

IESO 2026 TURIN

ÉPREUVE ÉCRITE 3 — UNE EXCURSION DANS LE TRIAS

Empreintes du Trias dans les Alpes : une marge de plate-forme carbonatée oubliée

Durée : 80 minutes • Questions : 30 • Barème : 30 points • Lire toutes les données avant de répondre. Une seule réponse correcte par question.

En décembre 2025, lors d'une campagne de terrain dans le parc national du Stelvio (Haute-Valteline, Italie), des milliers d'empreintes fossiles ont été découvertes sur une paroi rocheuse presque verticale à environ 2 000 m d'altitude. Les traces, datées d'environ 210 millions d'années (Trias supérieur, Norien), constituent une fenêtre exceptionnelle sur ce passé lointain.

Le site enregistre la marge d'une plate-forme carbonatée : les empreintes sont conservées dans des dolomies (Dolomia Principale / Formation Livigno), déposées dans une mer épicontinentale peu profonde en bordure de l'océan Téthys. L'étude explore les interconnexions entre la taphonomie (l'étude des processus de fossilisation), la paléogéographie, l'ichnologie (l'étude des traces fossiles), l'évolution et les extinctions de masse.



Traces fossiles du Trias supérieur (Credits planetmountain.com)

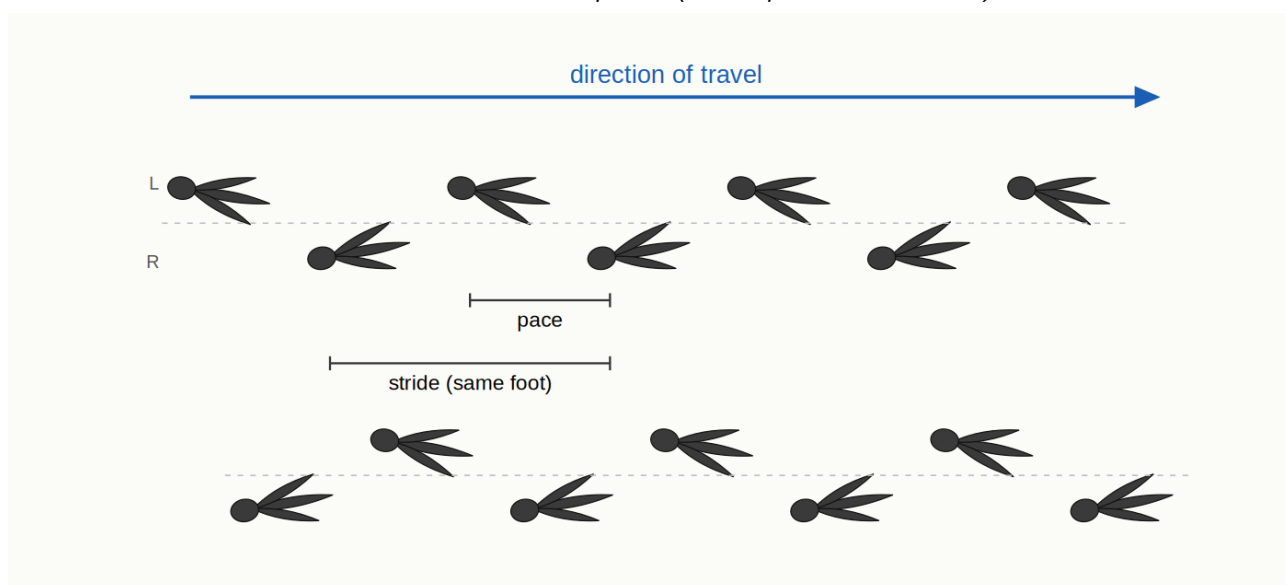


Figure 1 - Reconstitution de deux pistes parallèles d'archosaures du Trias (empreintes tridactyles). Schéma pédagogique IESO 2026 fondé sur des données ichnologiques du site de Frael, Val di Stelvio (parc national du Stelvio, décembre 2025 ; ichnologue F.M. Petti, MUSE Trento).

Pace = pas. Stride (same foot) = enjambée (même pied).

SECTION A : LE SITE ET LA TAPHONOMIE — Questions 1–9

Question 1

Les empreintes de Fraele sont exceptionnellement bien conservées. Quelle combinaison de conditions est la plus probable ?

- A. Substrat sec au moment du passage de l'organisme, durcissement et enfouissement rapide avant toute perturbation atmosphérique ou biologique.
- B. Substrat sec au moment du passage de l'organisme, saturation soudaine en eau et enfouissement rapide avant toute perturbation atmosphérique ou biologique.
- C. Substrat plastique au moment du passage de l'organisme, recouvrement par de la glace ou de la neige ce qui a maintenu le substrat isolé jusqu'à son durcissement.
- D. Substrat plastique au moment du passage de l'organisme, durcissement et enfouissement rapide avant toute perturbation atmosphérique ou biologique.

Question 2

Les 'mud-cracks' (fentes de dessiccation polygonales) associées aux empreintes impliquent que le substrat...

- A. était périodiquement émergé jusqu'à son assèchement, puis était à nouveau submergé.
- B. restait en permanence submergé dans des eaux profondes, sous la limite d'action des vagues.
- C. était périodiquement émergé sur une courte durée avant de rester en permanence submergé.
- D. subissait une compaction répétée sous des sédiments qui s'accumulaient sans émergence.

Question 3

Des rides de courant conservées sur les surfaces des roches fournissent principalement des informations sur...

- A. la direction des vents dominants responsables du transport des sédiments à travers le bassin.
- B. l'âge absolu du dépôt grâce à l'espacement et à l'amplitude des crêtes des rides.
- C. les changements saisonniers de l'eau de mer du Trias grâce à la géométrie des rides.
- D. la direction du courant, l'énergie de dépôt et la profondeur de l'eau.

Question 4

Quel processus empêcherait le plus la préservation d'une empreinte avant son enfouissement ?

- A. Enfouissement rapide sous une boue carbonatée suivi de conditions arides.
- B. Cimentation précoce du sédiment.
- C. Formation d'un tapis microbien (biofilm).
- D. Bioturbation du sédiment.

Question 5

Quelle est la conséquence la plus probable si une empreinte bien formée sur une boue humide est traversée à plusieurs reprises par d'autres animaux avant son enfouissement ?

- A. L'empreinte devient plus résistante à l'érosion en raison de la compaction du sédiment.
- B. L'empreinte peut être effacée par le remaniement répété des sédiments.
- C. L'empreinte devient plus nettement définie grâce à une meilleure lithification.
- D. Le contour général de l'empreinte est préservé, avec une perte des détails fins.

Question 6

Les dolomies qui préservent les empreintes, associées à des fentes de dessiccation et à des rides de courant, indiquent un environnement de dépôt de type...

- A. vasière tidale carbonatée peu profonde, périodiquement émergée.
- B. bassin carbonaté sous la limite d'action des vagues avec sédimentation marine continue.
- C. vasière côtière deltaïque avec un apport abondant de sédiments silicoclastiques.
- D. environnement fluvial dominé par des dépôts de chenaux de rivières.

Question 7

Concernant la transformation du sédiment en dolomie consolidée qui a préservé les empreintes, quelle combinaison de processus diagénétiques est la plus correcte ?

- A. Compaction, dissolution et recristallisation du sédiment.
- B. Compaction, cimentation et fusion partielle des minéraux carbonatés.
- C. Compaction, cimentation et cristallisation des minéraux carbonatés.
- D. Compaction, cimentation et bioturbation du sédiment.

Question 8

Dans la séquence taphonomique, pourquoi l'enfouissement est-il considéré comme la phase la plus critique ?

- A. Un substrat sec qui n'est jamais enfoui reste visible et facile à trouver.
- B. Un enfouissement grossier préserve les détails des fossiles pendant la compaction.
- C. Si l'enfouissement se produit trop tard, l'empreinte pourrait ne pas se consolider.
- D. Sans enfouissement, le soulèvement tectonique rendra les empreintes érodables.

Question 9

Une couche comportant des empreintes montre des fentes de dessiccation bien développées et, en même temps, des détails anatomiques très fins et bien conservés, et ce malgré le fait que les fentes de dessiccation aient tendance à détruire les détails fins. Quelle interprétation pourrait expliquer cette apparente contradiction ?

- A. Un enfouissement rapide s'est produit avant une détérioration prolongée de la surface.
- B. Les fentes de dessiccation se sont formées avant que les empreintes ne soient formées.
- C. Les fentes ont favorisé la circulation de l'air et le durcissement complet des détails.
- D. Le recouvrement par de l'eau après la formation des fentes a hydraté les détails anatomiques.

SECTION B : PALÉOGÉOGRAPHIE ET CONTEXTE TECTONIQUE — Questions 10–15

Question 10

Les strates triasiques du site, presque verticales aujourd'hui, doivent principalement cette géométrie à la collision entre la plaque Adriatique/Apulienne et la plaque européenne lors de l'orogénèse alpine (Crétacé–Cénozoïque). Ce processus impliquait...

- A. l'intrusion de batholites qui ont soulevé et fait pivoter les strates par des effets thermiques.
- B. une érosion différentielle qui a progressivement incliné les couches les plus résistantes.
- C. le chevauchement de différentes sections du fond de la marge océanique 'marécageuse'.
- D. un rifting jurassique qui a incliné les blocs le long de failles normales.

Question 11

Le socle cristallin de la région est dans le faciès des schistes verts (métamorphisme de bas degré). Quelle observation exclut un degré de métamorphisme plus élevé ?

- A. la présence de grenat almandin et de disthène.
- B. la préservation de fossiles reconnaissables.
- C. la présence de sillimanite, typique de températures plus élevées, supérieures à ~600 °C.
- D. une fusion partielle caractérisée par la présence de veines leucocrates largement répandues (migmatites).

Question 12

Au Trias tardif, l'océan Téthys était relié à la Panthalassa par un bras de mer équatorial. Quelle pourrait en être la conséquence la plus probable ?

- A. Les organismes marins sont restés largement isolés parce que les eaux équatoriales formaient une barrière thermique majeure entre les deux océans.
- B. En raison de la stratification thermique des eaux, seuls les organismes planctoniques se dispersaient entre les deux océans, tandis que les organismes nectoniques et benthiques restaient isolés.
- C. Les courants froids de la Panthalassa qui s'écoulaient à travers la voie maritime réduisaient la biodiversité marine le long des marges téthysiennes.
- D. La circulation équatoriale chaude favorisait la dispersion des organismes marins et contribuait à une forte biodiversité tropicale.

Question 13

Compte tenu de la paléolatitudes du site (~10–20°N), de concentrations atmosphériques de CO₂ 3–4 fois supérieures à celles d'aujourd'hui et de l'absence de calottes glaciaires polaires, le climat le plus probable à cet endroit était :

- A. Tempéré avec des hivers frais et des chutes de neige saisonnières.
- B. Aride en permanence, avec de très faibles précipitations tout au long de l'année.
- C. Chaud et humide de type équatorial toute l'année, avec peu de variation saisonnière.
- D. Chaud avec des saisons humides et sèches prononcées typiques des régions tropicales.

Question 14

Les strates ont été impliquées dans l'orogénèse alpine (plissement et chevauchement), mais elles préservent des empreintes et des structures sédimentaires reconnaissables. Que peut-on en conclure ?

- A. La déformation s'est produite à faible degré.
- B. Les roches ont subi une altération magmatique.
- C. Les empreintes se sont formées à un stade tardif de l'orogénèse alpine, avec moins de déformation
- D. Un métamorphisme de haut degré s'est produit rapidement et n'a pas effacé les empreintes.

Question 15

Pourquoi les environnements de plate-forme carbonatée avec des vasières tidales, tels que celui décrit, favorisent-ils la préservation des traces ?

- A. Des courants océaniques de haute énergie ont rapidement enfoui et préservé les empreintes.
- B. Un apport sédimentaire limité provenant des montagnes encore en formation a empêché des modifications de l'empreinte après son enfouissement.
- C. L'émersion et la mise à l'affleurement ont stabilisé la surface du sédiment avant une submersion et un enfouissement rapides.
- D. Une faible activité biologique a empêché la modification de la surface du sédiment pendant la subsidence.

SECTION C : ICHNOLOGIE ET COMPORTEMENT — Questions 16–19

Question 16

Par rapport aux fossiles de parties du corps (fossiles corporels), la valeur ajoutée PRINCIPALE des traces fossiles (ichnofossiles) est qu'elles...

- A. fournissent davantage d'informations taxonomiques que les fossiles de parties du corps.
- B. permettent une meilleure reconstitution anatomique de l'organisme.
- C. peuvent enregistrer des données supplémentaires sur le comportement et l'écologie de l'organisme.
- D. préservent des informations biologiques non enregistrées par les fossiles corporels.

Question 17

À partir de l'allure, de la foulée et de la profondeur des empreintes, quelles informations peut-on déduire ?

- A. La taille approximative, la posture et le type de démarche de l'organisme.
- B. La taille de l'organisme déduite à partir de la profondeur de l'empreinte.
- C. Les habitudes de chasse, déduites de la forme des empreintes des orteils et des griffes.
- D. Le comportement reproducteur, déduit grâce à des empreintes retrouvées dans une position similaire.

Question 18

Sur le même plan de stratification, des pistes parallèles de plusieurs individus de la même espèce, avec des pieds et des foulées similaires (voir Fig. 1), suggèrent avant tout...

- A. que les pistes parallèles ont une plus grande chance d'être conservées.
- B. la présence d'un substrat qui impose un unique schéma de déplacement.
- C. le partage du même habitat par différents individus.
- D. un comportement social possible tel que des déplacements grégaires.

Question 19

Sur le même plan de stratification se trouvent des empreintes de forme similaire mais de taille très différente. En l'absence d'autres indices, l'interprétation la plus probable est...

- A. un dimorphisme sexuel extrême entre les mâles et les femelles.
- B. des juvéniles et des adultes de la même espèce.
- C. des espèces entièrement différentes avec des empreintes convergentes pour le même substrat.
- D. une variation saisonnière de la taille du même individu.

SECTION D : ADAPTATIONS ÉVOLUTIVES ET ÉCOLOGIE — Questions 20–23

Après la grande extinction Permien-Trias (252 Ma), la faune terrestre était dominée par les archosaures et les premiers reptiles primitifs ; les mammifères primitifs, petits et nocturnes, étaient présents mais écologiquement marginaux. L'environnement de vasière tidale du Trias supérieur était caractérisé par des inondations périodiques, une exposition à l'air libre, une boue carbonatée meuble et une variabilité environnementale saisonnière.

Question 20

Par rapport à une posture “à raz du sol”, certains archosaures du Trias ont évolués vers une posture redressée (membres orientés sous le corps) : quel avantage majeur cette adaptation locomotrice leur procurerait-elle ?

- A. Acquisition de l'endothermie, en les rendant indépendant de la température du sol.
- B. Un coût énergétique plus faible lors d'un déplacement prolongée sur le continent.
- C. Une plus grande surface corporelle exposée à l'atmosphère pour la thermorégulation.
- D. Une plus grande chance de pouvoir continuer à respirer de l'air pendant les périodes d'inondation.

Question 21

Dans un environnement de plate-forme carbonatée avec des vasières tidales, les organismes les plus performants étaient très probablement adaptés à...

- A. une salinité marine constante et une submersion permanente.
- B. se déplacer et rechercher des zones à conditions stables pendant les périodes de stress.
- C. des fluctuations de la salinité, de la température et de la périodicité d'émersion.
- D. une migration rapide vers des eaux plus profondes chaque fois que les conditions changeaient.

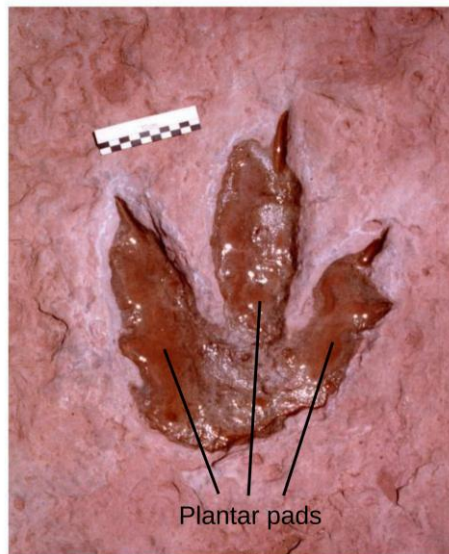


Figure 2 : Empreinte de théropode (avec l'aimable autorisation de Marco Avanzini, Museo Tridentino di Scienze Naturali – Trento)

Plantar pads = coussinets plantaires.

Question 22

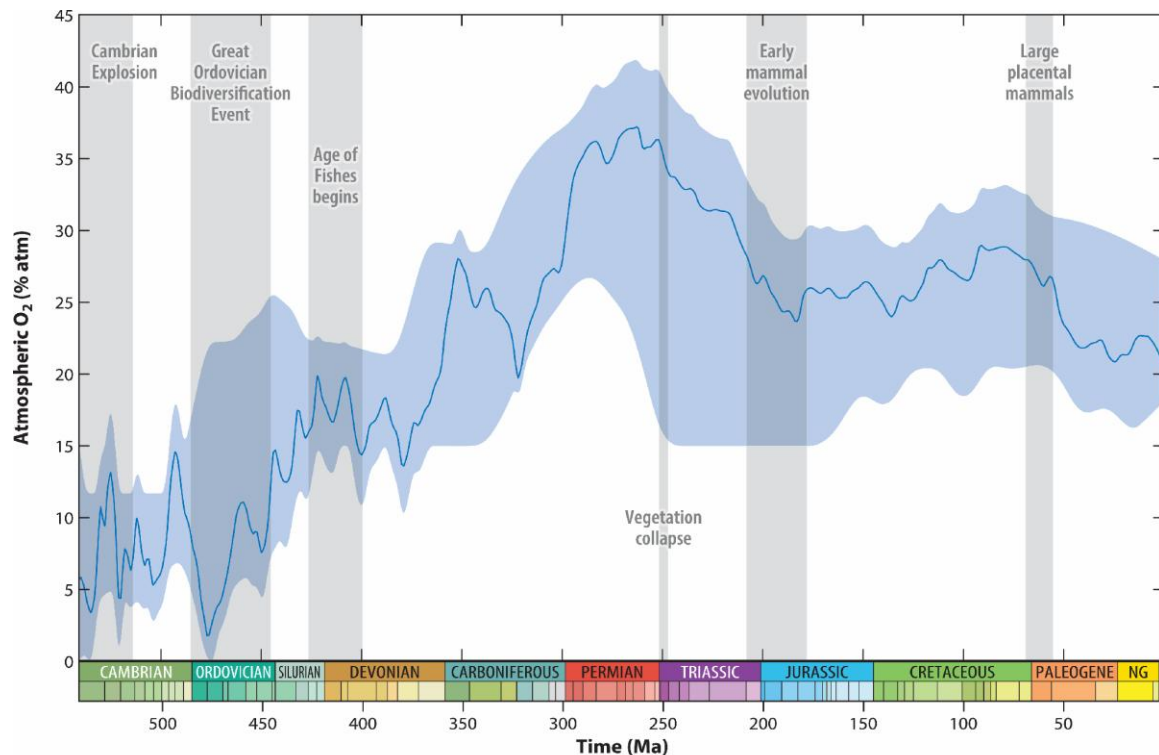
Les empreintes montrent des coussinets plantaires bien développés (voir Fig. 2), qui représentent principalement une adaptation à...

- A. la locomotion sur des substrats meubles et boueux, en répartissant le poids sur une plus grande surface.
- B. le fait d'attraper des proies au sol, améliorant la stabilité pendant l'attaque.
- C. la thermorégulation, en absorbant la chaleur du sol dans un environnement aride.
- D. la locomotion sur roche dure, en augmentant la friction et en empêchant de glisser.

Question 23

Les modèles géochimiques (voir Fig. 3) indiquent pour le Trias supérieur une réduction du niveau d'O₂ atmosphérique. La conséquence écologique la plus plausible pour la faune terrestre est...

- A. la survie des organismes anaérobies, à l'inverse des vertébrés terrestres à respiration aérobie intense.
- B. une adaptation progressive du métabolisme aérobie de nombreux organismes.
- C. l'apparition d'un gigantisme ultérieur chez tous les vertébrés terrestres, en raison d'une interface respiratoire présumée plus importante, favorisée à faible teneur en oxygène.
- D. une augmentation du développement de la faune terrestre, puisque respirer l'O₂ atmosphérique est devenu plus facile.



Mills B/JW, et al. 2023
Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 51:253–76

Figure 3. Courbe de l'O₂ au phanérozoïque (ligne bleue). La zone ombrée intègre différentes estimations de l'O₂ au phanérozoïque. Les variations de l'O₂ sont comparées aux principaux événements biologiques (Annual Review of Earth and Planetary Sciences - Open Access)

SECTION E : EXTINCTIONS DE MASSE ET SYSTÈME TERRE — Questions 24–30

Tableau 1 – Les cinq grandes extinctions du Phanérozoïque.

Événements	Âge (Ma)	% d'espèces perdues	Cause principale / stress
Fin de l'Ordovicien	444	~85%	glaciation et régression (refroidissement)
Dévonien supérieur	372	~75%	anoxie océanique, LIP
Fin du Permien (P-T)	252	~96%	Trapps de Sibérie (LIP), effet de super-greenhouse
Fin du Trias (T-J)	201	~76%	CAMP (LIP), acidification des océans
Fin du Crétacé (K-Pg)	66	~76%	impact de Chicxulub + Trapps du Deccan, hiver d'impact

LIP = Large Igneous Province (Grande Province Magmatique)

CAMP = Central Atlantic Magmatic Province (Province magmatique de l'Atlantique central)

Question 24

Les empreintes du Stelvio se trouvent stratigraphiquement sous les niveaux associés à l'extinction T-J. Que peut-on déduire des organismes qui les ont laissées ?

- A. Ils vivaient avant l'extinction T-J ; la stratigraphie n'indique pas si leurs descendants y ont survécu.
- B. Ils ont survécu à l'extinction T-J et sont les ancêtres directs des dinosaures jurassiques.
- C. L'événement T-J n'a pas affecté les écosystèmes côtiers alpins, qui étaient déjà au-dessus du niveau de l'eau.
- D. Ces organismes se sont éteints à la limite T-J.

Tableau 2 – intervalles de temps caractéristiques de la limite Crétacé supérieur – Paléogène inférieur (K-Pg)

Ma (millions d'années)	Événement
~66.50	Début des Trapps du Deccan
~66.40–66.10	Dégazage hyperthermal pré-impact
~66.05	Impact de l'astéroïde de Chicxulub et principale phase d'extinction
~66.05-66.00	Volcanisme du Deccan accéléré par l'impact
~65.50	Déclin du volcanisme du Deccan / rétablissement au Paléogène inférieur

Question 25

L'extinction de la fin du Permien est liée aux Trapps de Sibérie et à un climat de super-greenhouse. Pourquoi a-t-elle été plus dévastatrice que d'autres événements d'extinction ?

- A. Un refroidissement rapide a fait baisser la température dans les écosystèmes tropicaux.
- B. La surchauffe des océans a provoqué des tsunamis répétés qui ont détruit la plupart des écosystèmes côtiers.
- C. Les cendres volcaniques ont bloqué la lumière du soleil pendant des décennies.
- D. Un réchauffement prolongé a perturbé à la fois les écosystèmes marins et terrestres.

Question 26

Concernant la relation entre l'impact de Chicxulub et les Trapps du Deccan, quelle affirmation reflète le mieux l'état actuel des recherches sur cet événement d'extinction de masse ?

- A. Le Deccan a commencé à entrer en éruption environ 50 000 ans après l'impact, activé par les chocs sismiques propagés à travers le manteau, provoquant la première cause de l'extinction.
- B. Le Deccan a contribué au réchauffement climatique mondial progressif des milliers d'années avant l'impact, qui a ensuite déclenché une déstabilisation ultérieure des écosystèmes qui a finalisé l'extinction.
- C. L'effet climatique des éruptions du Deccan était négligeable comparé aux effets directs de l'impact de l'astéroïde.
- D. Les phases d'éruption des Trapps du Deccan et l'impact de l'astéroïde coïncident, mais se sont produites entièrement indépendamment, sans relation directe entre le volcanisme et les effets de l'astéroïde.

Question 27

Après le K-Pg, les mammifères se sont rapidement diversifiés à partir des quelques groupes survivants, occupant les multiples niches écologiques libérées par les dinosaures non aviens et d'autres espèces éteintes. Ce processus est un exemple de...

- A. évolution convergente : différents taxons développent indépendamment des formes similaires en s'adaptant aux mêmes environnements.
- B. sélection stabilisante : la pression de sélection conserve les caractères standards déjà présents dans la population.
- C. radiation adaptative : diversification rapide de quelques taxons en de nombreuses formes adaptées à différentes niches écologiques.
- D. extinction en cascade : la perte d'un taxon entraîne l'effondrement progressif des autres groupes qui en dépendent.

Question 28

L'extinction T–J est liée au volcanisme du CAMP suivi d'une acidification des océans. Comment cela peut-il s'expliquer ?

- A. La vapeur d'eau libérée lors d'éruptions sous-marines a dilué l'eau de mer et abaissé son pH.
- B. La fonte des calottes glaciaires a refroidi les océans, augmentant la solubilité des gaz acides.
- C. Le dioxyde de carbone produit par les éruptions volcaniques s'est dissous et a acidifié l'eau de mer.
- D. L'augmentation de l'évaporation a concentré les sels dissous, abaissant le pH de l'eau de mer.

Question 29

Les empreintes d'archosaures (~210 Ma) sont plus anciennes que l'extinction Trias–Jurassique (T-J). Quel événement explique le plus probablement la dominance des archosaures sur le site ?

- A. L'extinction P-T avait libéré les niches occupées ultérieurement par les archosaures.
- B. Les archosaures eux-mêmes étaient impliqués car partiellement responsables de l'extinction T-J.
- C. L'extinction T-J était déjà en cours, ce qui a favorisé les archosaures.
- D. La composition de la faune n'est pas liée aux événements d'extinction de masse, car ils étaient éloignés dans le temps.

Question 30

Le même événement d'extinction peut être enregistré géologiquement par des signatures climatiques opposées dans les sédiments : réchauffement ou refroidissement. Les deux mécanismes résultent d'émissions de gaz à effet de serre tels que le CO₂ et le CH₄, ainsi que de poussières et d'aérosols. Quelle explication rend le mieux compte de cet effet apparente contradiction ?

- A. La réponse climatique dépend principalement de la latitude de la région affectée, car la température locale agit différemment sur les émissions.
- B. Différentes émissions atmosphériques sont nécessairement causées par différents événements géologiques qui se produisent simultanément.
- C. Les émissions provoquent généralement un refroidissement global, mais la chaleur produite par la lave volcanique peut générer un réchauffement local.
- D. Les gaz à effet de serre réchauffent sur de longues échelles de temps, tandis que les poussières et les aérosols bloquent le rayonnement solaire, provoquant un refroidissement rapide et bref.