = localisation de l'hydrate sur le terrain

Question 16 :

La technique ① correspond au principe représenté par la lettre (). (une seule réponse correcte)

Question 17 :

La technique ② correspond au principe représenté par la lettre (). (une seule réponse correcte)

Question 18 :

La technique ③ correspond au principe représenté par la lettre (). (une seule réponse correcte)

Question 19 :

La technique ④ correspond au principe représenté par la lettre (). (une seule réponse correcte)

Question 20 :

Le méthane issu du charbon (CBM), communément appelé « gaz de charbon », se forme au cours du processus de carbonisation et existe principalement à l'état adsorbé dans les veines de charbon ou les strates carbonifères sous forme de gaz naturel non conventionnel, dont le méthane est le principal composant. Les sources de méthane comprennent la décomposition biogénique de la matière organique contenue dans le charbon et le craquage thermique à haute température. Une couche de recouvrement stable (roche imperméable au-dessus du filon de charbon) est essentielle à l'accumulation du CBM, car elle empêche le gaz de s'échapper et maintient la pression du réservoir.

Laquelle des descriptions suivantes concernant l'enrichissement en méthane issu du charbon est correcte ? (une seule réponse correcte)

- A. Plus le filon de charbon est épais et profond, plus il peut être enrichi en méthane (dans la mesure où celui-ci reste au-dessus d'une certaine limite).
- B. L'enrichissement en méthane de charbon est uniquement influencé par la biosphère, tandis que le rôle de la lithosphère se limite à la conservation du gaz.
- C. Les veines de charbon recouvertes de grès sont plus favorables à l'enrichissement en méthane de charbon que celles recouvertes de mudstone.
- D. Les conditions hydrogéologiques caractérisées par une stagnation des eaux souterraines et un échange lent avec les eaux de surface sont défavorables à l'enrichissement en méthane des gisements de charbon.

Question 21 :

Dans une séquence stratigraphique plissée, la surface non déformée située au centre, où il n'y a ni allongement ni raccourcissement, est appelée surface neutre structurelle. Les strates situées au-dessus de cette surface sont appelées surfaces neutres supérieures, tandis que celles situées en dessous sont appelées surfaces neutres inférieures (Fig. B-4).

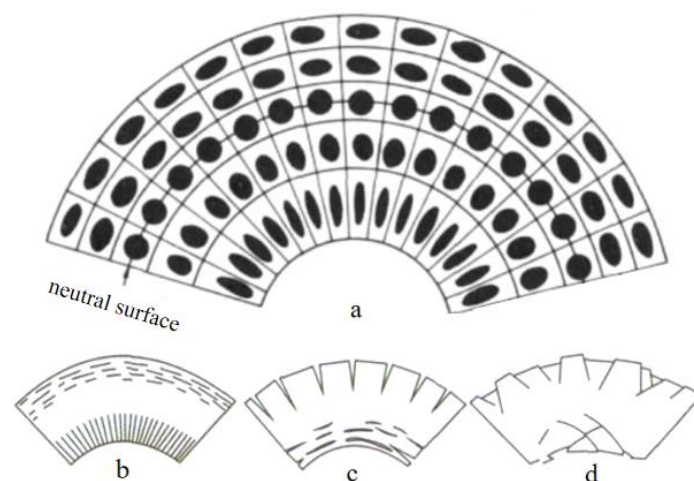


Figure B-4 Caractéristiques des plis de surface neutre (J.G. Ramsay et al., 1987)

- a. Distribution des profils de déformations ; b. Clivage ; c. Fractures de tension ; d. Fractures de cisaillement.

En supposant que la figure B-4a représente un filon de charbon épais, dans quelle(s) partie(s) de ce filon l'enrichissement en gaz serait-il le plus susceptible de se produire, formant potentiellement un réservoir de gaz ? (plusieurs réponses correctes)

- A. La partie axiale sous la surface neutre d'un anticlinal
- B. La partie axiale au-dessus de la surface neutre d'un anticlinal
- C. La partie latérale située sous la surface neutre d'un anticlinal
- D. La partie latérale au-dessus de la surface neutre d'un anticlinal

Question 22 :

Le charbon est l'un des combustibles fossiles les plus importants en Chine. Son processus de formation est relativement complexe, comme l'illustre le schéma simplifié de la figure B-5.

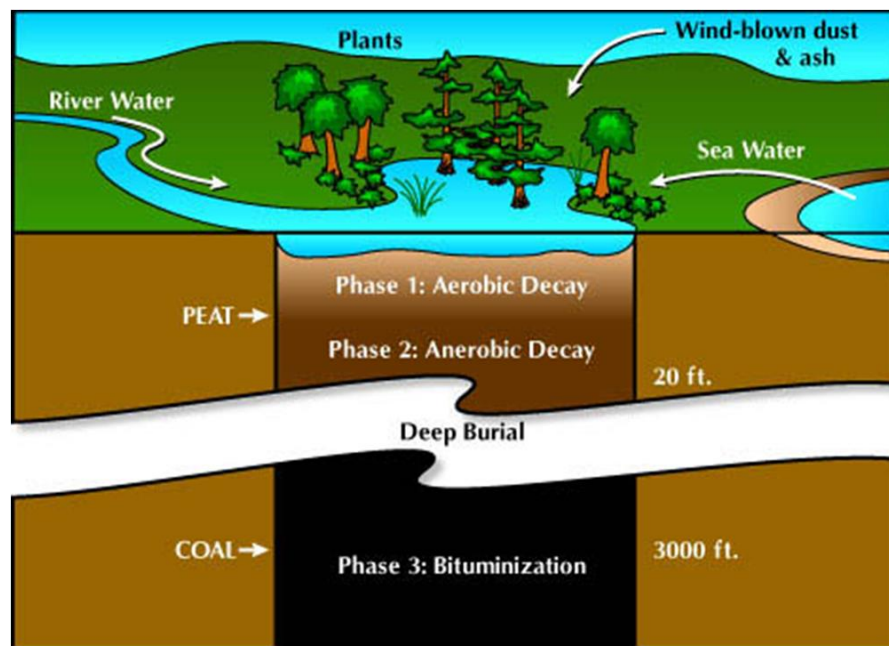


Figure B-5 Schéma de l'environnement et du processus de formation du charbon

Wind-blown dust = poussières et cendres transportées par le vent, peat = tourbe, decay = décomposition, aérobic = aérobie, anerobic = anaérobie, coal = charbon, bituminization = bitumage.

Parmi les affirmations suivantes, laquelle n'est pas correcte ? (une seule réponse correcte)

- A. Après la mort des plantes dans les marécages, leurs restes s'accumulent dans le marécage et forment progressivement de la tourbe, qui est le précurseur du charbon.
- B. Les composants inorganiques du charbon peuvent provenir de la boue et du sable transportés par les rivières, ainsi que de la poussière transportée par le vent.
- C. La formation du charbon nécessite l'interaction combinée de la biosphère, de l'hydrosphère, de l'atmosphère et de la lithosphère.
- D. Le charbon peut se former peu après que les restes végétaux aient subi une décomposition aérobie et anaérobie.

Question 23 :

Nous savons que les composants organiques du charbon proviennent principalement des plantes. Plus les matériaux formant le charbon sont enfouis profondément, plus leur degré de transformation augmente. Avec l'augmentation de la transformation du charbon, des changements importants se produisent dans la structure moléculaire de la matière organique du charbon, comme le montre la figure B-6.

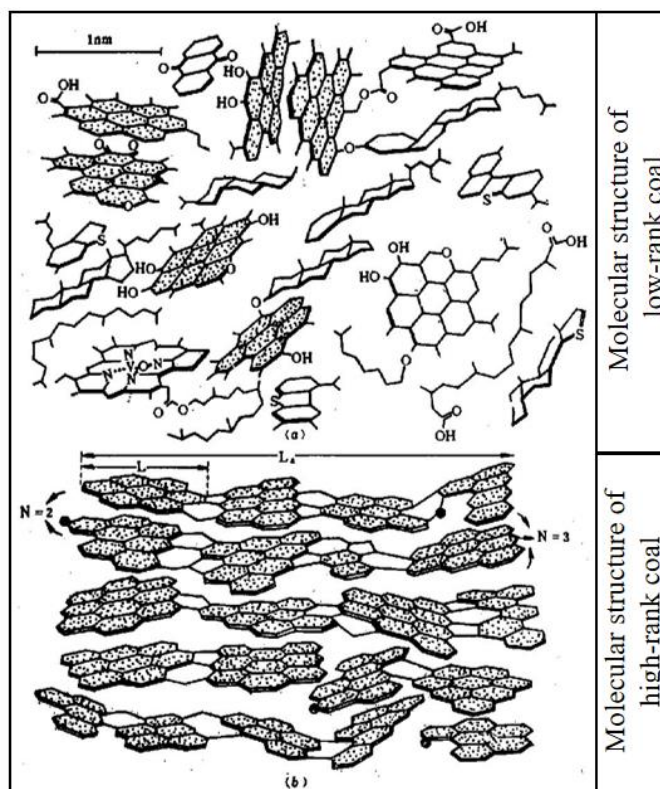


Figure B-6 Représentation schématique des structures moléculaires dans des charbons de différents degrés de transformation.

Low-rank coal = faible transformation du charbon, *High-rank coal* = forte transformation du charbon.

Lequel des changements suivants ne se produit pas dans la structure moléculaire de la matière organique du charbon à mesure que le degré de transformation augmente ? (une seule réponse correcte)

- A. Les chaînes latérales des molécules organiques du charbon deviennent plus courtes et moins nombreuses.
- B. Les structures carbonées deviennent plus compactes et mieux organisées, formant des systèmes cycliques plus grands et plus stables.
- C. Le poids moléculaire moyen augmente, tandis que le rapport molaire entre les atomes de carbone et d'hydrogène diminue.
- D. L'arrangement moléculaire devient progressivement plus régulier et ordonné.

Question 24 :

Les bassins marins épicontinentaux étaient un type courant de bassins sédimentaires dans le passé. Ces bassins avaient des pentes douces et, pendant les périodes de régression marine, des marécages tourbeux pouvaient se développer de manière étendue. Pendant la transgression marine, de grandes parties du bassin pouvaient être rapidement inondées, entraînant l'arrêt de la formation du charbon, et le bassin passait rapidement d'un marécage tourbeux à un environnement marin peu profond (Fig. B-7).

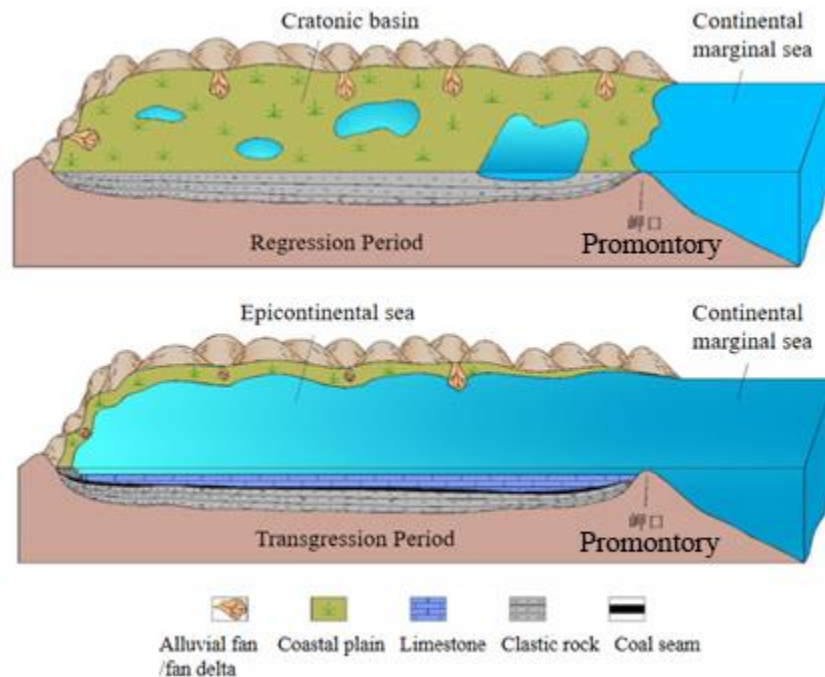


Figure B-7 Schéma de la formation du charbon dans le bassin épicontinental Paléozoïque du nord de la Chine.

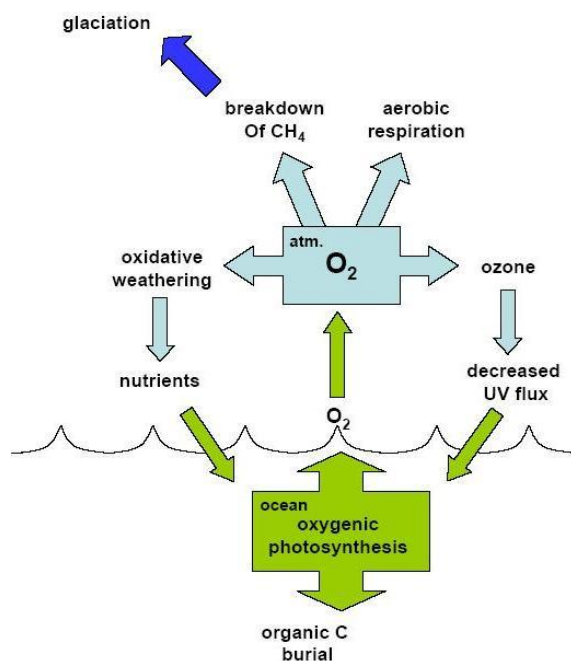
Cratonic basin = bassin cratonique, *promontory* = promontoire

Concernant le processus de formation du charbon dans le bassin épicontinental illustré à la figure B-7, lesquelles des descriptions suivantes sont correctes ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Le fond irrégulier du bassin lors de la régression entraîne des intensités variables de développement des marécages tourbeux dans différentes zones.
- B. L'interface supérieure de la roche clastique et l'interface inférieure du filon de charbon peuvent être considérées comme des surfaces isochrones.
- C. L'interface supérieure du filon de charbon et l'interface inférieure du calcaire peuvent être considérées comme des surfaces isochrones.
- D. Les mers épicontinentales étaient largement répandues pendant le Cambrien, ce modèle de formation du charbon était donc probablement très courant à cette époque.

Section C : Le cycle de l'oxygène dans les systèmes terrestres

L'oxygène est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre et le deuxième élément le plus abondant dans l'atmosphère terrestre. Tout au long de l'histoire géologique, l'évolution à long terme des niveaux d'oxygène (O_2) dans l'atmosphère et les océans a été étroitement liée à l'émergence et au développement de la vie, et est largement considérée comme un moteur majeur de l'évolution animale. La forte affinité électronique des atomes d'oxygène en fait l'agent oxydant le plus courant sur Terre. En théorie, toute substance pouvant être oxydée par l'oxygène peut participer au cycle de l'oxygène. Le cycle de l'oxygène est donc l'une des interfaces reliant la biosphère, l'atmosphère, l'hydrosphère, la lithosphère et l'anthroposphère. Le schéma ci-dessous présente un modèle simplifié du cycle global de l'oxygène.



Breakdown = rupture, aerobic respiration = respiration anaérobie, oxidative weathering = altération oxydante, nutrients = nutriments, decreased = diminué, oxygenic photosynthesis = photosynthèse oxygénique, burial = enfouissement

Question 25 :

Dans le cycle de l'oxygène, la photosynthèse est l'un des processus clés reliant la biosphère et l'atmosphère.

Parmi les affirmations suivantes, laquelle ne décrit pas correctement le rôle de la photosynthèse dans le cycle de l'oxygène ? (une seule réponse correcte)

- A. La photosynthèse est le principal processus biologique qui libère de l'oxygène dans l'atmosphère.
- B. Les plantes terrestres contribuent davantage à l'oxygénation de l'atmosphère que le phytoplancton marin.
- C. Sans photosynthèse, les niveaux d'oxygène atmosphérique diminueraient progressivement en raison de la respiration et de la combustion.
- D. La photosynthèse présente des fluctuations saisonnières, avec une production d'oxygène plus élevée en été en raison de l'augmentation de l'ensoleillement et de l'allongement des jours.
- E. En hiver, la libération d'oxygène est réduite dans les écosystèmes tempérés/boréaux, car les arbres à feuilles caduques perdent leurs feuilles et la couverture de glace réduit la photosynthèse aquatique.

Question 26 :

On pense que la photosynthèse oxygénique a évolué avant l'oxygénation de l'atmosphère. Cependant, l'oxygène produit était rapidement consommé par des réducteurs, empêchant ainsi son accumulation dans l'atmosphère.

Parmi les caractéristiques suivantes de l'environnement de la Terre primitive, lesquelles corroborent cette hypothèse ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Absence de continents exposés.
- B. Dissolution rapide du quartz.
- C. Consommation par des bactéries aérobiques
- D. Précipitations abondantes de Fe^{3+} dans les océans primitifs.
- E. Fort dégagement volcanique de gaz réducteurs.

Question 27 :

Dans le cycle global de l'oxygène, le carbone organique marin constitue le plus important puits d'oxygène à long terme grâce aux processus d'enfouissement et de minéralisation. En 1934, l'océanographe américain Alfred C. Redfield a prélevé des échantillons d'eau de mer à différentes profondeurs dans les océans Atlantique, Pacifique et Indien. Il a découvert que les rapports molaires entre le carbone, l'azote et le phosphore dans le phytoplancton marin et les substances inorganiques dissoutes en eaux profondes sont statistiquement constants, soit environ $\text{C:N:P} = 106:16:1$. Ce rapport est connu sous le nom de « rapport de Redfield ». Par conséquent, la composition moyenne de la matière organique dans le phytoplancton marin peut être écrite de la manière suivante : $(\text{CH}_2\text{O})_{106}(\text{NH}_3)_{16}\text{H}_3\text{PO}_4$.

Quelles informations clés le rapport de Redfield fournit-il sur les écosystèmes marins ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Il révèle un équilibre stœchiométrique universel dans le phytoplancton marin, reflétant l'optimisation évolutive de l'utilisation des nutriments.
- B. Ce rapport indique que l'azote (C) est généralement le nutriment limitant pour la croissance du phytoplancton dans les océans ouverts.
- C. Ce rapport indique que l'azote (N) est généralement le nutriment limitant pour la croissance du phytoplancton dans les océans ouverts.
- D. Ce rapport indique que l'azote (P) est généralement le nutriment limitant pour la croissance du phytoplancton dans les océans ouverts.
- E. Il suggère que les nutriments inorganiques dissous dans les eaux profondes de l'océan maintiennent le même rapport que le phytoplancton vivant en raison de la reminéralisation.
- F. Les écarts à ce rapport (par exemple, $\text{N/P} > 16$) dans les eaux côtières signalent souvent une eutrophisation ou une pollution anthropique (par exemple, un excès d'azote provenant des engrais).

Question 28 :

Avant l'évolution de la photosynthèse oxygénique, l'oxygène moléculaire (O_2) aurait pu être généré sur la Terre primitive par lesquels des processus suivants ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Dégagement gazeux volcanique, libérant directement l' O_2 des chambres magmatiques par des réactions d'oxydation dans le manteau.
- B. Oxydation abiotique de minéraux tels que le fer ($Fe^{2+} \rightarrow Fe^{3+}$) par l'eau au niveau des cheminées hydrothermales, avec production d' O_2 comme sous-produit.
- C. Photodissociation de la vapeur d'eau (H_2O) par le rayonnement ultraviolet dans la haute atmosphère, libérant des atomes d'oxygène libres qui se combinent pour former de l' O_2 .
- D. Impacts cométaires apportant de la glace qui s'est sublimée et a subi des réactions photochimiques dans l'atmosphère.

Question 29 :

À des altitudes extrêmement élevées, les molécules de gaz peuvent échapper à la gravité terrestre et se perdre dans l'espace. Au cours de cet échappement, laquelle des molécules de gaz suivantes provoquerait l'oxygénation nette de l'atmosphère ? (une seule réponse correcte)

- A. H_2
- B. H_2O
- C. He
- D. CO_2
- E. N_2

Question 30 :

Avant l'apparition des eucaryotes, l'altération aérobie constituait le principal puits d'oxygène atmosphérique. Au cours du Précambrien, lesquels des minéraux/roches suivant(e)s consommaient l' O_2 atmosphérique via l'altération continentale par dissolution ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Charbon
- B. Magnétite
- C. Pyrite
- D. Calcite
- E. Quartz

Question 31:

Bien qu'aucune preuve définitive de photosynthèse oxygénique n'ait été trouvée sur Mars, la planète a développé un environnement hautement oxydé. Cela est attesté par l'abondance de fer ferrique (qui donne à Mars sa teinte rouge caractéristique) et la présence de composés oxydants tels que le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) et les perchlorates à la fois dans l'atmosphère et le régolite.

Parmi les processus suivants, lesquels auraient pu contribuer à l'oxydation de Mars ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Absence de rayonnement ultraviolet
- B. Interactions entre la surface et l'atmosphère (par exemple, tempêtes de poussière, impacts, rayons cosmiques)
- C. Séquestration du CO_2 sous forme de roches carbonatées
- D. Réactions de serpentinisation des roches martiennes (réaction entre l'eau et la roche libérant du H_2)
- E. Dégazage de magma basaltique

Section D : Origine de la vie et systèmes terrestres

L'origine de la vie sur Terre et la recherche de vie extraterrestre comptent parmi les défis scientifiques les plus profonds de notre époque.

En étudiant les archives géologiques anciennes, les signatures biochimiques et les environnements planétaires, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur de notre Système solaire, les scientifiques s'efforcent de déchiffrer les origines de la vie et son existence potentielle ailleurs dans le cosmos.

Cette série de questions explore les débuts de la vie sur Terre, les principaux processus abiogénétiques et les principes de l'astrobiologie, en synthétisant les connaissances issues des sciences de la Terre, de la chimie, de la biologie et de l'astronomie.

Question 32 :

L'une des plus anciennes preuves connues de la vie sur Terre provient d'un stromatolite vieux de 3,7 milliards d'années découvert dans la ceinture supracrustale d'Isua, au Groenland (Fig. D-1). Les stromatolithes sont des constructions rocheuses en couches produites par des microorganismes, avec des alternances de couches « biologiques » et de couches « sédimentaires ».

Sur la base de preuves morphologiques, géochimiques et isotopiques, les chercheurs ont identifié ces stromatolites comme étant le produit de l'activité de cyanobactéries, ce qui confirme leur origine biogénique et repousse la date de l'apparition de la vie dans l'histoire de la Terre.

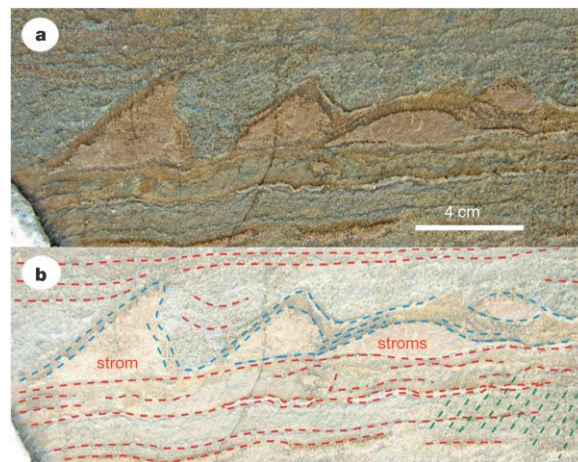


Figure D-1 a) Ceinture de stromatolithes supracrustale d'Isua. b) Représentation schématique de l'image a).

Parmi les affirmations suivantes concernant les stromatolites et le système terrestre, lesquelles sont correctes ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Les stromatolites présentent des morphologies coniques et bombées avec une bonne symétrie, indiquant qu'elles ont été influencées par des processus uniformes du système terrestre dans toutes les directions.
- B. Des laminations millimétriques sont préservées à la périphérie des stromatolites, ce qui suggère que la croissance des stromatolites a répondu aux processus du système terrestre à des échelles de temps de plusieurs décennies à plusieurs siècles.
- C. La composition minérale des stromatolites provient principalement d'apports terrestres.
- D. Les stromatolites présentent de fortes interactions avec l'eau de mer, ce qui se traduit par des signatures chimiques similaires à celles de l'eau de mer.
- E. L'arrêt du dépôt des stromatolites et leur enfouissement ultérieur par des sédiments ordinaires reflètent les changements de l'environnement marin.
- F. Les stromatolites sont considérés comme biogéniques en raison de la détection de fragments d'ADN provenant de cyanobactéries à l'intérieur.

Question 33 :

L'atmosphère primitive de la Terre était dépourvue d'oxygène libre, mais la vie est apparue. Parmi les affirmations suivantes concernant la relation entre les premières formes de vie sur Terre et l'oxygène, lesquelles sont correctes ? (plusieurs réponses correctes)

- A. L'oxygène est essentiel à tous les processus biochimiques connus.
- B. La photosynthèse des cyanobactéries a libéré de l'oxygène, transformant l'atmosphère, l'hydrosphère et même la lithosphère de la Terre primitive.
- C. Le grand événement d'oxygénation (il y a environ 2,4 milliards d'années) a progressivement enrichi l'atmosphère terrestre en oxygène, favorisant l'évolution des organismes aérobies.
- D. La couche d'ozone a protégé les premières formes de vie contre les rayons ultraviolets (UV).

Question 34 :

La base de la vie sur Terre réside dans des molécules organiques complexes, qui se sont peut-être formées spontanément dans les environnements primitifs, agissant comme l'« étincelle » de la vie. Sur la Terre primitive, lequel des environnements suivants était susceptible de produire les premières molécules organiques complexes ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Manteau
- B. Sol
- C. Atmosphère
- D. Sources hydrothermales profondes
- E. Cheminées volcaniques terrestres
- F. Cratères d'impact météoritiques

Question 35 :

L'expérience la plus célèbre sur l'origine des composés organiques est l'expérience de Miller-Urey (1953), menée par le chimiste américain Stanley Miller et son directeur de thèse Harold Urey. Ils ont conçu un système fermé en verre pour simuler l'atmosphère primitive de la Terre, contenant de l'ammoniac (NH_3), du méthane (CH_4), de la vapeur d'eau (H_2O) et de l'hydrogène (H_2), avec de l'eau en circulation et des électrodes (Fig. D-2). Après une semaine, Miller a observé la formation de divers composés organiques, notamment des acides aminés tels que la glycine ($\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$) et l'alanine.

Cette expérience a démontré que les éléments constitutifs de la vie pouvaient provenir de réactions chimiques non vivantes, ce qui a inspiré d'autres recherches sur l'abiogenèse.

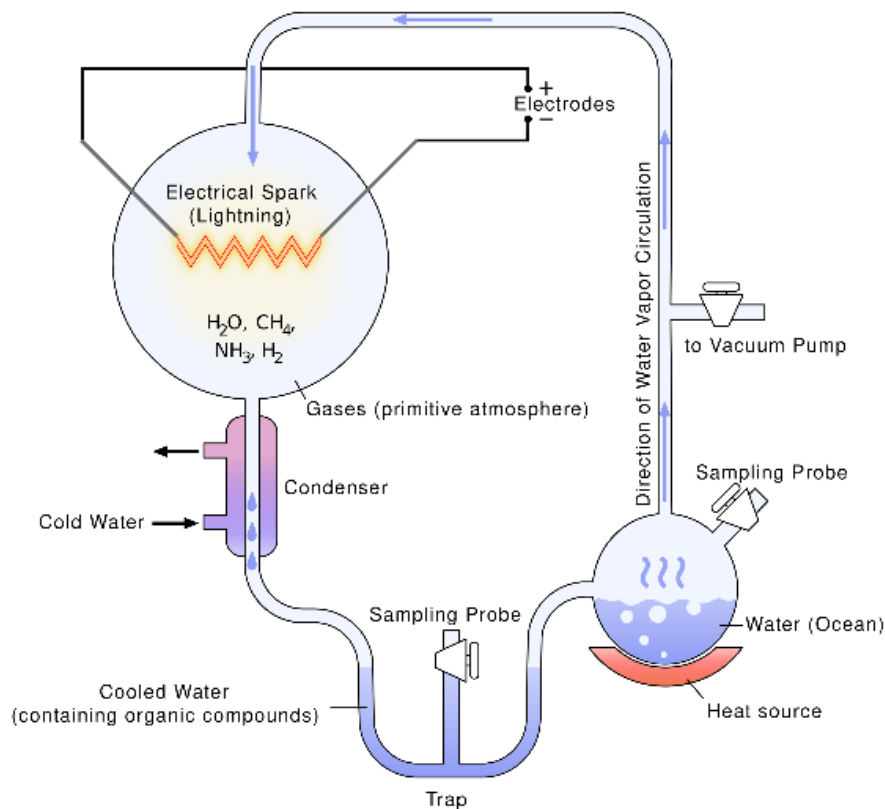


Figure D-2 Schéma de l'expérience de Miller-Urey

Quel aspect du système terrestre primitif l'expérience de Miller-Urey a-t-elle simulé ? (Une seule réponse correcte)

- A. Les premières formes de vie sont apparues dans l'atmosphère.
- B. La foudre a fourni l'énergie nécessaire à la synthèse des premiers composés organiques.
- C. L'érosion terrestre a fourni des nutriments (par exemple, N, P) aux océans.
- D. L'apparition de formes de vie simples

Question 36 :

Si les processus terrestres tels que la synthèse de Miller-Urey et la chimie des cheminées hydrothermales ont joué un rôle clé, des objets extraterrestres ont peut-être également contribué à l'apparition de la vie sur Terre. Parmi les affirmations suivantes, laquelle décrit le mieux le rôle potentiel des objets extraterrestres (par exemple, les comètes, les météorites) dans l'origine de la vie sur la Terre primitive ? (une seule réponse correcte)

- A. Ils ont apporté des molécules organiques prébiotiques (par exemple, des acides aminés) par le biais d'impacts, complétant ainsi la synthèse endogène de la Terre.
- B. Ils ont fourni les premières cellules vivantes par panspermie, rendant ainsi l'origine de la vie exclusivement extraterrestre.
- C. Ils ont catalysé l'émergence de la vie en créant des systèmes de cheminées hydrothermales par fracturation induite par les impacts.
- D. Ils ont empêché la formation de la vie en stérilisant la surface de la Terre par des collisions fréquentes.

Question 37 :

L'Archéen (il y a 4,0 à 2,5 milliards d'années) a été témoin des premiers impacts transformateurs de la vie sur notre planète. Bien que les premiers microbes étaient microscopiques, leurs activités métaboliques collectives ont modifié de manière irréversible les environnements de surface de la Terre grâce à des voies biogéochimiques innovantes. Ces changements ont été si profonds qu'ils ont préparé le terrain pour toute l'évolution ultérieure. Parmi les processus suivants, lesquels pourraient avoir été induits par l'activité biologique au cours de cette période critique ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Formation des plateaux continentaux par précipitation de carbonates sous l'action de micro-organismes (par exemple, récifs stromatolithiques).
- B. Accélération de l'érosion continentale induite par les plantes terrestres.
- C. Les événements de refroidissement global déclenchés par la baisse de la concentration en CO₂ atmosphérique par la photosynthèse.
- D. Diminution des composants mafiques dans la croûte terrestre due à l'utilisation biologique.

Section E : Pourquoi l'eau a-t-elle disparu de Mars ?

Mars était autrefois une planète chaude et humide au début de sa formation, avec la possibilité que des formes de vie y existent. Cependant, elle s'est aujourd'hui transformée en un monde froid et sec, sans eau liquide à sa surface et sans signe de vie. La disparition de l'eau sur Mars est l'un des facteurs clés responsables de sa transition d'un environnement chaud et humide à un environnement froid et aride. L'échappement de l'eau martienne désigne le phénomène par lequel les molécules d'eau s'échappent de l'attraction gravitationnelle de Mars et pénètrent dans l'espace, ce qui constitue un mécanisme important de perte d'eau pour Mars.

Question 38 :

Quel facteur n'a pas influencé l'échappement de la vapeur d'eau atmosphérique de Mars ?
(une seule réponse correcte)

- A. La gravité martienne
- B. Présence d'un champ magnétique
- C. Présence du vent solaire
- D. Présence du rayonnement solaire

Question 39 :

En réalité, les molécules d'eau à la surface de Mars, même si elles ont une vitesse d'échappement suffisante, peuvent entrer en collision avec des particules dans l'atmosphère lors de leur mouvement ascendant. Cela peut modifier leur direction et les empêcher de s'échapper. C'est pourquoi les scientifiques ont introduit le concept de surface d'échappement, nommée « exobase ». En dessous de cette surface d'échappement, les collisions entre particules sont très fréquentes, tandis qu'au-dessus, elles peuvent être totalement ignorées. Selon le concept d'exobase, lequel de ces corps célestes possède l'altitude d'exobase la plus élevée ? (une seule réponse correcte)

- A. Mercure
- B. Vénus
- C. Lune
- D. Mars

Question 40 :

Le concept d'exobase représente un scénario idéal. En réalité, la densité atmosphérique des planètes diminue généralement progressivement avec l'altitude, ce qui entraîne une réduction correspondante des effets de collision. Ces dernières années, les scientifiques qui étudient l'échappement atmosphérique ont commencé à mettre l'accent sur l'influence de la probabilité d'échappement, c'est-à-dire la probabilité que des particules réussissent à s'échapper à partir d'une altitude donnée. Par exemple, la figure E-1 illustre, selon l'altitude, à la fois la quantité de molécules d'eau (vapeur) atteignant une vitesse suffisante pour sortir de l'atmosphère Martienne (gauche) et leurs probabilités de sortie correspondantes (droite).

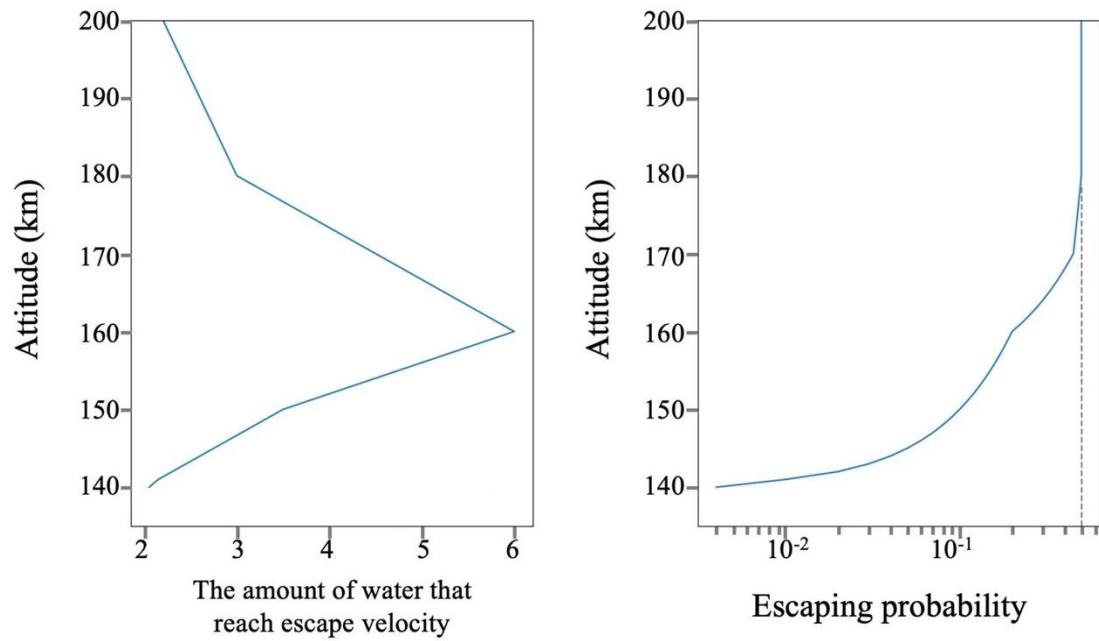


Figure E-1

D'après la figure E-1, déterminez à quelle altitude le flux total de molécules d'eau s'échappant atteint son maximum. (une seule réponse correcte)

- A. 150 km
- B. 160 km
- C. 170 km
- D. 180 km

Section F : De la nage à la marche

Le passage de l'eau à la terre ferme est une étape clé de l'évolution des vertébrés. Pour s'adapter à l'environnement terrestre, les vertébrés ont développé quatre membres pour se soulever et se déplacer, des poumons pour respirer et une peau kératinisée pour retenir l'eau. Ils ont ensuite évolué pour former les amphibiens, les reptiles, les dinosaures, les oiseaux, les mammifères, etc.

Question 41 :



L'ichthyostega, animal emblématique, est connu pour être le premier vertébré terrestre. Le mouvement de ses membres, estimé à partir d'une reconstruction 3D (Pierce et al. 2012), ressemble davantage à une nage à la pagaie qu'à une marche, qui soulève le corps comme le font les vertébrés terrestres actuels.

Parmi les affirmations suivantes, lesquelles sont correctes pour *l'Ichthyostega* ? (plusieurs réponses correctes)

- A. *L'Ichthyostega* vivait dans l'eau.
- B. Les membres de *l'Ichthyostega* servent principalement à nager.
- C. *L'Ichthyostega* peut être terrestre comme les vertébrés terrestres actuels.
- D. *L'Ichthyostega* était un reptile

Question 42 :

Quelles sont les raisons possibles qui ont poussé les vertébrés à se déplacer vers la terre ferme ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Recherche de nourriture
- B. Refuge
- C. Augmentation du niveau de la mer
- D. Reproduction plus facile

Question 43 :

Les récentes découvertes fossiles confirment encore davantage la relation étroite entre les dinosaures et les oiseaux. Laquelle des découvertes fossiles suivantes supporte cette idée ? (une seule réponse correcte)

- A. Dinosaures à plumes
- B. Dinosaures cuirassés
- C. Dinosaures édentés
- D. Dinosaures à bec de canard

Question 44 :

Les dinosaures non-aviens ont disparu à la fin du Mésozoïque, lors de l'extinction de masse Crétacé-Paléogène.

Parmi les propositions ci-dessous, lesquelles supportent la preuve que cet événement d'extinction a aussi été causé par un impact d'astéroïde au niveau d'une plateforme continentale peu profonde ? (plusieurs réponses correctes)

- A. Anomalie de l'iridium dans le monde entier
- B. Sphérules vitreuses organisées de manière concentrique autour d'une anomalie gravitaire
- C. Augmentation de l'activité biologique océanique
- D. Dépôts globaux liés à des tsunamis
- E. Lits épais de fossiles de dinosaures
- F. Empreintes de dinosaures préservées dans des lits de cendres