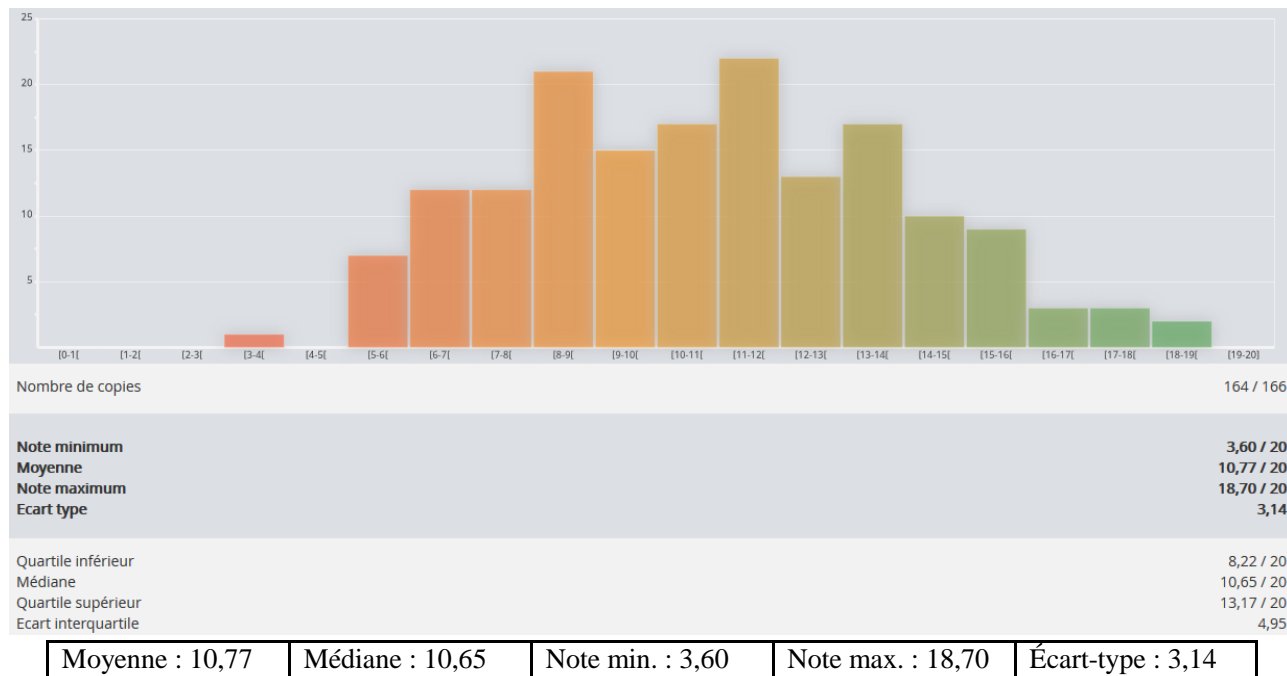


Statistiques de l'épreuve



I. L'épreuve : présentation générale et notation

L'épreuve portait sur le thème « **Hémoglobines et évolution** ». Elle comprenait quatre parties qui n'étaient pas indépendantes : une partie sur les conséquences de l'hypoxie (c'est-à-dire les effets de la baisse de concentration en dioxygène du milieu sur l'hémoglobine du sang), puis deux parties sur la vie en altitude avec deux exemples d'adaptation, un chez les Mammifères et un chez les Oiseaux (portant notamment sur la phylogénie) et une dernière partie sur le polymorphisme de l'hémoglobine en lien avec la valeur sélective (permettant d'évaluer les connaissances des étudiants relatives à la génétique des populations et aux mécanismes de l'évolution).

Cette année, le sujet ne portait donc que sur la biologie, contrairement à celui de l'an passé qui comprenait une partie géologique. Il a permis d'évaluer des connaissances et des capacités au programme des deux années de la formation sur des thèmes variés : métabolisme, physiologie animale, adaptation au milieu de vie, phylogénie et évolution.

Cette épreuve permettait d'évaluer la capacité des candidats à construire une argumentation par une analyse des documents proposés, guidée par des questions ciblées.

La notation a pris en compte les réponses aux différentes questions en s'appuyant sur l'évaluation des compétences mises en œuvre pour chacune d'elles.

RAPPORT DE L'ÉPREUVE ÉCRITE DE SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE

Ces compétences sont regroupées en 5 items :

• A. Extraire des informations

Est évaluée ici l'aptitude à analyser des documents variés (photographies, graphiques, etc.) et à hiérarchiser les informations. L'analyse doit être synthétique mais rigoureuse et précise (chiffrage), basée sur la comparaison préalable avec les témoins. Une attention à la prise en compte de la variabilité et du caractère significatif des résultats est attendue.

• B. Identifier un problème, le résoudre, proposer une conclusion / hypothèse

Cette compétence correspond à la mobilisation d'un raisonnement permettant aux candidats, à partir des analyses effectuées et de ses connaissances, de proposer une(des) hypothèse(s) explicative(s), une conclusion. Pertinence des interprétations et cohérence du raisonnement proposé, points essentiels de la démarche, sont évaluées ici.

• C. Relier des documents entre eux, donner un sens global

Est évaluée ici l'aptitude des candidats à articuler entre elles les informations extraites des documents pour faire émerger une cohérence globale. La progression du raisonnement d'un document à l'autre et l'insertion dans la problématique scientifique plus large sont notées ici.

• D. Communication graphique : réaliser un schéma, un dessin

Un dessin d'interprétation à partir d'une électronographie était demandé à la question 12. On teste ici la capacité du candidat à interpréter une photographie. Il ne s'agit pas de faire un schéma purement théorique comme cela est trop souvent le cas.

• E. Communication : qualité de l'expression

La forme du devoir est le point pris en compte dans cet item : capacité du candidat à présenter des idées de façon concise, en utilisant un vocabulaire précis et en soignant la syntaxe et l'orthographe ; le soin apporté à la copie est également évalué.

Dans ce rapport, seront distinguées :

- *Écriture droite* : attendus en termes de concepts scientifiques et notions associées
- *Écriture italique* : erreurs fréquentes ou difficultés rencontrées par de nombreux candidats.

II. Observations générales

Globalement, la forme de l'exercice est bien maîtrisée. Les copies sont le plus souvent soignées, bien rédigées avec une orthographe acceptable.

Le jury a cependant noté quelques maladresses récurrentes.

- Certains candidats répondent à des questions de façon groupée ou dans un ordre différent de celui proposé alors qu'il est explicitement demandé de traiter les questions dans l'ordre de l'énoncé.
- De nombreux candidats recopient les titres des parties, voire les questions alors que leurs copies sont inachevées témoignant d'un manque de temps en fin d'épreuve. De même, la réalisation systématique d'un schéma bilan à la fin d'une partie est inutile s'il n'est pas demandé et fait perdre du temps.
- Le soulignement de mots est un atout s'il est limité et si les mots soulignés sont judicieusement choisis.
- L'utilisation d'un vocabulaire rigoureux est attendue. Ainsi, les formulations telles que « matcher », « CQFD »... sont à proscrire. D'autre part, l'argumentation doit s'appuyer sur l'exploitation des résultats et certaines expressions telles que « jouer un rôle », « avoir une influence » ou « les résultats permettent de dire que » ne sont pas informatives et ne permettent pas d'argumenter la réponse si elles ne s'appuient pas sur une exploitation rigoureuse des données. Ainsi l'expression « avoir une influence » peut correspondre à une augmentation ou à une diminution du paramètre étudié et ne peut se suffire à elle-même.
- Si la mise en évidence des limites de certains documents peut être pertinente, la critique en règle de chaque document n'est pas judicieuse.
- Certaines copies présentent une démarche caricaturale et identique quelle que soit la question (observations, interprétation et analyse, séparés en paragraphes distincts).

III. Attendus concernant le sujet

Partie 1 :

Dans cette partie, on s'intéresse aux conséquences physiologiques de l'hypoxie c'est-à-dire aux effets de la baisse de concentration en dioxygène du milieu sur l'hémoglobine du sang.

Le jury a noté que des notions indispensables pour traiter ce thème concernant les propriétés de l'hémoglobine et leurs conséquences sur la fixation et le relargage du dioxygène sont rarement bien maîtrisées par les candidats (notamment la p_{50} et son interprétation).

• Question 1

Pour une même quantité de dioxygène (noté O_2) délivrée aux tissus, égale à 50 % de la quantité liée à l'hémoglobine à saturation, indiquez pour chaque situation sur la figure 1 (p. 3) la valeur de la pO_2 veineuse (après distribution du O_2 aux tissus). Utilisez la figure 1 en annexe, à rendre avec la copie.

En hypoxie modérée : pO_2 veineuse = 24 mmHg

En hypoxie sévère : pO_2 veineuse = 16 mmHg

Cette question a souvent été mal comprise. Les candidats ont souvent déterminé une quantité égale à 50 % de la quantité liée à l'hémoglobine pour les différentes pO_2 alvéolaires indiquées et non 50 % de la quantité liée à l'hémoglobine à saturation.

• Question 2

À partir des figures 3 et 4, décrivez l'effet d'un transport de la plaine vers l'altitude sur la concentration en 2,3-BPG et sur l'affinité de l'hémoglobine pour le O_2 (n'exploitez ici que les courbes).

Lors d'un transport en altitude, recréé par une diminution de la teneur en dioxygène de l'air à la pression atmosphérique au niveau de la mer, la diminution de la pression partielle en dioxygène stimule chez le rat la production de 2,3-BPG. Pour une pression partielle en dioxygène divisée par 2 (effet d'un passage de 0 à 5000 mètres d'altitude), la concentration en 2,3-BPG dans les globules rouges augmente d'environ 40 %. Chez l'être humain, le passage de 5 à 8 mM de [BPG] déplace la courbe vers la droite et la p_{50} passe de 25 à 33 mmHg : l'affinité de l'hémoglobine pour le dioxygène diminue.

Il est important d'utiliser des données chiffrées afin de répondre à la question. Il est insuffisant de dire que cela modifie, ou influence l'affinité de l'hémoglobine sans utiliser les valeurs de variation de la p_{50} et sans indiquer le sens de variation. L'hémoglobine est parfois présentée comme une enzyme.

• Question 3

À partir de la figure 4, pour une même distribution de O_2 dans les tissus et une même pO_2 artérielle, indiquez l'effet sur la pO_2 veineuse d'un déplacement de la courbe de saturation « vers la droite », (c'est-à-dire avec une p_{50} plus grande) dans les cas d'une hypoxie modérée et d'une hypoxie sévère.

Pour une même distribution de O_2 dans les tissus et une même pO_2 artérielle :

- la pO_2 veineuse est plus élevée avec la concentration [BPG] = 8mM qu'avec la concentration [BPG] = 5 mM en hypoxie modérée ;
- c'est l'inverse en hypoxie sévère.

Cette question a été le plus souvent bien traitée.

- Question 4

Dans quel cas l'augmentation de la p_{50} (se traduisant par un déplacement de la courbe de saturation vers la droite) est-elle avantageuse ?

D'après l'énoncé, il est avantageux d'avoir une pO_2 tissulaire/veineuse la plus élevée possible, ainsi l'augmentation de la p_{50} est avantageuse en hypoxie modérée mais pas en hypoxie sévère.

Cette question a été le plus souvent correctement traitée.

- Question 5

Expliquez comment l'hypoxie et l'hyperventilation conduisent à l'alcalose (indice : considérez l'effet de l'hyperventilation sur la pression partielle en CO_2 dans le sang).

Lors d'une hypoxie, la disponibilité en dioxygène dans le sang est plus faible : le déplacement du second équilibre vers la droite consomme des protons et augmente donc le pH. L'hyperventilation accélère l'élimination du CO_2 par les poumons entraînant une diminution de la pCO_2 ce qui déplace le premier équilibre vers la droite : des protons sont également consommés et le pH augmente.

La question imposait d'envisager les conséquences de l'hypoxie mais également de l'hyperventilation. En général, un seul de ces deux aspects a été envisagé.

- Question 6

À partir des figures 5 et 6 (p. 6), montrez que l'alcalose est responsable de l'augmentation de la concentration en 2,3-BPG lors d'un épisode hypoxique.

D'après la figure 6, l'épisode hypoxique fait augmenter la quantité de 2,3-BPG de 50 %. Cette augmentation de la quantité de 2,3-BPG n'a pas lieu si la teneur en CO_2 est maintenue à 5 %. Cette très forte teneur en CO_2 compense la diminution de la pCO_2 entraînée par l'hyperventilation due à l'hypoxie (question 5) et doit empêcher le développement de l'alcalose. La synthèse de 2,3-BPG est déclenchée par l'augmentation du pH sanguin.

Certaines enzymes de la glycolyse, HK et PFK, sont inhibées par les ions H^+ . Cette inhibition est diminuée si la teneur en H^+ diminue et la synthèse de 1,3-BPG, précurseur du 2,3-BPG est favorisée.

De même, l'activité de la BPGS est moins inhibée et la synthèse de 2,3-BPG est favorisée.

Cette question a été l'objet de nombreuses réponses erronées avec des interprétations incongrues de la figure 5 : les protons détruisent certaines enzymes de la glycolyse ou le H^+ , clairement indiqué comme un facteur de régulation des enzymes dans la légende, est analysé comme un substrat des réactions qu'il régule.

Partie 2 :

On s'intéresse ici à un exemple d'adaptation à la vie en altitude chez des mammifères.

Dans cette partie, il était indispensable de savoir manipuler la notion de p_{50} et d'établir un lien avec l'affinité de l'hémoglobine pour le dioxygène, au-delà de la détermination de sa valeur.

- Question 7

Expliquez l'intérêt de ces p_{50} plus faibles grâce à la figure 4 (p. 5).

En hypoxie sévère, condition de haute altitude, une p_{50} plus faible permet d'avoir une hémoglobine qui présente une affinité plus élevée, ce qui assure une plus grande pO_2 veineuse tout en augmentant la saturation du sang artériel.

La question nécessitait d'envisager l'affinité et d'établir le lien avec la p_{50} ce qui a été rarement fait. De nombreux candidats utilisent un vocabulaire inadéquat pour répondre : la saturation est plus rapide ou la vitesse de fixation est modifiée par exemple.

- Question 8

À partir du tableau 1 et de la figure 2 (p.4), comparez l'effet du 2,3-BPG sur les hémoglobines du lama et du dromadaire et expliquez les différences constatées.

En absence de 2,3-BPG, la p_{50} est plus élevée chez le lama que chez le dromadaire. Par contre l'addition de 2,3-BPG augmente plus faiblement la p_{50} du lama que celle du dromadaire. Comme la concentration en 2,3-BPG est la même, celui-ci diminue moins l'affinité de l'hémoglobine du lama que celle du dromadaire. Dans l'hémoglobine du dromadaire, le 2,3-BPG se fixe au centre du tétramère en se liant à des résidus histidine (2 et 143) des chaînes β . L'effet de cette liaison est de diminuer l'affinité de l'hémoglobine pour le dioxygène. L'histidine en position 2 est remplacée par une asparagine chez le lama, ce qui affaiblit la liaison avec le 2,3-BPG et limite la diminution d'affinité en présence de 2,3-BPG.

Cette question a souvent été bien abordée et les candidats font une analyse rigoureuse du tableau. Mais le lien avec le 2,3-BPG et son interaction avec l'hémoglobine est souvent oublié ou l'argumentation est absente (« le 2,3-BPG se fixe à l'hémoglobine ce qui explique les différences observées » ou « les résultats permettent de dire que... »).

- Question 9

Indiquez la valeur adaptative de la substitution His \rightarrow Asn dans la chaîne β chez les camélidés d'altitude.

Il est avantageux pour un animal qui vit de façon permanente en altitude d'avoir une hémoglobine de plus forte affinité pour le dioxygène (cf. question 7).

La p_{50} passe de 14,8 à 20,3 mmHg chez le lama alors qu'elle passe de 12 à 21 mmHg chez le dromadaire en présence de 2,3-BPG. La substitution His \rightarrow Asn dans la chaîne β des camélidés d'altitude limite l'augmentation de la p_{50} , et donc la diminution d'affinité en présence de 2,3-BPG.

Les globules rouges du lama et du dromadaire ayant des concentrations comparables en 2,3-BPG *in vivo*, l'hémoglobine du lama est adaptée à la vie en altitude.

De nombreux candidats, au lieu de présenter un raisonnement qualitatif, ont indiqué une valeur chiffrée, comme 2 par exemple, voire une valeur en mmHg.

Partie 3 :

On s'intéresse ici à un exemple d'adaptation à la vie en altitude chez des oiseaux en lien avec l'histoire évolutive et la phylogénie.

Une lecture attentive de l'introduction était indispensable car elle permettait de relever des données indispensables.

• **Question 10**

À partir de vos connaissances, proposez plusieurs mécanismes par lesquels cette substitution peut affecter l'affinité de l'hémoglobine pour le dioxygène. Indiquez le plus probable.

Cette substitution d'un acide aminé par un autre pourrait changer la structure tertiaire de la sous-unité α et augmenter son affinité pour le dioxygène, modifier le site de liaison de l'IPP (effecteur allostérique jouant chez les oiseaux le même rôle que le 2,3-BPG chez les mammifères), changer les interactions entre les sous-unités α et β ...

Cette dernière hypothèse paraît la plus probable car cela modifierait les propriétés de coopérativité de l'hémoglobine et abaisserait la p_{50} et donc augmenterait l'affinité de l'hémoglobine pour le dioxygène.

Cette question a été bien comprise mais les mécanismes proposés devaient rester vraisemblables, ce qui n'était parfois pas le cas. De nombreux candidats ont envisagé l'hémoglobine comme une enzyme dans cette question.

• **Question 11**

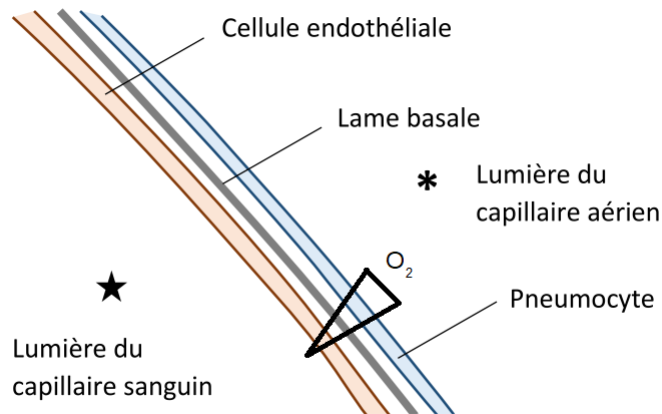
À l'aide du tableau 2 et de la figure 7 (p. 9), expliquez-en quoi les substitutions chez l'oie à tête barrée et l'ouette des Andes constituent un exemple remarquable de convergence.

Les deux espèces d'oiseaux adaptées à l'altitude, oie à tête barrée et ouette des Andes, présentent des substitutions différentes d'acides aminés mais qui modifient dans les deux cas l'interface 55/119 entre chaînes. Ces deux espèces présentent des p_{50} proches mais plus faibles que les espèces auxquelles elles sont apparentées. On peut donc supposer que l'adaptation à l'altitude par modification de l'interface s'est produite de façon indépendante dans les deux lignées. (Remarque : une autre hypothèse moins parcimonieuse serait que l'ancêtre commun à ces quatre espèces était adapté à l'altitude et qu'on aurait ensuite eu deux reversions indépendantes dans les lignées du canard musqué et de l'oie cendrée.)

Une lecture précise de l'introduction était indispensable afin de repérer l'interaction des acides aminés 55 et 119. La notion de convergence évolutive est rarement comprise. Les commentaires associés à l'étude de l'arbre phylogénétique sont souvent peu pertinents et se limitent parfois à une comparaison morphologique des oiseaux présentés. Lorsque la notion de convergence est comprise, le développement est souvent finaliste.

• Question 12

À partir de vos connaissances sur l'échangeur respiratoire des mammifères, indiquez de quoi est constituée cette frontière air-sang en réalisant un dessin d'interprétation. Vous figurerez le gradient de dioxygène.



Dessin d'interprétation

La frontière air-sang (de la lumière du tubule aérien vers la lumière du capillaire sanguin) est constituée : de la double membrane plasmique et du cytoplasme très mince d'un pneumocyte ; d'une lame basale ; de la double membrane plasmique et du cytoplasme très mince de la cellule endothéliale qui limite le capillaire sanguin.

Certains candidats réalisent un schéma totalement théorique et ne s'appuient pas sur le document proposé. Très peu de schémas sont corrects. Le nombre de membranes plasmiques qui séparent l'air de la lumière du capillaire sanguin est rarement exact. Le gradient de dioxygène explicitement demandé est parfois oublié.

• Question 13

Rappelez les paramètres dont dépend le flux de dioxygène par diffusion à travers la frontière air-sang constituant une surface d'échange. Indiquez le sens de variation de ces paramètres qui permet d'obtenir le flux le plus grand possible.

Le flux de dioxygène F par diffusion à travers la frontière air-sang dépend de la surface d'échange S , de l'épaisseur de la frontière e , du gradient de dioxygène de part et d'autre de la frontière ΔO_2 et du coefficient de diffusion D du dioxygène à travers la frontière. C'est la loi de Fick :

$$F = - D.S. \Delta O_2 / e.$$

Le flux sera d'autant plus grand que la surface d'échange et le gradient seront plus élevés, et l'épaisseur plus faible.

Cette question a souvent été bien traitée. Il est cependant nécessaire de ne pas se limiter à l'écriture de la loi de Fick sans donner la signification des paramètres.

- **Question 14**

Comment se distingue l'ouette des Andes par rapport à la tendance des autres oiseaux ? Lequel des paramètres indiqués à la question 13 n'est pas optimisé concernant les échanges d'O₂ ?

L'ouette des Andes se distingue par une plus grande surface d'échange, proportionnellement à sa masse corporelle, ainsi qu'une plus forte moyenne de l'épaisseur de la frontière air/sang (rapportée à la masse corporelle). Ce dernier paramètre n'est pas optimisé.

Cette question a été bien traitée en général.

- **Question 15**

Reliez votre réponse précédente aux caractéristiques de la vie en altitude, en considérant en particulier la contrainte qui s'impose à l'ouette des Andes par rapport à l'oie cendrée.

La différence de pression très élevée entre le sang des capillaires et l'air dans les tubules aériens (dont la pression est beaucoup plus faible en lien avec l'altitude élevée) augmente le risque de rupture de cette frontière ou de passage de plasma à la frontière air-sang.

Partie 4 :

On s'intéresse ici au polymorphisme de l'hémoglobine en lien avec la valeur sélective.

Peu de candidats ont traité le thème 4 dans son ensemble. Les candidats ayant bien géré leur temps et ayant pu aborder et traiter ce thème ont été valorisés.

- **Question 16**

Au vu de cette correspondance, expliquez l'intérêt d'explorer les polymorphismes de l'hémoglobine dans des groupes de vertébrés aussi distants que les poissons téléostéens et les oiseaux.

On retrouve de nouveau une substitution au niveau du même contact entre les sous unités alpha et bêta, malgré la grande distance évolutive entre l'oie (oiseau) et la morue (poisson téléostéen). Explorer les polymorphismes de l'hémoglobine peut permettre d'étudier le lien entre les contraintes liées au milieu et l'évolution des propriétés de l'hémoglobine.

L'intérêt le plus souvent proposé par les candidats était de pouvoir comparer des hémoglobines de deux groupes vivants dans des milieux différents.

- **Question 17**

Quel génotype vous semble-t-il le plus adapté aux eaux froides ?

La comparaison du sang des homozygotes Hbl-1 et Hbl-2 permet de constater que l'hémoglobine Hbl-2 présente la p₅₀ la plus faible et donc la plus forte affinité pour le dioxygène à 0 °C. C'est l'inverse à 20°C. Les besoins métaboliques très importants à 0°C nécessitent une optimisation de la saturation de l'hémoglobine dans le sang artériel qui traverse les branchies, donc une p₅₀ la plus basse possible est avantageuse. Les homozygotes Hbl-2 ($\beta_{VA} // \beta_{VA}$) seraient donc mieux adaptés aux eaux froides.

Les réponses sont souvent peu argumentées. Le lien entre le génotype, la p_{50} et la température est très rarement explicité.

- **Question 18**

À l'aide des données du tableau 3 (p. 13), montrez, pour la localité de Malangen, que la fréquence de l'allèle codant la sous-unité β Val (β_V) est égale à 0,8. Détaillez le calcul et le raisonnement.

Cent animaux diploïdes, cela représente 200 allèles du gène codant la chaîne bêta. Le nombre d'allèles β_V dans ce pool d'allèles est obtenu en comptant le nombre d'homozygotes $\beta_V // \beta_V$ en double (car ils portent 2 allèles β_V) et le nombre d'hétérozygotes en simple, soit $(2 \times 70) + 20 = 160$. La fréquence se calcule alors : $f(\beta_V) = 160/200 = 0,8$

Cette question a souvent été bien traitée même si on peut regretter que certains candidats, capables de réaliser le calcul, ne détaillent pas leur raisonnement comme cela est explicitement demandé dans la question.

- **Question 19**

En déduire, pour les localités de Malangen et de Bjørnjøya, les pourcentages (= nombre d'animaux sur 100) attendus des 3 génotypes dans l'hypothèse d'un équilibre de Hardy-Weinberg (H-W).

Le tableau 3 est reproduit en annexe et est à rendre avec la copie.

Malangen : $\beta_V // \beta_V$: 64 ; $\beta_V // \beta_M$: 32 ; $\beta_M // \beta_M$: 4

Bjørnjøya : $\beta_V // \beta_V$: 81 ; $\beta_V // \beta_M$: 18 ; $\beta_M // \beta_M$: 1

Les calculs ont été le plus souvent correctement réalisés.

- **Question 20**

Comparez, pour chaque localité du tableau 3, les valeurs mesurées avec les valeurs attendues dans l'hypothèse d'un équilibre de Hardy-Weinberg ; concluez.

En comparant, dans le tableau 3, les fréquences génotypiques observées avec les fréquences génotypiques attendues dans l'hypothèse d'un équilibre de Hardy-Weinberg, on constate que les populations de Helgoland et de Bjørnjøya sont à peu près à l'équilibre de Hardy-Weinberg contrairement à la population de Malangen qui présente un déficit d'hétérozygotes par rapport à la valeur attendue.

Lorsque les calculs étaient bien réalisés à la question précédente, les valeurs mesurées étaient correctement comparées avec les valeurs attendues.

• Question 21

Sur la figure 13, placez les points correspondant à la fréquence mesurée du génotype hétérozygote en fonction de la fréquence allélique pour les populations de Helgoland, Bjørnjøya et Malangen.

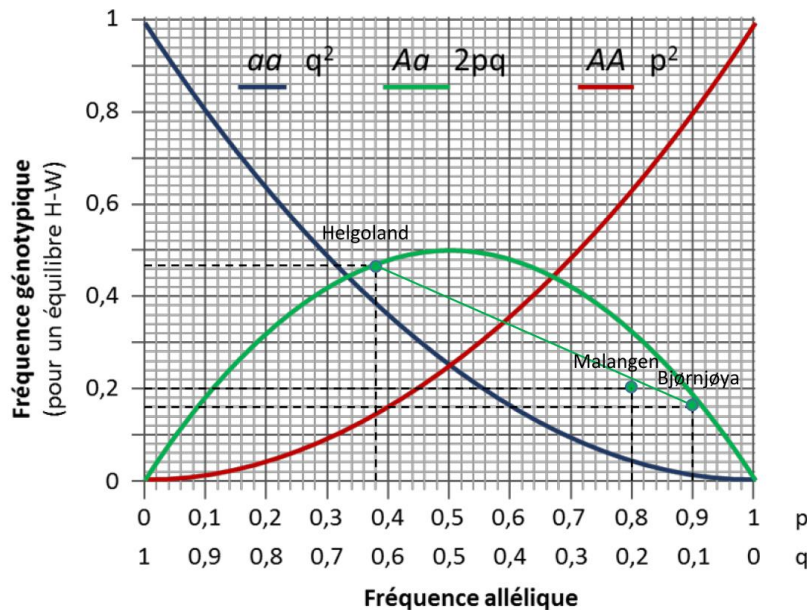


Figure : fréquence des génotypes pour un couple d'allèles dans une population à l'équilibre de Hardy-Weinberg, en fonction de la fréquence de l'un des allèles et fréquences alléliques pour les populations de Helgoland, Bjørnjøya et Malangen.

Cette question a été très rarement réussie avec souvent plusieurs points sur le graphique pour chaque population. Les fréquences alléliques p et q présentées sous le graphique n'ont généralement pas été comprises.

• Question 22

À l'aide des figures 12 et 13 complétée (p. 14), montrez que la structure génétique de la population de Malangen peut s'interpréter comme le mélange de deux populations aux fréquences alléliques contrastées et qui seraient à l'équilibre de Hardy-Weinberg.

Le pourcentage d'hétérozygotes, à Helgoland et de Bjørnjøya, est très proche du pourcentage attendu dans l'équilibre de Hardy-Weinberg (courbe verte sur la figure 13). Le pourcentage d'hétérozygotes de Malangen s'en écarte, mais se trouve presque sur la droite de mélange rejoignant les points de Helgoland et de Bjørnjøya. On peut donc interpréter la structure génétique de cette population comme le mélange d'individus de Helgoland, au sud, et de Bjørnjøya, au nord.

Cette question a été réussie par les candidats ayant correctement placé les points à la question précédente. Là encore, une lecture rigoureuse de l'énoncé donnant des indications sur la méthode était indispensable pour pouvoir répondre.

- Question 23

À partir des figures 12 (p. 14) et 14 (p. 16), interprétez la distribution des fréquences alléliques de l'allèle β_V de la mer de Barents à la mer du Nord : proposer une explication adaptative.

L'allèle β_V est très majoritaire au nord de la carte étudiée, diminue progressivement vers le sud et il est minoritaire dans la mer du Nord. Cette distribution suit le gradient de la température moyenne des eaux de surface. Or on a vu que l'hémoglobine Hbl-2, constituée avec l'allèle β_V , a plus d'affinité pour le dioxygène dans les eaux froides. On peut donc supposer que la forte représentation de cet allèle au nord a une valeur adaptative.

- Question 24

Indiquez deux mécanismes par lesquels un allèle peut finir par se fixer dans une population. Indiquez l'hypothèse ici la plus probable pour la forte fréquence de l'allèle β_V dans la mer Baltique, en justifiant.

Un allèle peut se fixer par dérive ou sélection positive. L'allèle β_V , qui est quasi fixé en mer Baltique, pourrait avoir atteint cette fréquence proche de 1 par dérive : un petit nombre d'individus issus de la mer du Nord voisine aurait colonisé la mer Baltique. Ce faible effectif aurait été propice à la dérive. Cependant, on constate que les marqueurs sélectivement neutres ont des fréquences proches des populations de la mer du Nord, il n'y a donc pas eu de dérive. Il est probable que l'allèle β_V a été sélectionné. Les eaux du sud de la Baltique sont en moyenne aussi froides que celles de la mer de Barents à Bjørnjøya (3 à 4 degrés de moins que les eaux de la mer du Nord à la même latitude) ce qui exerce une pression sélective similaire.

Le terme de fixation d'un allèle est peu connu. L'information concernant les marqueurs neutres n'a été que très rarement utilisée.