



RAPPORT

CONCOURS G2E

Ouvert aux élèves issus des Classes Préparatoires BCPST

SESSION 2023

2 Rue du Doyen Marcel Roubault – BP 10162
54505 VANDOEUVRE-lès-NANCY CEDEX
Tél. : 03 72 74 46 11
g2e-concours@univ-lorraine.fr
concoursg2e.univ-lorraine.fr

ÉPREUVE ÉCRITE DE BIOLOGIE

Remarques générales

L'objectif de l'épreuve écrite de Biologie est comme les années précédentes d'évaluer les capacités d'analyse des candidats en s'appuyant sur l'étude de documents extraits de la littérature scientifique et leur capacité à les relier aux connaissances acquises au cours des deux années de BCPST. Les questions de cours ne sont donc pas à négliger.

Le sujet était organisé en deux sous-sujets indépendants (Biologie 1 et 2), chaque sous-sujet étant découpé en plusieurs parties. Une bonne partie des candidats a bien compris l'intérêt de consacrer un temps équivalent aux deux parties et a abordé les deux sous-sujets et certains ont su répartir leur effort équitablement sur les deux, traitant l'ensemble des questions (32% des candidats ont traité l'ensemble du sujet, sans forcément répondre à l'intégralité des questions). Toutefois, cette année, une partie des candidats n'a pas pu terminer le sujet 1 - 60% a délaissé les questions 7- et plus de 55% le sujet 2 à partir de la question 15c. Le jury conseille aux candidats de bien faire attention à gérer leur temps.

Beaucoup de copies se situent autour de la moyenne : très peu d'excellentes copies mais également très peu de mauvaises prestations.

Dans l'ensemble, les copies sont bien rédigées avec un effort notable pour la rédaction et le soin dans la présentation. Toutefois, certains candidats doivent être particulièrement vigilants avec l'orthographe et la grammaire : les règles basiques d'accord des verbes et des adjectifs doivent être *a minima* maîtrisées, certaines copies sont difficilement lisibles surtout quand la copie est rédigée avec des paragraphes non aérés. Le fait d'avoir une écriture peu lisible n'est bien sûr pas pénalisé. Le jury recommande fortement au candidat de se relire avant de rendre sa copie. Le jury souhaite également sensibiliser les candidats sur le fait qu'il faille rédiger les réponses et que des abréviations et des signes (flèches...), s'ils sont trop utilisés, sont pénalisés.

Les questions ont un numéro qui correspond à des points de barème : modifier la numérotation n'aide pas le correcteur. Ainsi, la partie 2 commence à la question 8, pas une autre question 1. Même si cela est anecdotique, le jury souhaite que cela ne se reproduise pas lors des sessions futures.

Le jury conseille enfin au candidat qui ne traite pas une question de laisser tout de même un espace dédié sur sa copie : si à un autre moment de l'épreuve, le candidat souhaite finalement traiter la question abandonnée, il aura ainsi la possibilité de le faire dans l'ordre logique du sujet. Dans certaines copies (rares heureusement), le correcteur est face à une distribution aléatoire des réponses.

Les contrôles ont un intérêt : celui de pouvoir conclure sur les résultats obtenus. Les négliger est une faille dans le raisonnement. Plusieurs candidats ne savent pas analyser correctement une expérience, manquant parfois d'esprit critique. Quand un schéma bilan ou un organigramme est explicitement demandé par l'énoncé, le correcteur attend cela et rien d'autre, donc n'attribue pas de points à une réponse longuement rédigée. Les candidats ne doivent pas hésiter à utiliser une demi-page, voire une page complète, pour réaliser ceux-ci, notamment lorsqu'ils sont explicitement exigés dans le sujet. Tout dessin doit être soigné, titré et légendé à l'aide de traits tracés à la règle, il peut être judicieux d'apprendre à schématiser rapidement. Rien ne sert de paraphraser le texte de l'énoncé pour répondre à une question. C'est une perte de temps.

Le jury rappelle que l'utilisation judicieuse et raisonnée de couleurs rend la copie plus attrayante et participe efficacement à la compréhension du schéma par le correcteur. Comme l'an dernier, la concision et la précision sont de mise. Voici maintenant une correction succincte et des remarques sur les prestations des candidats :

BIOLOGIE1 LES INHIBITEURS DE LA SUCCINATE DESHYDROGENASE (SDH)

Partie 1 Mode d'action du fongicide

Activité *in vivo* de la molécule I

La photographie doc1A permettait de visualiser l'étendue des surfaces lésées, afin de faciliter la compréhension du doc1B. Il permettait aussi de voir si l'étendue des lésions dépassait ou pas la superficie de la pastille. Car il s'agissait bien d'une pastille comme indiqué sur la photographie en légende, pas de trou.

Question 1.a. L'eau est utilisée comme contrôle négatif. Cela permet de voir l'effet que peut avoir l'aspersion d'une solution sur la feuille et sur le développement du champignon. Mais la molécule I comme le fluopyram étant diluée dans un solvant particulier, il convient de s'assurer que les effets vus avec le fluopyram ou la molécule I ne sont pas dus au solvant seul. Le fait d'asperger la feuille avec le solvant est également un contrôle négatif nécessaire.

Cette question a été globalement bien comprise. Toutefois certains candidats ne comprennent pas la nécessité d'avoir des contrôles dans les expériences, pensent à une hydratation des feuilles. Des candidats ont également mal lu le sujet, pensant que le solvant était un mélange de solution I et fluopyram, avec des interactions inhibitrices de l'un sur l'autre. Ces confusions se sont maintenues dans les questions suivantes.

Question 1.b. Quand la feuille est aspergée avec les solutions contrôles (eau et solvant), les lésions s'étendent au-delà des pastilles d'inoculation jusqu'à mesurer environ 57mm^2 , soit 4.5 fois plus. Les deux résultats sont comparables. Le fait d'asperger la feuille avec le fluopyram induit une surface lésée de 15mm^2 , soit la surface de la pastille. Le champignon ne s'est pas développé au-delà de la pastille. La situation est similaire avec la solution I avec moins d'efficacité car le champignon s'étend sur une surface de 20mm^2 . Compte tenu des barres d'erreur, les résultats sont significatifs. Les descriptions ne sont pas toujours chiffrées avec les valeurs du document ce qui pénalise le candidat.

Question 1.c. Même si les barres d'erreur permettent de constater que la molécule I est légèrement moins efficace pour inhiber la croissance du champignon, elle a toutefois une action antifongique. Rien à ce stade ne permet de conclure sur son mode d'action, à savoir si la molécule I est comme le fluopyram une molécule inhibitrice de l'enzyme SDH.

Mesure de la ddp mitochondriale

Question 2.a. Les images en lumière naturelle montrent des organismes filamenteux incolores ramifiés, de quelques μm de large et de plusieurs μm de long (plus de 300 dans l'image de la 3^{ème} ligne) caractéristiques des hyphes mycéliens. Certains candidats ont évoqué la présence possible de spores (points sombres). Rien dans la publication ne permettait de l'affirmer mais le jury a considéré positivement ce critère. L'ordre de grandeur n'est pas systématiquement évoqué.

Question 2.b. Les mycètes ayant été traités au solvant seul (témoin) fluorescent dans le rouge et le vert, ce qui prouve l'existence du composé JC1 à la fois sous forme de monomère et polymère donc une ddp pouvant être forte ou faible, donc une ddp moyenne. Les mycètes traités au fluopyram sont quasiment entièrement verts, à l'exception de 3 points et un peu de mycélium rouge. JC1 est donc sous forme de monomère, preuve d'une ddp faible. Or le fluopyram agit sur l'enzyme SDH. Il y a donc un lien entre l'activité de cette enzyme et la ddp membranaire des mitochondries.

(La chaîne de transporteurs d'électrons est impactée)

Question 2.c. Les mycètes traités avec la molécule I diluée dans le solvant et incubés avec le composé ont le même profil de fluorescence que ceux traités avec le fluopyram. JC1 est sous forme de monomère comme le prouve la coloration verte. La molécule I a une action sur la ddp et sans doute comme le fluopyram via l'inhibition de SDH.

SDHi et cycle de Krebs

Question 3.a. Le cycle de Krebs se déroule dans la matrice mitochondriale. Le jury est extrêmement surpris de constater qu'une bonne partie des candidats ne sait pas situer précisément le cycle de Krebs dans la cellule. La question suivante précisait « thermodynamiquement ». Si $\Delta rG_0=0$, la réaction est thermodynamiquement à l'équilibre et peut être réversible si les quantités de produits et de substrats le permettent. Si $\Delta rG_0<0$, si la réaction est exergonique, elle sera dans un seul sens.

Question 3.b. Le cycle de Krebs est une succession de réactions d'oxydoréduction. L'acétyl coA entre dans le cycle pour former le citrate avec l'oxaloacétate. Le citrate s'isomérisé en isocitrate qui est le substrat de deux réactions possibles : donner de l'alpha cétoglutarate, du CO_2 et NADH,H^+ , comme chez les eucaryotes, ou donner du glyoxylate.

S'il y a formation d'alpha cétoglutarate, il y aura formation de succinate, de NADH , de CO_2 et d'ATP puis de fumarate et FADH_2 (réaction catalysée par SDH), puis de fumarate, malate et revenir (c'est un cycle) à l'oxaloacétate en produisant du NADH,H^+ .

S'il y a formation de glyoxylate, il y aura formation de malate, une réaction qui permet de court-circuiter le cycle classique et contourner la réaction catalysée par SDH.

Les valeurs obtenues pour les concentrations de chaque produit/substrat servent de référence pour les deux autres conditions.

Finalement, ce cycle de Krebs permet de fournir des coenzymes réduits : NADH, H⁺, FADH₂, du CO₂ et de l'ATP si le cycle est complet, seulement du NADH, H⁺ s'il est court-circuité au niveau du glyoxylate.

De nombreux candidats ont paraphrasé le cycle en oubliant de parler de la production des coenzymes, de l'ATP et du CO₂.

Question 3.c. En hypoxie (6% d'O₂) les différents composés peuvent être mesurés donc le cycle n'est pas bloqué. On constate toutefois des variations comme moins d'α cétoglutarate (3x moins environ). Les autres composés sont en excès dans les conditions d'hypoxie (succinate, malate, oxaloacétate, glyoxylate) ou sensiblement similaires (malate, isocitrate). Il y a donc bien réduction d'alpha cétoglutarate mais l'accumulation du succinate semble montrer une inhibition de la réaction catalysée par la SDH. Sachant que les coenzymes sont régénérés par la chaîne respiratoire (l'O₂ en étant l'accepteur final d'électrons), que NAD⁺ et FAD⁺ sont substrats de certaines réactions, on peut comprendre l'accélération de la voie du glyoxylate qui consomme moins de coenzymes oxydés. Notons enfin la diminution de la quantité de pyruvate (4 fois moins) en conditions d'hypoxie, le pyruvate ayant été engagé vraisemblablement dans le processus de fermentation.

Il n'était pas nécessaire de lister tous ces aspects pour obtenir le maximum de points à la question.

Question 3.d. La différence très nette est au niveau de l'alpha cétoglutarate : la voie du glyoxylate doit être privilégiée. Le succinate s'accumule davantage dans la souche mutée que dans la souche sauvage, il est le substrat de la réaction catalysée par l'enzyme défectueuse. Mais le malate est à peu près au même taux, sans doute provenant aussi de la réaction raccourcie (via le glyoxylate).

Certaines concentrations sont comparables entre la souche mutée et la souche sauvage en manque d'O₂ (à mettre en relation avec la ddp membranaire et les inhibiteurs de la SDH).

Partie 2 Résistance et évolution

Question 4.a. 13% des candidats n'ont pas su répondre à la question. La valeur sélective tient compte de la survie et de la fertilité.

Les SDHi, en inhibant le cycle de Krebs, réduisent la production d'ATP par respiration donc la survie, la croissance et la reproduction, ce qui détermine la valeur sélective des individus. Toute résistance aux SDHi augmente la valeur sélective des porteurs de ce type de mutations (ce qui implique d'avoir ces mutations avant l'exposition).

Question 4.b. Sans traitement aux UV, un seul mutant est apparu B-H267Y contre 4 avec un traitement aux UV. Les UV augmentent la fréquence d'apparition des mutations. On sait que les UV B altèrent chimiquement les bases azotées, en particulier en provoquant l'association, par liaison chimique forte, de deux thymines proches, ce qui donne un dimère de thymine – cela n'était pas exigé mais le jury l'a trouvé dans quelques copies. Ces mutations, si elles ont lieu au sein du gène codant SDH, modifient la structure de l'enzyme qui sera traduite à partir de l'allèle muté, une isoforme d'enzyme sur qui l'inhibiteur sera moins efficace. Ces mutants sont ensuite sélectionnés par le fongicide puisque les autres souches meurent à cause du SDHi.

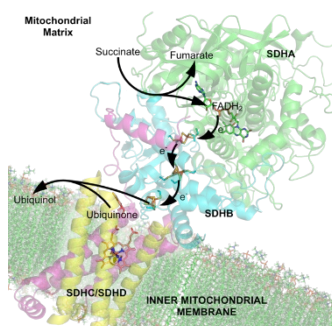
Question 4.c. Le mutant C-T97I apparaît en 1^{er} (dès l'étape 3), il a donc alors une valeur sélective supérieure à tous les allèles présents, qui ne confèrent pas de résistance. Il se répand donc dans la population, puisque les porteurs de cet allèle ont davantage de descendants jusqu'à une certaine dose de SDHi (étape 6) au-delà de laquelle il n'est plus avantageux.

Les autres mutations apparaissent plus tard sur le gène C mais aussi sur le gène B (différente de celle obtenue sans UV préalable) et se répandent selon leurs valeurs sélectives relatives. Par valeur sélective décroissante : B-H267L > C-H152R > C-S83G = C-T97I > allèle natif.

Certains candidats utilisent parfois des formulations maladroites, finalistes. Ainsi, il n'y a pas de mutation délétère comme cela a été lu dans certaines copies puisque ces mutations peuvent se répandre dans les populations.

Partie 3 Pathologies et SDH

3.1. Effet des SDHi sur 4 espèces : Pour information, l'enzyme SDH est une enzyme mitochondriale (ou bactérienne).



Question 5.a. Il s'agissait ici d'une question de cours, mal comprise ou non traitée par un certain nombre de candidats (48% de réponses notées zéro). L'activité enzymatique est la quantité d'enzyme catalysant la transformation d'1µmole de substrat en une minute. Cela n'avait donc aucun intérêt de parler de gène rapporteur, de *western blot*, etc. On ne demandait pas de caractériser des protéines.

Tous les candidats ayant expliqué qu'il fallait mesurer l'apparition de produit (par n'importe quelle manière, colorimétrique ou autre) ou la disparition de substrat (ou la transformation du cofacteur), tracer les résultats des mesures $[P] = f(t)$ pour une $[S]$ donnée puis calculer la vitesse initiale de la réaction, cela à concentration en substrat très supérieure à celle de l'enzyme, ont eu tous les points. Certains candidats ont replacé judicieusement la réponse dans son contexte en parlant de succinate et fumarate, au lieu de substrat et produit.

Question 5.b. Il suffisait dans cette question de commenter le document 5. La molécule ciblée par les SDHi utilisés est la SDH. Il convenait de parler d'inhibition des SDH humaine, de ver de terre, d'abeille, de champignon *Botrytis*. Après discussion, le jury a décidé d'accepter les réponses traitant d'inhibition de l'Homme, de l'abeille, etc., prenant cela pour un raccourci malencontreux. Cette question a donc été bien réussie par les étudiants qui l'ont abordée.

Les barres d'erreur permettent de comparer les données entre elles. On s'intéresse ici à l'efficacité d'inhibition de la SDH par divers inhibiteurs utilisés comme fongicide. Plus on utilise d'inhibiteur, plus la SDH de l'espèce est insensible à cet inhibiteur.

Dans certaines copies, le candidat a présenté ses résultats sous forme de tableau ce qui rendait la comparaison plus facile à visualiser.

Selon la quantité d'inhibiteur utilisé, on mesure la sensibilité des SDH de différentes espèces aux fongicides

SDH de l'espèce \ dose de fongicide pour inhibée la SDH à 50%	Boscalid	Flutolanil	Fluopyram
<i>Homo sapiens</i>	Environ 5µmole.L ⁻¹	Environ 19 µmole.L ⁻¹	Environ 150 µmole.L ⁻¹
<i>Lumbricus terrestris</i>	Quasiment 1 µmole.L ⁻¹	Quasiment 0.5 µmole.L ⁻¹	Environ 40 µmole.L ⁻¹
<i>Apis mellifera</i>	Environ 78 µmole.L ⁻¹ Il faut beaucoup d'inhibiteur pour inhiber la SDH d'Abeille => peu sensible à ce fongicide	Environ 1 µmole.L ⁻¹	Environ 2 µmole.L ⁻¹
<i>Botrytis cinerea</i>	Environ 2 µmole.L ⁻¹	Environ 9 µmole.L ⁻¹	Environ 1 µmole.L ⁻¹
	Les SDH de l'Abeille sont peu sensibles mais celles de l'Homme, du ver de terre et du champignon sont très	Les SDH de l'homme sont peu sensibles, de même celles de <i>Botrytis</i> ne sont pas beaucoup sensibles à ce fongicide	Les SDH de l'Homme sont peu sensibles mais celles du ver de terre (même si moins sensible par rapport

	sensibles au Boscalid (de faibles doses les inhibent)	(qui doit agir sur d'autres champignons, vue son utilisation comme fongicide) mais celles du ver de terre et de l'abeille sont très sensibles au Flutolanil (de faibles doses les inhibent)	aux autres fongicides), de l'Abeille et du champignon sont très sensibles au Fluopyram (de faibles doses les inhibent)
--	---	---	--

Question 5.c. Le flutolanil est un fongicide peu efficace sauf si on force la dose (mais toxique pour les lombrics et les abeilles). Le fluopyram et le boscalid sont des fongicides efficaces mais :

- le fluopyram est toxique pour les abeilles (et aussi pour les lombrics). Cet intrant entraînera donc des conséquences sur l'activité du sol et le cycle de reproduction de végétaux angiospermes.
- Le boscalid n'agit pas sur les abeilles mais est toxique pour les lombrics.

Aucun fongicide n'est inoffensif pour l'environnement.

3.2. Remise en question des tests de toxicité

Une partie des candidats ne connaît pas les fibroblastes et les confondent avec les cellules musculaires (rhabdomyocytes), ce qui donne des commentaires sans lien avec la question.

Question 6.a. Il n'était pas demandé de compter le nombre de cellules mais d'estimer grossièrement la densité et la forme des cellules.

La situation en A est le contrôle, avec glucose et sans SDHi. Le tapis cellulaire est homogène (234 cellules environ). En B, les cellules sont cultivées sans glucose. Le tapis cellulaire est légèrement moins dense (200 cellules environ). En C, la forme des cellules semble similaire au cas B mais le tapis est un peu moins dense également par rapport à A (environ 190 cellules). En D, en absence de glucose et en présence de SDHi, il ne reste que 14 cellules, de forme différente, sans doute mortes ou en mauvais état.

Ainsi, en présence de glucose, le SDHi ne semble pas toxique car similaire au cas A. Il faudrait faire les tests en absence de glucose.

Question 6.b. Le cas B montre que l'absence de glucose impacte peu la survie et la multiplication des cellules, d'autres substrats énergétiques peuvent alimenter le cycle de Krebs (lipides, acides aminés). En présence de glucose sans SDH (cas C), le glucose alimente la glycolyse et la fermentation lactique. Les cellules peuvent avoir de l'ATP. Dans le cas D, la fermentation n'est pas possible (car pas de glucose), et les autres nutriments ne peuvent alimenter le catabolisme oxydatif (pas de SDH). Ainsi, les cellules meurent à cause de l'absence d'ATP.

Les candidats qui ont abordé ces questions (soit environ 40% des candidats) ont donné des réponses très correctes dans l'ensemble.

Question 7.a. Il était demandé d'analyser ET d'interpréter. Ces deux aspects étaient valorisés.

On compare ici la situation avec des fibroblastes sauvages (donc exprimant une enzyme SDH fonctionnelle) et des cellules n'exprimant pas l'enzyme, en présence ou non de glucose dans le milieu de culture, en présence d'inhibiteur de SDH à différentes concentrations selon la culture, pendant un temps variable de 0 à 12 ou 14j. On estime la densité de cellules : si la densité augmente, les cellules se sont divisées, si la densité est stable, les divisions compensent les pertes ou les cellules ne prolifèrent pas et ne meurent pas, si la densité diminue, les cellules meurent.

Doc 7A : Pour les fibroblastes exprimant SDH, en présence de glucose, les cellules prolifèrent, passant de 200 cellules pour $5,8\text{mm}^3$ à 1200 environ (donc x6) en 14j. L'ajout de SDHi ne semble pas avoir d'effet.

En absence de glucose, les cellules se multiplient (x2) en 2j, la population reste stable puis chute entre 5 et 14j. Il y a donc mortalité cellulaire en absence de glucose sous influence longue de SDHi. Le seul paramètre variant est la présence/absence de glucose : on peut ainsi dire que le glucose masque/annule l'effet de SDHi. Ce sont des résultats cohérents avec le document 6.

Le mutant en présence de glucose se multiplie mais plus lentement que le sauvage (de 120 au temps zéro à 350 cellules au bout de 14j soit environ x3 contre 1300 chez témoin). En absence de glucose, la multiplication est moins rapide (x1.8) et les cellules meurent à 14j. Ainsi, les cellules normales en présence

de SDHi ont une cinétique de prolifération similaire à celle des cellules mutées. Si ces cellules SDH-/- sont cultivées sans glucose mais en présence de SDHi, elles sont très sensibles au SDHi car il y a mortalité notée dès 4 j. (Ces cellules n'ont pas de SDH et sont tout de même sensibles à l'inhibiteur de SDH, soit la mutation n'affecte que l'isoforme majoritaire et il existe d'autres isoformes, soit l'inhibiteur a d'autres cibles, impossible de conclure ici et ce n'était pas attendu).

Question 7.b. Le patient a un profil de réponse similaire au mutant car il n'y a pas de mortalité, mais les neurones du patient présentent un arrêt des mitoses après 7j en présence de glucose. En absence de glucose, contrairement au mutant dont les cellules prolifèrent jusqu'à 6j au moins, les cellules mutées commencent à mourir après 4j. La situation est similaire avec un traitement au SDHi à $0.5\mu\text{mol.L}^{-1}$ mais le traitement au SDHi à $1\mu\text{mol.L}^{-1}$ induit la mortalité des cellules dès les premiers temps de l'expérience.

On peut penser que la mutation chez le patient réduit l'efficacité des SDH. Une des enzymes serait totalement non fonctionnelle ou moins efficace, ce qui entrainerait à long terme l'arrêt des mitoses puis la mort des cellules donc la neurodégénérescence.

Question 7.c. Si un patient atteint par la maladie d'Alzheimer est soumis à des SDHi, en absence glucose, cela peut entrainer une neurodégénérescence accélérée (mais comme on obtient des résultats similaires sans SDHi, ni glucose, est-ce bien un effet significatif pour de faibles doses d'inhibiteur ?).

BIOLOGIE 2 AUTOUR DU BOIS MORT

Partie 1 Le pic noir (*Dryocopus martius*)

Question 8. La biocénose désigne l'ensemble des espèces vivant dans un écosystème. En forêt, on trouve des arbres (chêne, charme...), des animaux appartenant à différents taxons (cerfs, pics, coléoptères...), des champignons et des micro-organismes.

Le biotope désigne les conditions physico-chimiques du milieu : pluviosité, température, humidité de l'air etc.

Certains candidats ont confondu biotope et diversité des horizons du sol. 17% des candidats n'ont eu aucun point sur cette question de cours.

Question 9a. Cette question a été globalement bien réussie par les candidats.

Le bois des arbres choisi par les pics est de densité très légèrement inférieure aux arbres témoins. On peut supposer que le pic s'attaque préférentiellement aux arbres dont une partie est déjà un peu dégradée, donc dont une partie de la matière organique a été retirée, ce qui est confirmé par le doc 2F. La hauteur de la première branche est nettement supérieure pour les arbres choisis, et la distance à l'arbre le plus proche est augmentée. On peut supposer qu'une première branche très haute ainsi qu'un éloignement aux arbres voisins empêche les mammifères prédateurs de grimper facilement dans l'arbre pour dévorer les œufs [le jury a accepté tout autre hypothèse valable]. Enfin, la richesse spécifique et le nombre d'individus de coléoptères saproxyliques sont bien plus importants.

On peut supposer que ces coléoptères s'attaquent plutôt au bois déjà accessible (non recouvert d'écorce) et fragilisé, comme celui présent autour du nid du pic, et/ou qu'ils servent de nourriture au pic.

Question 9b. Le pic noir est une espèce ingénieur (le jury acceptait aussi architecte) puisqu'elle fabrique des cavités qui seront utilisées par d'autres animaux. C'est aussi une espèce clé de voûte car selon sa présence ou son absence, les habitats et donc les niches écologiques disponibles sont profondément modifiées.

Partie 2 Les coléoptères saproxyliques

Etude de la biodiversité des coléoptères saproxyliques

Question 10a. Lorsqu'une seule espèce est présente, $p_i=1$ donc l'indice de Shannon vaut $H' = -\sum_{i=1}^S (1 \log(1)) = 0$

L'indice de Shannon est nul. Cette partie de la question a été globalement bien réussie.

Lorsque toutes les espèces sont réparties de manière équitable, $p_i=1/S$ donc chaque élément de la somme vaut $-(1/S) \cdot \log_2(1/S)$ donc la somme vaut $\log_2(S)$, avec S le nombre total d'espèces. Cette réponse était

beaucoup plus rare, la réponse (fausse) H=1 étant souvent trouvée. Le jury est bien conscient que l'indice de Shannon n'est pas au programme mais la formule en étant donnée, le candidat n'avait qu'à l'appliquer.

Question 10b. Plus on échantillonne de bois, plus on découvre d'espèces différentes. Mais comme le nombre d'espèces est limité, au bout d'un moment, l'échantillonnage récolte surtout des espèces que l'on a déjà comptées et le nombre d'espèces n'augmente plus : la courbe sature.

L'indice de Shannon maximal pour FI est de 2,5. Pour obtenir au moins $2,5 \times 0,8 = 2$, on lit sur le graphique qu'il faut seulement 5 échantillons.

Les coléoptères saproxyliques de type « *Ambrosia beetles* »

Question 11a. Reprenons le texte du sujet : « Certains coléoptères se nourrissent exclusivement de champignons regroupés sous le nom générique d'« *Ambrosia* » qui digèrent le bois. Le coléoptère cultive son champignon dans des galeries qu'il creuse dans le bois mort. Tous les champignons « *Ambrosia* » connus ne se reproduisent que par voie asexuée et clonale ; ils sont retrouvés exclusivement en association avec leurs coléoptères partenaires.

Ici, on s'intéresse au coléoptère *Xylosandrus* qui élève des champignons des genres *Ambrosiella* et *Raffaella*. »

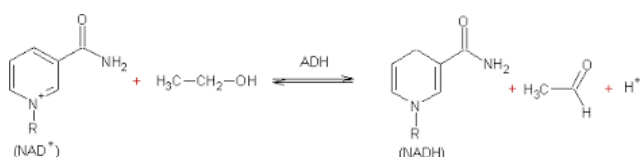
Le champignon *Ambrosia* n'est ainsi retrouvé qu'en présence du coléoptère, et à l'inverse le coléoptère ne se nourrit que du champignon. Le coléoptère permet la propagation du champignon en lui aménageant des galeries dans lequel il le cultive, il n'y a pas que de la prédation. Il s'agit donc d'une relation intime et durable à bénéfices réciproques, c'est-à-dire une symbiose mutualiste (il ne s'agit pas d'une prédation).

Question 11b. Les résultats sont cohérents entre les deux essences de bois.

On observe que la présence de faibles teneurs en alcool augmente considérablement la présence du coléoptère et de son champignon. Lorsqu'il n'y a pas d'éthanol dans le bois ni présence d'un diffuseur, le coléoptère n'attaque pas le bois. Le coléoptère semble donc détecter l'éthanol et n'attaquer que le bois qui en contient. Lorsque le coléoptère est simplement leurré par un diffuseur d'éthanol, il attaque le morceau de bois mais ne s'y maintient pas (par comparaison entre le nombre d'attaques et le % vivants dans le bois). Au contraire, plus la teneur en alcool augmente, plus on trouve de galeries et de coléoptères y vivant. On observe que le développement des champignons « *Ambrosia* » n'est pas affecté, voire est augmenté en présence de faibles teneurs en éthanol (dès 1% dans *Cornus*, à partir de 2.5% dans *Cercis*).

On peut supposer que l'alcool supprime les champignons compétiteurs de l'*Ambrosia* ce qui favorise peut-être la croissance de l'*Ambrosia* elle-même et celle des coléoptères qui s'en nourrissent.

Question 12a. Il s'agit d'une réaction redox : l'éthanol est oxydé en acétaldéhyde (la fonction alcool forme une fonction aldéhyde) ayant un plus grand nombre d'oxydation) et le NAD^+ est réduit en NADH, H^+ . Cette coenzyme joue le rôle d'accepteurs d'électrons.



Question 12b. Les champignons *Ambrosia* présentent une activité ADH bien plus élevée que les autres champignons. Ils peuvent donc éliminer l'éthanol en le réduisant en acétaldéhyde. Une faible teneur en éthanol, jusqu'à 2,5%, leur est positive ; au-delà les effets néfastes de l'alcool commencent à se manifester.

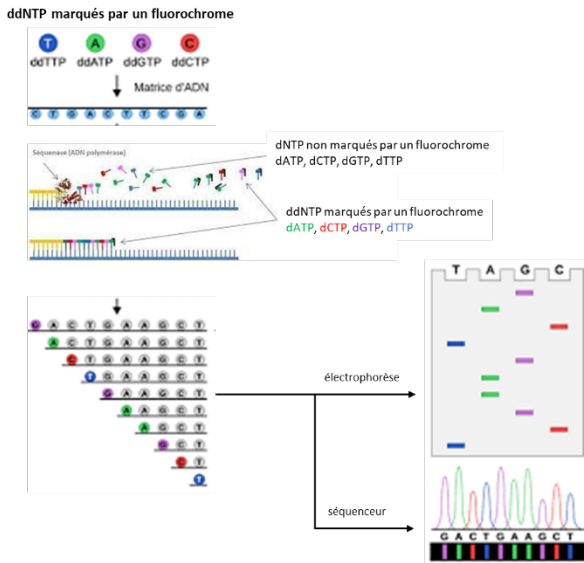
Au contraire, les autres champignons ont une très faible activité ADH, ils sont donc très sensibles aux effets de l'éthanol même à des taux très faibles (l'alcool est utilisé comme désinfectant). 40% des candidats n'ont pas su répondre à la question.

Les coléoptères saproxyliques digérant eux-mêmes le bois

Question 13a. La technique des terminateurs de chaîne de Sanger permet de séquencer l'ADN.

La séquence d'ADN d'intérêt est amplifiée par PCR (*Polymerase Chain Reaction*), puis on la dénature. On la met en présence d'une ADN polymérase, des 4 types de nucléotides normaux, et de 4 types de

didésoxyribonucléotides : ddTTP (thymine), ddCTP (cytosine), ddGTP (guanine), ddATP (adénine)–marqués par 4 fluorochromes avec une couleur par base azotée.



Statistiquement, l'incorporation du ddNTP peut se faire à n'importe quelle position dans la chaîne, et bloque la poursuite de la réplication. On a donc dans la solution toutes les longueurs possibles de chaînes complémentaires, les fragments sont séparés par électrophorèse (Southern). La lecture des fluorochromes donne accès à la séquence complémentaire de celle recherchée. Cette technique n'était évidemment pas la seule, il y a aussi le séquençage haut débit avec la technique Illumina qui a été citée dans quelques copies.

Si 53% des candidats n'ont obtenu aucun point à cette question, ceux qui l'ont traité ont majoritairement récolté le maximum du barème.

Question 13b. L'arbre obtenu est non raciné car il est impossible de placer dessus une flèche de temps / pas d'ancêtre commun / pas d'extragroupe.

Question 13c. On observe que la phylogénie de la xylanase place *Phaedon cochleariae* très proche des gammaprotéobactéries. Au départ, l'ancêtre de *Phaedon* vivait sûrement en symbiose avec ces bactéries qui lui permettaient de digérer le bois, puis on peut supposer qu'il y a eu un transfert horizontal de gène de ces bactéries vers le coléoptère.

Question 14. Ce modèle ne tenant compte que des interactions proie-prédateur est le modèle de Lotka et Volterra. Il repose sur les hypothèses que seule la présence du prédateur fait varier les effectifs des proies et qu'il n'y a pas de phénomène de densité-dépendance chez la proie.

Limites : on suppose que l'appétit du prédateur est illimité, que les animaux atteignent instantanément l'âge reproducteur, rencontrent sans obstacle leur partenaire reproducteur même quand la population est très réduite.

Partie 3 La dégradation du bois mort par les micro-organismes

Les tissus végétaux

Question 15a. Le vert d'iode révèle les tissus lignifiés, comme le xylème, et le carmin aluné révèle les tissus non lignifiés et constitués essentiellement de cellulose, comme le phloème. 36% des candidats n'ont pas su répondre à cette question.

Question 15b. Très peu de candidats ont réussi à avoir tous les points (et 40% ont eu zéro) à cette question, avec beaucoup de confusions (ou de réponses au hasard)

- 1 = écorce (« phellogène + phelloderme+ suber » ou « assise subéro phellodermique »)
- 2 = parenchyme cortical
- 3 = sclérenchyme
- 4 = phloème (I, II ou I+II ou « liber » acceptés]

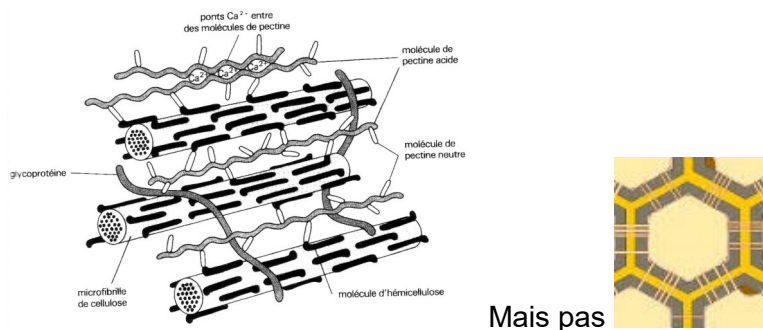
- 5 = cambium
- 6c = xylème II = bois (avec sous-légendes : 6b = vaisseaux de printemps et 6a d'été)
- 7 = Parenchyme médullaire

Question 15c. Les derniers vaisseaux de xylème II produits (les plus périphériques) sont de très gros diamètre donc le tronc a été coupé en début de printemps.

NB : quand la question demande si le tronc est coupé au printemps ou en hiver, on n'attend pas la réponse « en été ».

La dégradation du bois par les champignons

Question 16a. Le jury a été extrêmement surpris d'avoir peu de parois végétales correctement dessinées, avec des confusions entre les MEC animales et végétales. Si le schéma n'était pas très bien dessiné mais que le candidat avait précisé la présence de cellulose (fibrilles résistantes), hémicelluloses et pectines (maillage des différents éléments de la paroi + gel hydraté), HRGP (croissance de la paroi) [étaient acceptés aussi expansine ou extensine], une partie des points était attribuée. Le schéma demandé était plutôt comme celui ci-dessous :



Mais pas

Modèle tridimensionnel de la paroi pecto-cellulosique, d'après Lamport et Albersheim.

Question 16b. On observe que les pourritures blanches dégradent bien mieux la lignine que les pourritures brunes. Pour les polyosides, c'est l'inverse : les pourritures brunes dégradent mieux les hémicelluloses et la cellulose que les pourritures blanches. La lignine étant brune et la cellulose étant blanche et fibreuse, il est cohérent que les pourritures cellulolytiques laissent un résidu brun et les pourritures lignolytiques laissent un résidu blanc fibreux.

Question 17a. La courbe est une linéarisation de Lineweaver-Burk / double inverse. Elle s'obtient en linéarisant une cinétique michaelienne.

Question 17b. Cette représentation permet d'avoir accès à une droite et non une courbe hyperbolique, ce qui facilite la lecture des paramètres cinétiques (alors qu'avec une courbe, on ne sait jamais vraiment précisément à quel moment V_{max} est atteint). La laccase est une enzyme michaelienne.

On lit que $1/V_{max}$ vaut 0,01 donc V_{max} vaut $100 \mu\text{mol} \cdot \text{min}^{-1}$ et $-1/K_M$ vaut -10 donc K_M vaut 0,1mM.

Il y a eu des erreurs d'unités.

Question 17c. La courbe est en cloche autour d'une valeur optimale. Aux faibles températures, la vitesse d'agitation moléculaire est trop faible pour que l'enzyme et le substrat se rencontrent facilement. Dans de rares copies, il a été fait référence à la loi d'Arrhénius (cela n'était pas exigé mais nous avons eu le plaisir de retrouver cela). Aux fortes températures, certaines liaisons faibles de l'enzyme se brisent et celle-ci subit un début de dénaturation thermique.

Question 17d. La courbe est en cloche autour d'une valeur de pH optimale. En effet, le pH correspond à une certaine quantité de protons. Or, certains radicaux d'acides aminés présentent des propriétés acido-basiques. Un excès ou un défaut de protonation modifie les liaisons faibles (ex : liaisons ioniques) au sein de l'enzyme et la rend moins efficace.

La dégradation du bois par les bactéries

Question 18a. Les bactéries du genre *Rhizobium* sont capables de fixer le N_2 atmosphérique et de le réduire en azote organique / autotrophie à l'azote, utilisable pour la synthèse d'acides aminés par exemple. On les trouve notamment en grande quantité dans les nodosités racinaires des Fabacées.

Question 18b. Cette question a été peu traitée ou mal traitée (94% n'ont eu aucun point), les candidats nous parlant alors d'utilisation du bois en décomposition comme source d'azote. Or le bois mort contient essentiellement de la cellulose et de la lignine, deux macromolécules qui ne contiennent pas d'azote.

L'azote doit donc être un élément limitant pour les organismes qui se développent sur le bois mort.

La capacité à utiliser l'azote atmosphérique offre ainsi un avantage considérable.

Question 19. La notion de service écosystémique renvoie à la valeur (monétaire ou non) des écosystèmes, en ce sens que les écosystèmes fournissent à l'être humain des biens et services nécessaires à leur bien-être et à leur développement. Ici, il s'agit d'un service de soutien/support, puisque le bois mort participe à la conservation de la biodiversité forestière – en particulier les espèces saproxyliques.

ÉPREUVE ÉCRITE DE GÉOLOGIE

Le sujet nous propose de partir à la découverte d'une unité structurale majeure du territoire métropolitain français : le fossé Rhénan. Il fait partie d'un ensemble de rifts ouest-européens reconnus de la mer du Nord jusqu'en Méditerranée (Limagne d'Allier, Limagne de Loire, fossé d'Alès, ...). A partir de données géologiques variées (coupes à l'échelle crustale, analyse de séries sédimentaires, sismicité naturelle, déformation actuelle), on arrive à la réalisation d'une synthèse de fonctionnement d'un système géothermique en contexte extensif.

1. STRUCTURE DU FOSSE RHENAN

1.1. Une coupe à l'échelle crustale, d'orientation WNW-ESE, est à légender. Elle expose un fossé d'effondrement avec des failles bordières normales à géométrie listrique. La faille principale s'enracine et s'horizontalise sur l'interface fragile-ductile. Les failles impliquent le développement de blocs basculés. La croûte supérieure présente un comportement fragile, la croûte inférieure un comportement ductile. La croûte inférieure est souvent litée du fait de son comportement (zone de cisaillement). La zone de transition entre ces deux croûtes correspond à la discontinuité de Conrad. Plus bas, vers 30 km de profondeur, se trouve le Moho qui marque la transition entre la croûte et le manteau supérieur. La figure montre aussi les séries sédimentaires mésozoïques et cénozoïques. De plus, la coupe était à orienter.

La structure profonde n'est, en général, pas acquise, à savoir la succession du haut vers le bas de la croûte continentale supérieure, puis inférieure avant d'atteindre le manteau supérieur. A la place de la croûte, on a parfois des noms d'étages. La discontinuité de Conrad est rarement signalée, de même que le passage fragile-ductile matérialisé par des failles plates dans le prolongement des failles listriques. Le terme 'cisaillement' plat dans la croûte inférieure ductile n'est quasi jamais signalé. Il faut déjà dire que l'expression 'faille listrique' est rarement mentionnée que ce soit sur la figure 2 ou la figure 4. La présence de faille est généralement reconnue mais pas toujours assortie des qualificatifs 'normale' et listrique. Assez souvent, la remontée du Moho est signalée, avec parfois certaines de ses conséquences, à savoir la fusion partielle du manteau. L'orientation de la coupe n'est pas toujours donnée. Il est parfois indiqué, à la place des points cardinaux, 'Vosges' et 'Forêt Noire', ou encore 'profondeur' et 'température'. Des annotations ont été apportées, parfois incomplètes, comme dans le cas des sédiments recouvrant le socle et liés au fossé d'effondrement, l'âge n'étant pas toujours précisé.

1.2. Un réflecteur sismique correspond à l'interface entre deux milieux dans lesquels les vitesses de propagation des ondes sont différentes. Les trois lois qui régissent la propagation des ondes sismiques (lois de Snell-Descartes) sont : (i) les rayons réfléchi et réfracté appartiennent au plan d'incidence ; (ii) l'angle du rayon réfléchi est égal à celui du rayon incident, avec $i_1 = i'_1$; et (iii) la loi de la réfraction, avec $\sin i_1 / V_1 = \sin i_2 / V_2$.

Une réponse est donnée dans presque toutes les copies. Cependant, la définition du réflecteur n'est pas toujours explicite ou complète. Si on signale qu'au niveau du réflecteur les ondes sont réfléchies et/ou réfractées, on oublie de signaler que ce plan est au contact de deux couches de roches qui n'ont pas les mêmes propriétés. Les variations de l'indice 'n', en passant d'une couche à l'autre, induisent, de ce fait, des variations de vitesse des ondes qui les pénètrent. En l'absence de définition claire du réflecteur sismique, il y a parfois de trop longs discours de géophysique, sur les propriétés des ondes P et S, et sur la structure du globe. Les trois lois sont dans l'ensemble bien connues. Toutefois il n'est pas rare d'oublier que les rayons réfléchis et réfractés appartiennent au plan d'incidence.

1.3. Le coefficient de réflexion est généralement très faible en conditions naturelles car les différences de densité des roches sont souvent minimales et augmentent progressivement avec la profondeur. Si ce coefficient était fort voire très fort, il y aurait très peu de pénétration des ondes sismiques dans le milieu et donc une imagerie sismique serait impossible à obtenir. Pour information, l'équation de ce coefficient est : $R = \rho_2 V_2 - \rho_1 V_1 / \rho_2 V_2 + \rho_1 V_1$. Il n'était absolument pas attendu de fournir l'équation de ce coefficient, mais elle est facile à appréhender avec un minimum de bon sens.

La plupart des copies donnent une réponse qui indique un coefficient de réflexion fort. L'argument, c'est de dire, que plus le coefficient est fort, plus les signaux reçus seront clairs. Les plus mauvaises copies donnent parfois la bonne réponse, à savoir : un coefficient de réflexion faible, et son explication quant à

la présence d'un signal et sa visibilité. Les bonnes réponses ne donnent pas toujours une raison valable pour expliquer leur choix.

1.4. Un profil sismique, caractéristique des bordures de fossé d'effondrement, est à légender. A l'Ouest, la faille normale majeure, à géométrie listrique, marque la transition entre l'épaule de la bordure occidentale du fossé et le bassin sédimentaire, à l'Est. Dans le bassin, on retrouve : (i) des séries anté-rift (ou anté-extension), isopaques ; (ii) des séries syn-rift (ou syn-extension), disposées en éventail ; (iii) des séries post-rift (ou post-extension), en discordance sur les précédentes. La géométrie d'ensemble figure un bloc basculé (demi-graben) avec une sédimentation syn-tectonique en éventail.

Sur la figure à rendre, l'orientation Ouest-Est n'était volontairement pas reportée ; certains candidats l'ont vu et ont complété. De plus, certains candidats ont noté que l'échelle verticale était en temps double et qu'une seconde "temps double" correspondait à une épaisseur sédimentaire d'environ 1500 à 2000 m.

Dans l'ensemble, les résultats sont médiocres. Les élèves sont très perplexes devant les lignes qu'ils observent et dont ils essaient de tracer des contours, rarement sur la totalité de leur extension. Les surlignages des plans ou zones remarquables sont souvent absents, rarement complets ; les limites en sont souvent fausses, largement décalées. La faille normale bordière est rarement à sa place. Elle est souvent déportée vers la droite dans les sédiments ou vers la gauche dans le socle, et, le plus souvent, elle vient recouper les sédiments dit post-rifts. Ou alors, elle vient se mettre à l'horizontale sur le horst, s'immisçant entre les sédiments pré-rifts et post-rifts. Vers le bas, la faille a du mal à s'incurver pour devenir listrique, ce qui est peu étonnant, compte tenu des résultats sur la figure 2, où ce type de faille est rarement signalé. Si certains, dans les commentaires, ont bien reconnu la trilogie pré-, syn- et post-rift, cela ne s'est pas souvent correctement traduit sur le schéma. En particulier, le niveau de sédiment pré-rift n'est que très rarement mentionné. De même, la présence d'un bloc basculé n'est pas souvent indiquée. Dans quelques cas, c'est la subsidence qui serait responsable de l'empilement et de la distribution des couches sédimentaires en éventail, ainsi que celle des autres couches. Quant aux sédiments en éventail, ils se prolongent souvent vers le haut, en position post-rift. Les commentaires ne justifient pas le tracé des plans. Ils sont assez limités, pauvres et renferment beaucoup d'erreurs.

1.5. Pour obtenir un bloc basculé avec une sédimentation en éventail, il faut : (i) un contexte extensif ; (ii) une faille listrique (sans faille listrique, pas de bloc basculé) ; et, (iii) une sédimentation syn-tectonique avec une déformation incrémentale. Plusieurs centaines ou milliers d'incrémentes de déformation (rejets successifs de quelques centimètres à dizaines de centimètres par séisme) sur la faille majeure sont nécessaires pour aboutir à un rejet cumulé kilométrique, pendant plusieurs millions d'années, avec une sédimentation contemporaine de cette déformation.

Les réponses sont très loin d'être complètes car tous les objets n'ont pas été reconnus sur les figures 2 et 4. Si, dans l'ensemble, on distingue volontiers une structure de rift, donc un contexte extensif, le signalement de blocs basculés, ou la nécessité d'avoir des failles listriques pour les créer, sont rarement soulignés. Quant au couplage temporel du dépôt des sédiments avec la tectonique, il n'est pas reconnu. Il arrive que l'on parle de sédiments, mais c'est souvent lié à l'existence d'un bassin subsident, en partie associé à la remontée du Moho. En conséquence, il semble que l'analyse des mécanismes responsables de la formation d'un rift avec la présence de blocs basculés, soit très superficielle, incomplète et/ou mal assimilée.

1.6. La photographie à compléter et légender correspond au front de taille de l'ancienne carrière de Freyming-Merlebach (Moselle) montrant une partie de la série sédimentaire du Grès vosgien (Trias inférieur). On observe des failles qui affectent les terrains du Trias. En rejet apparent, ces failles sont principalement normales. Certaines sont pentées vers l'ESE, d'autres vers l'WNW ; elles sont donc conjuguées. Compte-tenu de l'orientation de l'affleurement, si on considère que ces failles normales sont perpendiculaires à celui-ci, elles ont pu être actives lors d'un épisode d'extension WNW-ESE. Ceci est en adéquation totale avec la direction d'extension régionale associée à l'ouverture du fossé Rhéan. Toutefois, il n'est pas exclu que certaines de ces failles soient plus anciennes, par exemple contemporaines de l'extension jurassique, et réactivées durant le Cénozoïque.

Il manque souvent sur le schéma, l'extension des couches sédimentaires repérées à l'est de la coupe, ainsi que les failles les plus à l'est ou à l'ouest. Toutefois, il est souvent indiqué des failles normales, en particulier celles qui dessinent un jeu de failles conjuguées, mais on oublie de préciser qu'il s'agit de failles conjuguées, ainsi que le mouvement qui les affecte, bien que les horizons sédimentaires aient été reconnus de part et d'autre des deux failles. L'extension des failles n'est pas toujours reportée jusqu'à la base du document. Certains reconnaissent des failles inverses à la place des failles normales : il s'agit

parfois d'une inversion des termes alors que la copie montre qu'il s'agissait bien d'un domaine en extension. Beaucoup de copies s'accordent pour dire que la structure observée sur la figure 5 est en adéquation avec la tectonique régionale. Cependant les arguments pour conforter l'assertion sont généralement absents. Rares sont les copies qui utilisent la figure 4, comme recommandé dans l'énoncé de la question, ou encore la carte de la figure 1 et la coupe A-A' de la figure 2, pour montrer la similitude du jeu des failles et leur orientation voisine.

2. STRATIGRAPHIE ET SEDIMENTATION REGIONALE

2.1. Les couches sédimentaires se déposent les unes au-dessus des autres, en concordance stratigraphique. Cependant, dans certains cas, la continuité stratigraphique peut être perturbée ; les couches sont alors dites discordantes. On peut distinguer deux grands types de discordance. La discordance angulaire, où une surface d'érosion sépare une série basculée et/ou plissée puis érodée, d'une série non plissée car déposée postérieurement. La discordance cartographique montre un dépôt horizontal interrompu et/ou érodé, au-dessus duquel survient une nouvelle phase de sédimentation. Dans ce cas, les deux termes superposés sont horizontaux et la surface de contact est plane ou irrégulière.

La quasi-totalité des copies signalent la présence d'un écart de temps entre les deux ensembles séparés par la discordance. Beaucoup de copies oublient de mentionner que la formation la plus ancienne a été plissée ou basculée et que le plan de dépôt de la formation sédimentaire récente forme un angle avec la structure interne de la formation ancienne (plan stratigraphique ou tout autre plan structural). Ainsi la discordance est angulaire, ce qui rend compte de la présence de points triples sur une carte géologique. Plusieurs copies signalent l'existence de ce point triple sans indiquer l'écart angulaire entre les plans remarquables des deux formations séparées par la discordance. On confond largement discordance et lacune. Même si le mot lacune n'est pas écrit, la définition qui est donnée correspond parfois à celle d'une lacune sédimentaire. Pour le géologue, c'est un manque d'accord entre les strates successives, qui traduit l'existence d'un mouvement ayant provoqué cette disharmonie entre deux strates. Bizarrement, aucun schéma (même s'il n'était pas demandé) ne vient étayer la notion, ce qui aurait permis de vérifier la bonne image qu'en a l'élève.

2.2. La période absente se rapporte à une discordance majeure dans l'enregistrement sédimentaire du fossé Rhénan, et correspond au Crétacé. Le Crétacé a pu ne pas être déposé (émersion totale pendant une centaine de million d'années à la fin du Jurassique) ou être totalement érodé avant les dépôts éocènes. Ici, les candidats n'ont pas forcément les arguments pour étayer l'une ou l'autre des hypothèses mais la première proposition est actuellement celle qui est retenue.

La plupart des copies donnent la bonne réponse avec l'absence du Crétacé. L'explication donnée est le plus souvent correcte avec les deux possibilités : absence de sédimentation et/ou érosion.

2.3. Outre la discordance majeure (question précédente), on demande de localiser les autres discordances identifiables sur la colonne stratigraphique, et d'expliquer leur origine. On peut ainsi identifier deux autres discordances : (i) le contact socle granitique - Permien, liée à l'orogénèse hercynienne suivie de l'érosion du massif avant dépôt du Permien, et (ii) le contact Oligocène - Pliocène, avec lacune du Miocène, soit par absence de dépôt et/ou érosion.

La réponse est souvent incomplète ou fautive. La lacune du Miocène est le plus souvent mentionnée, avec des explications semblables à celle du Crétacé. Moins fréquent est le signalement de la discordance du Permien ou du Trias sur le socle. Quand c'est le cas, l'explication donnée est peu satisfaisante car la présence de l'orogénèse hercynienne est exceptionnellement indiquée. Par contre, il est relevé à plusieurs reprises, une discordance entre Trias et Permien, ce qui n'est pas totalement faux, mais pas évident à partir de la colonne stratigraphique proposée. Par ailleurs, beaucoup de copies signalent l'absence des différentes périodes du Paléozoïque, à savoir le Cambrien, l'Ordovicien, le Silurien, le Dévonien et le Carbonifère, indiquant par-là que les élèves ont été soucieux de retenir leur succession stratigraphique. Et là encore, l'arrêt de la sédimentation est invoqué pour ces discordances, mais de l'orogénèse hercynienne, il n'en est que très rarement question. C'est pourtant un épisode géologique majeur pour la structuration du sous-sol en France.

2.4. La série du Trias inférieur présente des strates à l'intérieur desquelles s'observent des lamines obliques. Les laminations obliques sont des structures internes aux dépôts sédimentaires. Elles sont obliques par rapport au pendage moyen de la surface de stratification. Elles sont le résultat du transport

et de la sédimentation par traction suivant un courant de type directionnel. Des morphologies de type rides asymétriques sont générées, la lamination oblique interne résultant de la construction et de la migration de la structure dans le sens du courant. Elles peuvent être distinguées d'après des caractéristiques géométriques : les unités dont les surfaces d'intersection sont planes, définissent des ensembles de forme tabulaire, alors que celles dont les surfaces limites sont incurvées définissent des formes tangentielles à arquées. C'est ce dernier cas qui est visible sur l'affleurement étudié.

La réponse est souvent fautive ou très pauvre même si les bonnes copies reconnaissent qu'il s'agit d'abord d'un objet sédimentaire. Ce n'est pas anodin. En effet, de nombreuses copies ignorent la signification des lamines et reportent des causes liées à la déformation ou au métamorphisme, avec la trace de plan de foliation ou de schistosité. L'origine des lamines peut être aussi attribuée à la réorganisation de la matière, les minéraux s'étant regroupés durant la compaction ou encore lors d'une compression postérieure au Trias, voire encore lors de la circulation de fluides sous l'action de contraintes verticales. Très souvent les laminations sont associées au métamorphisme ; sans doute il y a confusion avec la linéation. Les lamines se formeraient aussi lors de l'altération par hydrolyse des minéraux. La liste des causes évoquant un processus géologique quelconque, non avéré dans le contexte rhénan, est très longue. On parle aussi de recristallisation de minéraux siliceux pendant la diagenèse ou après. Quand, enfin, on s'approche du rôle d'un courant d'eau opérant lors du dépôt des particules, le mécanisme est rarement précis ou correctement décrit, que ce soit dans un fleuve, ou sur le littoral marin. On est alors encore très loin d'évoquer la distribution des lamines et leur morphologie. Peut-être que la demande d'un schéma dans la formulation de la question, aurait permis d'échapper à d'inutiles digressions. Même si les croquis peuvent être redoutables pour le correcteur, ils auraient permis d'alléger le discours. Les meilleurs candidats proposent un schéma explicatif, ce qui est clairement un plus.

2.5. Après l'analyse à l'échelle de l'affleurement, on complète les informations des séries du Trias inférieur par des données à l'échelle microscopique. La lame mince montre un cortège de minéraux constitué de quartz, quartz polycristallins et de feldspaths. Ces minéraux sont jointifs. A certains endroits de la lame, on peut noter le développement d'un ciment ferrugineux formant un liseré rougeâtre plus ou moins continu autour des minéraux. Sur le plan morphoscopique, les quartz sont sub-anguleux à sub-émoussés. Ils se présentent sous la forme de cristaux simples (monocristallins) ou sont constitués de plusieurs cristaux d'orientation différente ; on parle alors de quartz composites ou polycristallins. Les limites entre les grains sont mutuellement engrenées. La roche est cohérente, les constituants étant intimement soudés les uns aux autres. En termes de granulométrie, on peut dire que le sédiment est relativement bien classé. En effet, on ne voit pas de variations importantes dans la taille des grains. Compte-tenu de l'échelle, les éléments présentent une taille inférieure ou égale à 500 microns, soit 0,5 mm. On notera toutefois, des grains de quartz de plus petite taille en association avec la cimentation ferrugineuse. En termes de composition, à côté du quartz majoritaire, on note la présence de feldspaths, de taille sensiblement identique à celle des quartz, mais dont la proportion ne dépasse pas 15 à 20 % de la surface de la lame mince. L'allure des feldspaths est plus terne, présente un aspect trouble et une surface piquetée, dû à l'altération. Il s'agit donc d'une roche détritique terrigène (ou silicoclastique), c'est-à-dire constituée de fragments de roches pré-existantes. Compte-tenu de sa granulométrie moyenne et de sa composition minéralogique, la roche peut être qualifiée de grès feldspathique voire de sub-arkose (terme non exigible) à ciment ferrugineux. La roche est issue de produits d'altération d'une (ou plusieurs) roche-mère de composition granitique (à quartz et feldspaths potassiques). L'altération est relativement modérée car on retrouve des feldspaths ; l'hydrolyse n'est pas totale.

La description est généralement courte et souvent formulée dans une seule phrase qui liste les éléments donnés en figure 7b. La morphologie des grains de quartz est quelquefois signalée et l'on passe très vite, dans de nombreux cas, à l'origine de la roche qui, avec ses principaux constituants, quartz et feldspaths, pourraient provenir de l'altération d'une roche granitique. Dans de nombreuses copies, le fait d'avoir quartz et feldspaths, et une texture dite grenue, conduit, sans autre forme de procès, à dénommer directement l'échantillon, un granite. De très rares copies ont même tenté d'expliquer pourquoi un granite était présent dans les sédiments du Trias. Ces roches seraient alors issues d'un magmatisme lié au rifting. Plus étonnant, la nature des minéraux et leur relation avec le ciment. Un ciment dit plus ou moins coalescent, avec la présence de grains non jointifs, incite à ce que la texture soit définie comme microlithique, et que la roche soit ainsi désignée comme magmatique, et ceci dans de nombreuses copies. La détermination du caractère magmatique de l'échantillon est relativement fréquente dans les copies, avec la reconnaissance soit d'un granite ou soit d'une dacite en raison du pôle dit acide de l'échantillon en question, voire encore "d'une quartzite" (on rappelle au passage que quartzite est un nom masculin) pour les tenants d'une hypothèse métamorphique.

2.6. L'affleurement du Trias moyen montre une formation très bien stratifiée. On distingue facilement la succession de couches limitées par des surfaces relativement parallèles et subhorizontales. A l'échelle de la photographie, les strates présentent une géométrie tabulaire. Dans la partie inférieure, les bancs calcaires massifs sont dominants par opposition au sommet où les argiles sont prépondérantes. On note ainsi une dérive des calcaires vers une alternance calcaires-argiles ; on enregistre donc une augmentation de l'argilosité au cours du temps. On rappelle qu'une strate est une unité de sédimentation comprise entre deux surfaces limites.

La description se dégrade par rapport à la question précédente, avec l'analyse de l'affleurement. En résumé, on a souvent l'impression que les élèves n'ont jamais vu ou observé un affleurement, quel qu'il soit, sur le terrain ou même en photographie. Le plan de stratification est rarement signalé. Trop peu de copies indiquent la présence de strates, caractéristique d'une formation sédimentaire. On reconnaît dans ce plan horizontal, des diaclases, des zones d'altération privilégiées ou encore une foliation. Enfin, la présence d'éboulis est souvent évoquée et, de plus, cet amas est considéré parfois comme faisant partie originellement de la formation du Trias moyen.

2.7. Un taxon fossile (genre ou espèce) ne revêt d'intérêt stratigraphique que s'il caractérise un intervalle de temps relativement restreint et permet, pour ce même temps, d'établir des corrélations à distance. Cela suppose donc que ce taxon offre : (i) une extension réduite dans le temps, c'est-à-dire une évolution rapide de la lignée à laquelle il appartient, (ii) une vaste répartition géographique, ubiquité qui suppose une certaine indépendance à l'égard du milieu de sédimentation (en opposition aux fossiles de faciès), et (iii) une abondance suffisante des représentants du taxon considéré dans les sédiments.

Cette question a eu beaucoup de succès quant à la qualité des réponses. La dénomination "fossile stratigraphique" est bien connue dans l'ensemble, ainsi que la plupart des critères pour définir ce qu'est un bon fossile stratigraphique. En ce qui concerne les critères, il en est souvent oublié un sur les trois : il s'agit de l'abondance du fossile. On lui préfère parfois, de bonnes conditions de fossilisation pour devenir un fossile stratigraphique, et la facilité à le reconnaître.

2.8. Le fossile se présente sous la forme d'une coquille planispiralée et cloisonnée. Le fait d'avoir une coquille cloisonnée implique que l'organisme appartient à la classe des Céphalopodes (embranchement des Mollusques). De plus, un détail de la coquille montre le dessin de la ligne de suture. Cette ligne de suture correspond à l'insertion de la cloison sur la coquille. Cette ligne est particulièrement importante dans l'étude des Ammonoïdes. On peut noter : (i) que la suture est souvent visible sur les fossiles par suite de l'usure de la coquille, (ii) qu'elle présente des sinuosités dont les parties convexes vers l'avant (vers la loge d'habitation, habituellement indiquée par une flèche) sont appelés "selles" et les parties convexes vers l'arrière dénommées "lobes", et (iii) qu'il est possible de distinguer trois types fondamentaux de suture chez les Ammonoïdes, avec le type "goniatite" (selles et lobes simples), le type "cératite" (selles simples et lobes dentés) et les "ammonites" (selles et lobes dentés). Ainsi, la coquille présentée ici correspond à un Ammonoïde. En effet, compte-tenu de la géométrie de la ligne de suture présentant une forme caractéristique en "oméga" avec des lobes dentés et des selles lisses, l'organisme correspond à une cératite. Ici, on attendait *a minima*, le terme céphalopode ou Ammonoïde. Par contre, le terme "ammonite" est faux. Au passage, on précise que les cératites sont de bons fossiles stratigraphiques pour dater les séries du Trias moyen.

Le terme "ammonoïde" a rarement été écrit. Il est évoqué des termes comme ammonitidés, ammoidés, ammonitoïdes, etc. Plus simplement, on rattache ce fossile au groupe des "ammonites" ou aux ammonites s.l. Les plus téméraires indiquent la présence d'un mollusque, et d'autres encore n'importe quel nom de fossile, dont les gastéropodes, les trilobites, les nummulites. De très rares copies ont reporté le nom de "cératite", ce qui a valu un bonus à ces élèves.

2.9. Le faciès macroscopique du Jurassique montre une suite de couches constituées essentiellement par des grains de taille millimétrique, de forme plutôt sphérique. La lame mince permet d'accéder à des informations géométriques complémentaires. Les grains présentent une section circulaire, plus ou moins régulière, à elliptique. En termes de structuration interne, on distingue très nettement deux parties : un "noyau" et une enveloppe d'épaisseur variable caractérisée par une structure concentrique plus ou moins développée. Le noyau central occupe une proportion variable de l'élément figuré. Dans certains cas, on a un gros noyau et seulement quelques couches autour, alors que d'autres montrent un nombre de couches plus important. Il est ici difficile de déterminer la nature de cette partie centrale. Compte-tenu de la teinte de ces noyaux, ils sont vraisemblablement de nature calcaire (calcaire cryptocristallin, bioclastes très

usés, ...). De plus, aux couches concentriques se superpose une structure radiaire sous la forme de prismes d'allure fibreuse, orientés perpendiculairement aux couches concentriques. Ces prismes très fins se marquent par une alternance de couleur claire et plus sombre. La structure concentrique est ainsi formée d'une succession de feuillets extrêmement fins dont les limites correspondent à des interruptions de nourrissage. Enfin, compte-tenu des caractéristiques précédemment évoquées et de l'échelle des éléments (au maximum 0,5 mm), on peut conclure qu'il s'agit d'oolithes. Les oolithes sont unies par une phase de liaison d'aspect translucide et de nature calcitique. Là où il y a le moins d'oolithes, on voit que le liant est constitué de tout un ensemble de petits cristaux hyalins (dont la taille dépasse 0,005 mm) accolés les uns aux autres. Ceci permet de conclure que le liant est un ciment sparitique. La structure oolithique est un caractère primaire acquis par précipitation du calcaire en milieu marin, peu profond et agité, via une médiation bactérienne. La précipitation de CaCO_3 est en effet favorisée par la consommation du CO_2 par les cyanobactéries. Le rôle de l'agitation de l'eau (par les courants de marée et/ou de houle) est de maintenir en suspension les particules (futurs nucléus) autour desquels vont précipiter progressivement les couches concentriques formant le cortex. Au-delà d'une certaine masse spécifique, des variations de vitesse des courants, de la plus ou moins grande sursaturation du milieu en carbonate de calcium, les oolithes ainsi formées vont sédimenter et s'accumuler sur le fond marin. Les vides interstitiels (pores) entre les oolithes seront comblés ultérieurement, durant la diagenèse, par le ciment sparitique. Compte-tenu de l'ensemble des caractéristiques précédentes, la roche est un calcaire oolithique. Suivant la classification de Dunham, les oolithes étant jointives et unies par un ciment sparitique, il s'agit d'un grainstone.

La description n'est pas plus développée que pour les objets précédents et toujours aussi pauvre ou fantaisiste. De très nombreuses copies témoignent que le terme 'oolithe' n'est pas connu, bien que certaines copies indiquent la présence d'un calcaire oolithique. Les copies qui signalent le terme 'oolithe' montrent que la formation des oolithes est mal connue, ou mal comprise. Il est arrivé que les deux termes 'oolithe' et 'calcaire oolithique' soit reporté sans aucune description ou indication sur leur formation. Le plus souvent, quand des éléments sphériques sont reconnus, les élèves indiquent la présence de nummulites, ou des coccolithophoridés, plutôt que d'oolithes. Évidemment, l'interprétation du nom de la roche a été faussée. Les copies reportent une origine bioclastique, plutôt que biochimique. On reconnaît aussi que la roche est formée de fragments de coquilles, d'où le nom de calcaire coquillier. Pour ceux qui ont bien reconnu des oolithes, la description est incomplète et le mode de formation l'est davantage. On reconnaît parfois une croissance par dépôt de calcite, mais les conditions de ce dépôt ne sont pas indiquées, de même que la nature et le rôle du noyau ne sont pas signalés, ou peu discutés. L'agitation de l'eau est peu évoquée ainsi que son rôle dans la formation des oolithes et leur dépôt. Enfin, il en va de même pour les conditions de formation du ciment. Le dépôt de calcite est souvent remplacé par le dépôt de couches de calcaire. Calcite et calcaire semblent parfois être synonymes. La roche est le plus souvent appelée 'calcaire oolithique', plutôt que 'grainstone' à oolithes.

2.10. La roche est constituée de galets et de blocs de taille et de nature variables. Il n'y a pas de tri remarquable en fonction de la taille. La roche est mal classée, hétérométrique ; différentes tailles de clastes coexistent. Il s'agit d'une roche silicoclastique (ou détritique terrigène) ; de la classe granulométrique des rudites. Les clastes étant émoussés, on a un conglomérat de type poudingue.

La description de la roche est particulièrement pauvre. Il est rarement reconnu des galets. Fréquemment, on croit comprendre, à la lecture de la réponse, que certains élèves ont pris le galet rouge cassé comme l'objet à décrire et non l'ensemble de la photographie, qui n'est qu'un détail de l'affleurement. Évidemment, cet objet a conduit à la description d'une roche aphyrique avec des digressions sur la couleur de la roche et son absence de minéraux. Plusieurs copies ont ainsi signalé la présence de grès ou de rhyolite, parce que la roche est rouge. Pour ceux qui ont considéré l'affleurement dans son ensemble, l'absence de tri des galets est peu signalée et encore moins le terme 'hétérométrique', ainsi que celui de rudites. On reconnaît volontiers la présence d'un conglomérat sans que la description puisse évoquer ou conduire le lecteur à cette bonne réponse. En effet, l'absence de terme adéquat pour définir les différentes composantes observées, l'absence de rigueur dans l'observation et le report des objets étudiés ne permettent pas de comprendre de quel objet il peut s'agir. Plusieurs copies signalent la présence de calcaire sans faire le lien avec les formations anté-cénozoïques.

2.11. A l'échelle kilométrique, on rencontre différents types de roches assurant le remplissage du bassin. On observe une répartition granodécroissante, d'ouest en est, des séries avec successivement des roches silicoclastiques (conglomérats, grès et argilites) associées à des évaporites au centre du fossé.

L'altération, suivie par l'érosion, fournit un matériel hétérogène en composition et en taille. Ces objets de toutes tailles sont susceptibles d'être mobilisés, transportés avant de sédimenter. L'agent principal de transport est l'eau. La charge transportée dépend de plusieurs facteurs comme la taille et la densité des éléments transportés, la vitesse et la densité de l'eau, sa viscosité, etc... L'eau transporte en suspension ou déplace par traction et/ou saltation les différentes particules disponibles. Le transport, d'abord turbulent, entraîne une diminution progressive de la taille des grains. Il y a donc un classement des particules selon leur taille. Le courant, d'abord fort, permet de mobiliser et de transporter des éléments grossiers. La capacité de transport diminue avec la décélération progressive du courant. Les particules les plus grossières se déposeront en amont et on pourra assister à un tri granulométrique de l'amont vers l'aval. L'expression "formation détritique" est plus souvent utilisée que celle de famille de roches silicoclastiques. L'adjectif "terrigène" n'est que rarement utilisé pour dénommer ces roches détritiques. En résumé, la réponse à cette question n'est pas satisfaisante dans l'ensemble. Certains parlent même de famille de roches calcaires, ou reprennent chacun des exemples décrits précédemment pour indiquer à quelle famille de roches ils appartiennent. L'ensemble des formations n'est pas alors considéré.

2.12. Le schéma illustre une variation latérale de faciès depuis des conglomérats sur la bordure du fossé vers des évaporites au centre du bassin. On observe une évolution avec des conglomérats, puis des grès, puis des argilites à évaporites. Cette répartition est liée à l'érosion de l'épaule ouest du fossé. Les faciès grossiers sont localisés au pied de la faille et la granulométrie décroît progressivement vers le centre du bassin. On constate donc une évolution de la granulométrie des différentes roches détritiques terrigènes. Cette suite de faciès enregistre une grano-décroissance.

Attention, le terme de granoclassement est ici impropre, car celui-ci se définit à l'échelle d'une strate. Ici, nous sommes à l'échelle du remplissage du bassin. Il est par contre possible qu'il y ait des granoclassements dans les couches conglomératiques et gréseuses mais nous n'avons pas d'éléments permettant de les mettre en évidence à partir du schéma proposé.

Cette question a donné lieu à des réponses plus ou moins extensives agrémentées parfois de nombreux croquis quant au modèle de dépôt. La description de la figure 9 reporte bien l'existence d'un tri des matières transportées, le plus souvent sous l'action d'un courant qui, selon les copies, se situe soit en domaine océanique, soit, en domaine purement continental, au sein de rivières ayant leur source dans le massif vosgien. Des incompréhensions sont manifestes sur les conditions d'altération des roches et de transport des éléments ainsi que sur le milieu environnant. La répartition des roches, liée à la gravité, au courant et à la taille des particules, est généralement comprise même si la terminologie utilisée pour la caractériser n'est pas toujours correcte. Ainsi le terme attendu lors de la description de la figure, à savoir "grano-décroissance" n'est que très rarement signalé. On utilise plutôt granoclassement, voire granoclassement latéral, ce qui est impropre. De plus, l'expression "variation latérale de faciès" est quasiment absente ; ce qui laisse à penser que ce terme est inconnu ou que sa signification n'est peut-être pas si bien comprise que cela. Au final, c'est une question qui montre souvent de bonnes intuitions mais aussi de la peine à expliquer avec les mots justes.

2.13. L'évaporation d'une colonne d'eau de mer provoque une succession de précipités. Tout d'abord, il faut considérablement évaporer l'eau de mer avant d'obtenir un premier précipité. Ensuite, les minéraux vont cristalliser dans un ordre établi, avec tout d'abord les carbonates, puis les sulfates, et enfin les chlorures. Le volume des précipités de chaque espèce minérale montre que ce ne sont pas les plus abondants en solution dans l'eau qui précipitent en premier, mais les plus insolubles. Les évaporites précipitent donc en fonction de leur pouvoir de solubilité et non de leur abondance dans l'eau.

Cette question, et la suivante, n'ont pas été traitées dans de nombreuses copies. Pour les autres copies, cette question de cours qui fait appel à de nombreuses notions, y compris en chimie des solutions, a été mal traitée. La succession des familles de roches ou de minéraux évaporitiques est peu connue. Il manque souvent un (les carbonates) ou plusieurs termes (carbonates, sulfates) et l'ordre de dépôt n'est pas respecté, même lorsque deux termes sont seulement indiqués. Il n'est pas rare d'avoir une liste dans l'ordre inverse du dépôt, avec un schéma, représentant le dépôt des couches d'évaporites, qui sont aussi inversées. On peut également voir, et ce n'est pas rare, le gypse intercalé entre halite et sylvite, et la sylvite déposée en premier. Quant au volume d'eau de mer évaporé afin que les carbonates se déposent, la plupart des copies ne le mentionnent pas. Si les élèves savent que les évaporites existent, l'objet est peu ou mal connu, ainsi que le processus pour y arriver. Il va alors de soi que les proportions de sédiments déposés ainsi que le volume d'eau de mer évaporé n'est pas connu dans quasiment toutes les copies, même de façon approximative. Dans le domaine de la chimie, les connaissances sont rudimentaires : on ignore parfois que sylvite et halite sont des chlorures. Souvent, il est écrit que le potassium précipite avant

le sodium. Enfin, la solubilité des sels n'est quasiment pas évoquée, ce qui indique, une fois encore, que les conditions de dépôt sont peu ou pas connues.

2.14. Dans la série sédimentaire de l'Oligocène du fossé Rhéan, les évaporites sont majoritairement présentes sous la forme de chlorures (halite et sylvite). Il y a quasi-absence des sulfates. Ainsi le modèle classique d'ordre de précipitation des évaporites (cf. question 2.13) admet des variations. Les évaporites précipitent en fonction de leur pouvoir de solubilité et non de leur concentration. Les sulfates moins solubles que la halite précipitent en premier. Les chlorures, beaucoup plus solubles, précipitent après les sulfates lorsque le niveau de l'eau baisse considérablement. Ainsi, si l'évaporation est très rapide, les chlorures pourront précipiter rapidement. Pour information, plusieurs facteurs peuvent être évoqués : (i) le contexte tectonique. En effet, il conditionne les variations de la subsidence. Les chlorures se déposent généralement dans les zones les plus subsidentes. Ici, cela correspond à la partie centrale du fossé Rhéan ; (ii) la chimie des eaux. Elle peut être variable suivant le contexte hydrologique du bassin. Pour le fossé Rhéan, on peut donc admettre des eaux à dominante chlorurée ; (iii) le climat. Dans le bassin de Mulhouse, les dépôts potassiques (sylvite) sont localisés dans la partie supérieure des niveaux salifères, et présentent une cyclicité régulière pilotée par les variations des paramètres de l'orbite terrestre, principalement la précession et l'obliquité. A partir des données disponibles dans le sujet, les facteurs envisageables sont le taux d'évaporation, la subsidence et/ou la chimie des eaux.

Quand une réponse à la question précédente a été donnée, elle n'est pas toujours suivie de réponse à cette question. Il faut reconnaître que la réponse n'était pas facile à donner : où sont les roches qui auraient dû précipiter avant les chlorures ? L'absence de sulfates dans la pile évaporitique du Tertiaire n'a pas permis d'imaginer ou de reconnaître qu'il pouvait y avoir des variations dans la proportion des constituants de la pile évaporitique. En conséquence, il n'y a pas de réponse à cette question ou des réponses très variées, mais peu plausibles.

3. SISMICITE NATURELLE ET DEFORMATION ACTUELLE

3.1. A partir de schémas simples, on demande d'expliquer comment est construit un mécanisme au foyer à la suite d'un séisme. Un premier schéma peut montrer la relation entre l'épicentre et le foyer du séisme, sa sphère focale, et le secteur dans lequel le premier mouvement à la station est en compression, et le secteur dans lequel le premier mouvement à la station est en dilatation. De plus, il faut figurer un sismogramme avec explication du premier ressaut en "up" ou "down" de l'onde P. Ensuite, se souvenir qu'un mécanisme au foyer est une représentation géométrique donnant les caractéristiques de la faille dont la rupture est à l'origine du séisme. Si la station est dans une zone en dilatation, le premier mouvement du sol est vers le haut et l'enregistrement sur le sismogramme vers le bas ("down") ; si elle est en compression le mouvement du sol se fait vers le bas avec un enregistrement vers le haut ("up"). Les stations sont ensuite représentées dans une sphère centrée sur l'épicentre du séisme (sphère focale). Les stations en compression sont représentées en noir et les stations en dilatation en blanc.

Quelques élèves ignorent tout du mécanisme au foyer. Pour les autres, les connaissances existent et les réponses ont été variées et plus ou moins volumineuses que ce soit pour le texte et les figures. Beaucoup de schémas montrent une coupe avec une faille séparant deux blocs, avec des blocs qui montent ou descendent en fonction du jeu de la faille impliquée dans le séisme, à partir duquel un mécanisme au foyer est disposé. Les informations sur le matériel pour arriver à de telles mesures ont été plus ou moins développées. Globalement, les réponses sont plutôt satisfaisantes, ce qui montre que les méthodes sont bien assimilées et comprises.

3.2. Les plans séparant les différents dièdres correspondent aux plans nodaux. Les secteurs (dièdres, quadrants) correspondent aux zones en dilatation et en compression.

Dans l'ensemble, les réponses sont assez bonnes et l'illustration en a souvent été donnée à la question précédente.

3.3. Pour déterminer correctement le plan de faille issu de la secousse sismique, on doit avoir des observations de terrain et des mesures de déformation et/ou de rejets effectifs sur le terrain. En d'autres termes, il est impératif de connaître le contexte régional et les structures préexistantes.

La réponse est largement incomplète, ce qui traduit un manque de recul devant un problème géologique donné et un processus de réflexion incomplet. Les réponses sont souvent strictement limitées à la résolution immédiate tectonique ou géophysique du jeu de la faille en question. L'utilisation de documents

informant de façon plus large sur la géologie du secteur pour définir le jeu des failles au cours des temps géologiques est rarement indiquée. Il en va de même pour l'étude des documents portant plus spécifiquement sur l'étude des failles, les données géophysiques à différentes échelles ou encore toutes autres données géologiques, comme les sondages, etc.

3.4. Lors d'un épisode sismique, les répliques sont des séismes qui se produisent après un choc principal (séisme initial) approximativement dans la même région que le choc principal et qui résultent des réajustements de contraintes le long de la zone de faille. L'alignement cartographique des répliques est un argument pour définir l'orientation (voire le pendage) du plan de faille activé lors de l'épisode sismique complet.

Les réponses sont bonnes même si l'expression syntaxique n'est pas de très bonne qualité sur les répliques ainsi que leur usage. Il arrive qu'il y ait, dans de rares cas, une absence de réponse au sujet de la définition des répliques.

3.5. Trois familles de mécanismes au foyer sont localisées géographiquement dans le fossé Rhénan. On demande, à l'aide de schémas, d'expliquer à quel type de faille correspond chaque famille de mécanisme au foyer. On peut représenter facilement les trois types de mouvement. Le type (1) correspond à une faille décrochante, le type (2) à une faille normale et le type (3) à une faille inverse. Quant aux directions de contraintes, σ_1 est vertical (faille normale), σ_1 est horizontal et perpendiculaire à la faille (faille inverse), et σ_1 est horizontal et à environ 45° du plan de faille (décrochement).

Là encore les réponses sont plutôt bonnes, même si les schémas laissent à désirer ou sont parfois compliqués. Le mécanisme au foyer correspond assez bien au plan de faille reporté, même si parfois, il y a des inversions entre faille normale et faille inverse. Pour les failles décrochantes, la situation est parfois un peu plus compliquée, et on inverse, là encore, dextre et sénestre, que ce soit sur le schéma des blocs en mouvement, ou pour les schémas de mécanisme au foyer. En ce qui concerne les contraintes, le terme de σ_1 n'est pas souvent reporté. On indique par une double flèche la direction et le sens de la contrainte principale sur les blocs dessinés, avec une dilatation horizontale dans le cas des failles normales. Pour les failles décrochantes, la position verticale de σ_2 n'est pas souvent reportée.

3.6. La majorité des mécanismes au foyer de type (1) correspondent à des décrochements. L'orientation des contraintes régionales est donc : σ_1 orienté NW-SE ; σ_2 globalement vertical et σ_3 orienté NE-SW. Ces directions de contraintes régionales sont directement liées à la poussée alpine.

Contrairement à la question précédente qui montrait un certain savoir théorique, en ce qui concerne la nature et le mouvement des failles ainsi que le mécanisme au foyer, la mise en application des connaissances relatives à l'exploitation de la figure, est assez pauvre ou fautive. La présence de décrochements est le plus souvent reconnue pour la déformation récente de la région, mais pas son mouvement. Par ailleurs, la position de la contrainte σ_1 est rarement définie, même si l'énoncé indique de se baser sur le mécanisme au foyer des secteurs en compression, qui clairement indique un σ_1 NW-SE. La réponse donnée est avec un σ_1 N-S, les blocs est ou ouest pouvant bouger soit vers le nord, soit vers le sud, selon les copies. Il y a parfois confusion entre l'ellipsoïde des contraintes et celle de la déformation. Enfin, le "moteur régional" n'a pas été retrouvé ou de façon exceptionnelle. Peu de copies reportent le jeu tectonique présent dans les Alpes avec la poussée alpine vers le NW. Évidemment, beaucoup de réponses sont assez fantaisistes. Plusieurs copies évoquent l'histoire géologique proche de la région avec le rifting, au Tertiaire.

4. GEOTHERMIE PROFONDE DANS LE FOSSE RHENAN

4.1. Les sources d'énergie internes à la Terre et leurs proportions sont : (i) la radioactivité naturelle, pour presque 50% ; (ii) le refroidissement séculaire, à environ 50% ; (iii) la cristallisation de la graine, de 1 à 2% ; (iv) l'énergie gravitationnelle, entre 1 et 2% ; et enfin, (v) les marées terrestres qui sont anecdotiques. Il y a beaucoup de bonnes réponses qui citent les trois principaux moteurs : la radioactivité, le refroidissement de la Terre ou encore la cristallisation de la graine. Toutefois la proportion des sources quant à la contribution de chaleur est beaucoup moins bien connue et la cristallisation de la graine se voit parfois attribuée une contribution extraordinaire ! De nombreuses copies ne mentionnent que deux sources de chaleur et par forcément les deux plus importantes. Et bien sûr, il est fréquemment mentionné le volcanisme, le rifting, les dorsales, les zones de subduction, les failles comme contributeur important aux sources d'énergie interne.

4.2. Les principaux mécanismes de transfert de chaleur des matériaux terrestres sont de deux types : (i) la convection, transfert associé à des mouvements de matière, et (ii) la conduction, transfert direct réalisé par propagation de proche en proche de la chaleur. La convection est beaucoup plus efficace que la conduction pour assurer un transfert de chaleur.

C'est encore une excellente réponse pour quasiment toutes les copies. A la conduction et à la convection, on ajoute parfois le rayonnement. Certains précisent les données physiques associées.

4.3. La porosité est la propriété d'un corps ou d'un milieu présentant des vides interconnectés ou non. La porosité totale représente l'ensemble des vides présents dans une roche. Elle s'exprime par le rapport du volume des vides sur le volume total du milieu. La perméabilité est l'aptitude d'une roche à se laisser traverser par un fluide, sous l'effet d'une pression (ou gradient hydraulique). Une roche est constituée d'éléments figurés et en général d'un ciment ou une matrice pouvant ménager des "vides". Le volume de ces vides constitue la porosité. La porosité peut être fermée (les fluides ne peuvent pas circuler) ou ouverte (les fluides ont la possibilité de circuler). On peut, en porosité ouverte, distinguer une macroporosité (ou porosité efficace) et une porosité capillaire. Une roche à porosité ouverte est perméable (les fluides peuvent la traverser) ; une roche à perméabilité fermée est imperméable (les fluides sont incapables de la traverser).

Les réponses sont dans l'ensemble assez bonnes mais elles traduisent beaucoup de difficultés d'expression. Par ailleurs, il y a pour certains une confusion entre perméabilité et porosité. Et une roche poreuse est considérée parfois à tort comme perméable. Les notions sont comprises dans l'ensemble mais pas toujours de façon très approfondie, ce qui conduit à des erreurs en tentant d'explicitier ces notions avec un exemple. Les meilleures copies mentionnent le coefficient de porosité avec le rapport volume des pores sur volume de la roche considérée.

4.4. A l'échelle du forage, on observe un gradient thermique anormal dans la partie sédimentaire (plus de 100°C / km) jusqu'à 1400m. La température est ensuite quasiment stable autour de 150°C jusqu'à 3500m pour ensuite évoluer en suivant un gradient "normal".

Cette anomalie de "surface" est directement liée à la circulation de fluides géothermaux dans la partie supérieure du socle granitique. Les fluides qui sont en convection dans cette partie du socle homogénéisent la température. La partie superficielle sédimentaire qui n'est pas "convectée" par ces mêmes fluides diffuse la chaleur par conduction et on constate une forte accumulation de chaleur dans ces sédiments. Attention, ce profil est à relier directement à des circulations de fluides et non à une anomalie du gradient régional perturbé par la période de rifting oligocène. L'anomalie potentielle liée au rifting est rééquilibrée depuis longtemps. Le champ géothermique du fossé Rhénan est globalement considéré comme conducteur au même titre que celui du bassin de Paris. Seules des anomalies convectives locales de fluides induisent de telles courbes de température.

Les réponses ne sont pas mauvaises dans l'ensemble en ce qui concerne la description de la courbe, mais elles sont souvent incomplètes et comme souvent, très mal exprimées. Si l'anomalie est généralement relevée dans les premiers 1400m, on ne mentionne pas toujours le retour à un gradient normal en profondeur vers 3500m, ni la courbe intermédiaire de rattrapage entre le gradient élevé et le gradient normal. Les meilleures copies indiquent quelles formations géologiques correspondent aux formations où une anomalie géothermique est présente, ce qui a permis aux rédacteurs de mieux illustrer le schéma final quant à la localisation des zones particulièrement chaudes.

4.5. En guise de synthèse, on demande un schéma de fonctionnement possible d'un système géothermique en indiquant *a minima*, sur une trame structurale fournie, l'origine des fluides, les flux de chaleur, les chemins possibles de circulation des fluides. Certains candidats ont compris 'système géothermique' en termes de centrale d'exploitation géothermique. Ce n'est pas ce qui est demandé dans la question. Il s'agit d'un sujet de géologie et pas de technologie de mise en œuvre d'une centrale géothermique (avec le doublet géothermique comprenant forage de production et forage de ré-injection, position de l'échangeur thermique, ...). On attend donc uniquement des éléments géologiques afin de compléter le document. De manière relativement simple, on pouvait renseigner le schéma en faisant apparaître trois éléments : (i) le flux de chaleur ascendant positionné vers 6 km de profondeur, (ii) une circulation par convection et remontée de fluides "chauds" dans le socle, entre 6 et 3 km de profondeur, (iii) une entrée de fluides "froids", avec recharge par des eaux météoriques au niveau des Vosges, et des circulations de saumures sédimentaires provenant des séries cénozoïques et mésozoïques. Le schéma devait montrer le rôle prépondérant des failles, mettant en contact des unités géologiques de natures et

d'âges différents et jouant le rôle potentiel de drains avec des chemins de circulation de fluides *per ascensum* et *per descensum*.

Comme on pouvait s'y attendre, il n'y a pas toujours eu de tentative de réponses. Dans les autres cas, on relève que tous les schémas possibles ont été envisagés. Les meilleures copies signalent que le réchauffement de l'eau est limité à la tranche sédimentaire caractérisée par l'anomalie géothermique. Des copies indiquent que c'est la conduction qui domine dans cette tranche pour réchauffer roches et eau et la présence de circulations privilégiées de fluides initiées par les failles. Le rôle de la barrière thermique au niveau du socle est peu évoqué mais pris en considération dans les bonnes copies. De même que c'est à partir de 3500m que tout redevient normal pour le gradient géothermique. Le flux de chaleur venant de la Terre est assez bien signalé, de même que la circulation des fluides le long des failles. Plusieurs copies font intervenir des fluides liés aux précipitations de surface qui pénètrent dans les roches par perméabilité et aussi des fluides qui pourraient être d'origine profonde. Des copies reportent aussi, en plus, un système de pompage avec le cheminement de l'eau depuis l'usine, eau qui se réchauffe en profondeur, avant d'être pompée. Le pompage s'effectue parfois à de très grandes profondeurs dans le socle, loin de l'anomalie thermique. Cette réduction de l'habillage du schéma à un aspect purement technique souligne la faiblesse des connaissances et de l'argumentation géologique quant au fonctionnement du fossé Rhéan.

Remarques générales

Très souvent, en lisant les réponses dans les copies, on a l'impression que chaque question proposée est totalement indépendante, sans lien avec la thématique proposée sur le fossé Rhéan. Pourtant la succession des questions et les informations données progressivement permettent d'éclairer et de mieux comprendre la géologie du fossé Rhéan. Il en est ainsi pour la compréhension de la structure du fossé, de la description des séries du Cénozoïque par rapport aux formations antérieures, et pour la compréhension de la géothermie avec la mise en évidence du géotherme local et ses conséquences quant au schéma de synthèse.

Le sujet ne présentait pas de difficultés majeures. Les attendus étaient pour l'essentiel accessibles aux candidats, y compris le schéma bilan. Néanmoins, il révèle les mêmes défauts ou manques. Il faut rappeler qu'une discipline utilisée en géologie (géophysique, tectonique, sédimentologie, pétrologie) sert à résoudre un problème géologique ou à comprendre un processus géologique. Elle n'est pas une fin en soi, ou ne sert pas à donner une bonne réponse à une question hors contexte. On a souvent l'impression que les élèves manquent d'attention lors de la lecture du sujet et ne s'intéressent qu'à l'immédiateté des réponses susceptibles d'être fournies. La plupart du temps, les questions se succèdent selon une progression logique, permettant d'aboutir à la caractérisation d'un événement et/ou d'un processus.

Avec le chapitre relatif à la sédimentation régionale, on entre dans la description de roches, de lames minces et/ou d'affleurements. Toutes les descriptions, au demeurant fort brèves à elliptiques, dénotent l'absence d'observation élémentaire ou la maîtrise du rapport écrit sur les objets observés, sauf dans de rares copies où un plan sommaire se dessine avec l'énoncé successif de la nature des constituants et de la phase de liaison d'une roche, de leurs caractéristiques morphologiques et proportions, et de la présence ou pas de plans remarquables qui peuvent affecter la distribution des objets étudiés. Par ailleurs, peu de copies ont tenu compte des informations données dans le texte, à savoir qu'au Trias inférieur, le matériel déposé était silicoclastique, et au Trias moyen ainsi qu'au Jurassique, carbonaté, deux indications majeures qui auraient dû aider les élèves dans la détermination des échantillons. Là encore, pour répondre correctement aux questions, il est nécessaire de s'appuyer sur les informations données dans le texte du sujet.

Au final, les correcteurs souhaitent mentionner les quelques très bonnes copies, tant sur le fond que sur la forme. Ceci montre que certains candidats ont acquis de très bonnes connaissances et qu'ils savent les utiliser, les synthétiser et les mettre en forme pour résoudre les problèmes posés par les différentes questions du sujet.

Références bibliographiques

Aichholzer C., Düringer P., Orciani S. & Genter A. (2016) - New stratigraphic interpretation of the Soultz-sous-Forêts 30-year-old geothermal wells calibrated on the recent one from Rittershoffen (Upper Rhine Graben, France). - *Geothermal Energy*, 4, 13.

Aichholzer C., Düringer P. & Genter A. (2019) - Detailed descriptions of the lower-middle Triassic and Permian formations using cores and gamma-rays from the EPS-1 exploration geothermal borehole (Soultz-sous-Forêts, Upper Rhine Graben, France). - *Geothermal Energy*, 7, 34.

Bossennec C. (2019) - Evolution des propriétés de transfert des grès par diagenèse et déformation : application aux formations du Buntsandstein, Graben du Rhin. - Thèse Université de Lorraine, 557 p.

Bossennec C., Géraud Y., Moretti I., Mattioni L. & Stemmelen D. (2018) - Pore network properties of sandstones in a fault damage zone. - *Journal of Structural Geology*, **110**, 24–44.

Brun J.P., Gutscher M.-A., & DEKORP-ECORS teams (1992) - Deep crustal structure of the Rhine Graben from DEKORP-ECORS seismic reflection data: a summary. - *Tectonophysics*, **208**, 139-147.

Duringer P. (1987) - Environnement de dépôt des conglomérats côtiers oligocènes du fossé Rhéna. - *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Colmar*, **59**, 47-66.

Duringer P. (1988) - Les conglomérats des bordures du rift cénozoïque rhéna : dynamique sédimentaire et contrôle climatique. - Thèse d'État, Université de Strasbourg, 287 p.

Duringer P., Aichholzer C., Orciani S. & Genter A. (2019) - The complete lithostratigraphic section of the geothermal wells in Rittershoffen (Upper Rhine Graben, eastern France): a key for future geothermal wells. - *BSGF - Earth Sciences Bulletin*, **190**, 13.

Edel J.-B., Whitechurch H. & Diraison M. (2006) - Seismicity wedge beneath the Upper Rhine Graben due to backwards Alpine push? - *Tectonophysics*, **428**, 49–64.

Fossen H., Hesthammer J., Johansen T.E.S. & Sygnabere T.O. (2003) - Structural geology of the Huldra Field, northern North Sea - a major tilted fault block at the eastern edge of the Horda Platform. - *Marine and Petroleum Geology*, **20**, 1105–1118.

Haffen S. (2012) - Caractéristiques géothermiques du réservoir gréseux du Buntsandstein d'Alsace. - Thèse Université de Strasbourg, 373 p.

Haffen S., Géraud Y., Diraison M & Dezayes C. (2013) - Determination of fluid-flow zones in a geothermal sandstone reservoir using thermal conductivity and temperature logs. - *Geothermics*, **46**, 32-41.

Pribnow D. & Schellchmidt, R. (2000) - Thermal tracking of upper crustal fluid flow in the Rhine Graben. - *Geophysical Research Letters*, **27**, 1957-1960.

Ressources Bureau Central Sismologique Français

https://www.franceseisme.fr/donnees/intensites/details_seisme.php?IdSei=1156

Le concepteur remercie Lionel Bertrand (Société Enerex, Nancy) et Fabrice Malartre (ENSG, Nancy) pour les clichés photographiques.

Intervalles	Effectif	Pourcentage	Effectif cumulé	Pourcentage cumulé
0 à 0,99		0,00	0	0,00
1 à 1,99	2	0,15	2	0,15
2 à 2,99	1	0,07	3	0,22
3 à 3,99	15	1,11	18	1,34
4 à 4,99	26	1,93	44	3,27
5 à 5,99	36	2,67	80	5,94
6 à 6,99	82	6,09	162	12,03
7 à 7,99	123	9,13	285	21,16
8 à 8,99	133	9,87	418	31,03
9 à 9,99	173	12,84	591	43,88
10 à 10,99	188	13,96	779	57,83
11 à 11,99	171	12,69	950	70,53
12 à 12,99	137	10,17	1087	80,70
13 à 13,99	91	6,76	1178	87,45
14 à 14,99	73	5,42	1251	92,87
15 à 15,99	55	4,08	1306	96,96
16 à 16,99	24	1,78	1330	98,74
17 à 17,99	10	0,74	1340	99,48
18 à 18,99	6	0,45	1346	99,93
19 à 19,99		0,00	1346	99,93
20	1	0,07	1347	100,00

Nombre de candidats dans la matière : 1347

Minimum : 1,05

Maximum : 20

Moyenne : 10,46

Ecart type : 2,96

Intervalles	Effectif	Pourcentage	Effectif cumulé	Pourcentage cumulé
0 à 0,99	2	0,15	2	0,15
1 à 1,99	3	0,22	5	0,37
2 à 2,99	2	0,15	7	0,52
3 à 3,99	1	0,07	8	0,59
4 à 4,99	6	0,45	14	1,04
5 à 5,99	32	2,38	46	3,41
6 à 6,99	78	5,79	124	9,21
7 à 7,99	172	12,77	296	21,97
8 à 8,99	188	13,96	484	35,93
9 à 9,99	224	16,63	708	52,56
10 à 10,99	139	10,32	847	62,88
11 à 11,99	134	9,95	981	72,83
12 à 12,99	105	7,80	1086	80,62
13 à 13,99	94	6,98	1180	87,60
14 à 14,99	71	5,27	1251	92,87
15 à 15,99	47	3,49	1298	96,36
16 à 16,99	21	1,56	1319	97,92
17 à 17,99	21	1,56	1340	99,48
18 à 18,99	5	0,37	1345	99,85
19 à 19,99	2	0,15	1347	100,00
20		0,00	1347	100,00

Nombre de candidats dans la matière : 1347

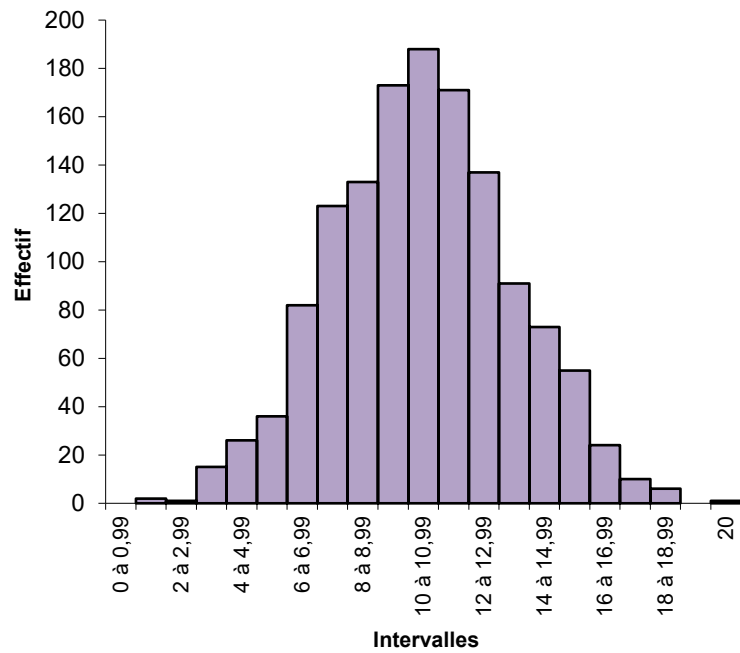
Minimum : 0,57

Maximum : 19,5

Moyenne : 10,29

Ecart type : 2,90

GÉOLOGIE ÉCRIT



COMPOSITION FRANCAISE

