

RAPPORT SUR L'ÉPREUVE ÉCRITE DE BIOLOGIE

Écoles concernées : ENS (Paris) – ENS de Lyon – ENS Paris-Saclay

Coefficients (en pourcentage du total d'admissibilité/ d'admission) :

ENS Paris-Saclay : BCPST : 42% / 12,3% ; TB : 33,3% / 15,8%

ENS de Lyon : Option biologie : 40% / 13,2%, Option ST : 20% / 6,6%

ENS : Option biologie : 46,7% / 4,8% ; Option ST : 26,7% / 2,7%

ENPC : 26,7% / 5%

Membres du jury :

Guillaume Barthole, Lucie Bastin-Héline, Alain Bessis, Léonard Dupont, Marine Euvrard, Benoît Maffei, Anne-Charlotte Marsollier, Mathias Penot, Déborah Prévôt et Stéphane Rety.

L'épreuve écrite de biologie de la session 2022, d'une durée totale de 6h, proposait aux candidates et aux candidats¹ de réfléchir aux interactions entre cellules voisines. Le sujet de synthèse (partie A) d'une durée conseillée de 2h traitait de ces interactions dans leur ensemble et l'étude de documents (parties B, C et D) présentait trois exemples de ces interactions et de leurs conséquences dans leur contexte *in vivo*.

Le jury salue la très grande qualité de certaines copies qui ont su faire preuve de synthèse et de rigueur dans leur appréhension des différentes thématiques.

Partie A (synthèse) : Les interactions entre cellules voisines (des cellules sont considérées comme voisines si la distance entre elles est inférieure à 100 μm).

1. Attendus et contenu

Délimitation du sujet

Le sujet, très vaste, demandait aux candidats de piocher dans de nombreux points du programme. Beaucoup d'exemples pouvaient illustrer le sujet, sans qu'ils y soient explicitement associés. Il s'agissait donc pour les candidats d'être capable de réutiliser leurs connaissances dans le cadre du sujet. Les copies ayant réussi à faire preuve d'une vision large et transversale ont été valorisées, mais dans la plupart des copies des pans entiers du sujet ont été négligés, souvent les interactions entre cellules appartenant à des individus ou des espèces différentes.

Sur l'ensemble des copies, la quasi-totalité des points attendus dans le barème ont pu être attribués, preuve d'une bonne formation et préparation générale des candidats à cette épreuve.

Notions attendues

Le jury attendait une description des structures cellulaires impliquées dans les interactions, un balayage des modalités de celles-ci et une discussion sur leurs implications fonctionnelles.

Afin d'éviter les redondances et de couvrir les différents aspects du sujet, le plan suivant pouvait être adopté :

I) Les cellules voisines établissent des interactions mécaniques

A/ Mise en évidence : par exemple, les cellules d'épiderme d'oignon qui restent associées lorsqu'on les prélève à l'aide d'une pince

B/ Structures impliquées : jonctions serrées, jonctions d'adhérence (au sens large), interactions s'effectuant par l'intermédiaire d'une matrice extracellulaire partagée entre cellules voisines

C/ Importance fonctionnelle des interactions mécaniques entre cellules : structure des tissus, barrière, cohésion des mouvements cellulaires

¹ Ce rapport s'adresse à toutes et tous mais afin d'en alléger l'écriture, nous emploierons par la suite le masculin.

II) Les interactions entre cellules voisines impliquent souvent des échanges de matière et d'information

Ici la description de la transmission synaptique était incontournable.

La diversité des interactions devait ensuite être présentée et discutée : échanges par l'intermédiaire de transporteurs membranaires (par exemple : transport du saccharose entre cellule compagne et cellule de mise en réserve chez les Angiospermes) paracrinie, juxtacrinie, exo- et endocytose, phagocytose, jonctions communicantes...

III) Conséquences fonctionnelles des interactions entre cellules voisines, à l'échelle de l'organisme et de l'écosystème

A/ Echange d'informations permettant le développement embryonnaire

B/ Echanges poussés à l'extrême : cas de la fusion cellulaire (lors de la fécondation par exemple)

C/ Echanges métaboliques

1) Entre cellules voisines d'un même organisme, permettant une spécialisation fonctionnelle (exemple des cellules du mésophylle et de la gaine périvasculaire chez les plantes en C4, ou des hétérocystes et des cellules végétatives de *Nostoc*)

2) Entre cellules d'organismes différents : exemple d'une symbiose mutualiste (cas d'une mycorhize, ou d'un lichen)

3) Entre cellule d'un hôte et de son parasite, conduisant à des échanges unidirectionnels

4) Au sein de syntrophies bactériennes (par exemple dans la panse de la vache)

D/ Echanges génétiques horizontaux

Points fréquemment développés et bien traités par les candidats

- Les exemples pris dans le développement embryonnaire sont nombreux et en général bien traités.
- La communication synaptique a été quasi-systématiquement présentée, quoique rarement replacée dans le cadre de la paracrinie.
- Le fonctionnement cardiaque a été souvent envisagé, même si les deux aspects des interactions (cohésion mécanique *via* les desmosomes et chimique *via* les jonctions gap) ont rarement été présentés tous les deux.
- Les interactions entre gamètes lors de la fécondation ont souvent été présentées, mais étonnamment sans aller systématiquement jusqu'à la description de la fusion des deux cellules.
- Lorsqu'ils ont été présentés, les échanges génétiques horizontaux l'ont été avec une précision étonnante (conjugaison bactérienne notamment).
- Lorsqu'ils ont été présentés, les échanges entre cellules d'organisme différents ont été bien traités.

Quelques problèmes récurrents présents dans les copies

- La description des jonctions mécaniques entre les cellules est moyennement maîtrisée : confusions entre jonctions étanches et d'adhérence, lien avec le cytosquelette non représenté ou avec les mauvais filaments... En revanche le lien avec les échelles supérieures (tissus, organes) est souvent mentionné.
- La paroi pecto-cellulosique est très souvent négligée, et la membrane plasmique des cellules végétales souvent oubliée sur les figures.
- L'ordre de grandeur de l'épaisseur de la fente synaptique est souvent absent, ou totalement erroné (plusieurs dizaines voire une centaine de micromètres alors que cette structure mesure 10 à 40 nm).
- Les candidats ont tendance à utiliser des exemples pertinents (ex : développement embryonnaire animal et mouvements cellulaires lors de la gastrulation), mais qui sont rarement interprétés et exploités jusqu'au bout ou replacés très efficacement dans le cadre du sujet. Par exemple, pour décrire l'importance des interactions entre cellules voisines lors des mouvements du développement embryonnaire, ce genre de formulation aurait pu être utilisé : « Les interactions mécaniques entre cellules voisines, présentées plus tôt, permettent la propagation d'un mouvement initié par des cellules spécialisées (en bouteille) à l'ensemble d'une unité structurale : c'est l'involution-migration. Ces unités structurales peuvent être plus ou moins régionalisées par la spécificité des interactions : c'est notamment le cas lors de la neurulation, où l'expression ectopique de N-Cadhérines à la place de E-Cadhérines permet l'individualisation du neurectoderme et la formation du tube neural.»

- Les notions de jonctions GAP et de plasmodesmes sont mal maîtrisées, surtout les seconds (approximations en termes de structure et de taille d'exclusion). En plus de donner des tailles d'exclusion en kDa il est pertinent de donner des exemples de molécules (ions, glucose, nucléotides, acides aminés...) qui peuvent passer la structure.
- Exo- endo- et phagocytose ont été rarement abordées.

2. Forme et méthode

D'une façon générale et à quelques rares exceptions près, les synthèses présentent la forme attendue (introduction, titres, illustrations, transitions, conclusion) ce qui démontre une bonne préparation des candidats à cette épreuve.

Rigueur, vocabulaire et rédaction

Des efforts de propreté et de soin sont notables dans de nombreuses copies, même si la lisibilité de certaines est parfois limitée, et si les ratures parfois nombreuses gênent la fluidité de la lecture. L'orthographe reste d'un niveau très hétérogène. Le jury encourage fortement les candidats ayant des difficultés à garder du temps en fin d'épreuve pour relire leur copie et corriger un maximum de fautes, car des erreurs grossières (par exemple « gêne » à la place de « gène ») rendent la lecture difficile. Les abréviations autres que celles communément admises (ADN, ATP...) sont à bannir, même si elles sont définies. Il en est de même pour le style télégraphique ou les expressions s'apparentant à du langage oral (« on a l'élément présynaptique... »).

Le jury tient à féliciter les candidats, relativement nombreux, qui utilisent un vocabulaire précis et bien choisi. Par contre, il ne suffit pas de se contenter de citer des mots-clefs (même très judicieux) pour obtenir les points prévus dans le barème : il faut expliciter les notions présentées, décrire les exemples envisagés en évitant les sous-entendus. Au contraire, certains exemples étaient parfois traités sans que le vocabulaire associé n'ait été mentionné, ce qui est un peu dommage : trop souvent l'exemple des cardiomyocytes a été présenté sans que le mot « syncytium » n'apparaisse dans le paragraphe associé.

Introduction

L'introduction est un exercice de style rarement maîtrisé par les candidats même si leur bonne volonté d'en suivre les trois étapes-clefs (présentation du sujet/ problématique/ annonce du plan) apparaît clairement.

Très peu de copies prennent la peine de partir d'un contexte général pour amener le sujet. Parmi les accroches intéressantes, remarquer que lors du processus de cicatrisation les cellules arrêtent de se diviser lorsque les deux lèvres de la plaie sont jointes était une bonne idée.

De nombreux candidats ont négligé la définition des termes du sujet, ce qui est regrettable. Si la notion de « voisines » était précisée par l'énoncé, celles de « cellules » et d'« interactions » méritaient d'être explicitées.

Certains candidats ont choisi de limiter leur exposé aux pluricellulaires, voire même aux Métazoaires, ce qui est dommage, car des interactions peuvent être décrites entre tous types de cellules. La précision que tous les types d'organismes seraient abordés a au contraire été appréciée par le jury.

La justesse du choix de 100 µm comme limitation de « voisines » a été très rarement discutée. Les copies qui l'ont fait ont été valorisées.

Tous les candidats présentent une problématique, mais celle-ci est en général très basique (« Quelles sont les modalités et les rôles des interactions entre cellules voisines ? ») ce qui n'est pas de nature à stimuler la curiosité du lecteur. Une problématique intéressante est en général amenée par un constat d'apparente contradiction. Par exemple ici, on pouvait remarquer que les cellules des organismes pluricellulaires présentent des interactions, au moins physiques, obligatoires ce qui n'est pas le cas des unicellulaires, alors que les deux types d'organismes sont capables d'accomplir l'ensemble de leurs fonctions. Cette observation incite à se demander si ces interactions existent quand même chez les unicellulaires et si elles présentent les mêmes caractéristiques que celles observées chez les pluricellulaires. Elle pousse également à s'interroger sur les avantages apportés par les interactions permanentes observées chez les pluricellulaires et se demander si d'autres types d'interactions existent.

Le principal défaut observé dans les introductions des candidats est qu'elles ont tendance à dévoiler d'emblée l'ensemble de ce qui va être présenté par la suite, ce qui les fait davantage ressembler à des conclusions. De

fait, les conclusions reprennent en général les points déjà présentés en introduction, ce qui ne permet pas de mettre en valeur le raisonnement et la progression conceptuelle effectuée lors du développement.

Plan et fil conducteur

De nombreux plans ont été proposés par les candidats, mais ils permettaient très rarement de couvrir l'ensemble du sujet, en lien avec une réflexion trop restreinte autour de l'étendue du sujet et d'une problématique qu'il posait. Les plupart des candidats ont choisi de présenter des plans « par type d'interaction » (physique/ échange d'informations/ échange de matière ou bien interaction permanente/ transitoire) ce qui les a conduit bien souvent à des redites, des découpages discutables entre les parties 2 et 3 et un manque de vision d'ensemble des implications fonctionnelles des interactions. D'autres candidats ont présenté un plan « par fonction » (nutrition/ reproduction/ relation) qui là encore conduisait à des redites et peu de vision d'ensemble.

Certains candidats se sont parfois égarés dans un sujet voisin, « Les cellules dans leur environnement », en présentant les échanges entre les cellules et le milieu extérieur et en détaillant les propriétés des transporteurs membranaires impliqués dans l'absorption intestinale ou la propagation du potentiel d'action. Pour que les exemples présentés fassent partie du sujet, il fallait obligatoirement qu'ils impliquent au moins deux cellules en interaction et pas seulement une cellule et le milieu extracellulaire.

Pour être efficace, le plan doit être notionnel et ne pas consister uniquement en une suite d'exemples. Par ailleurs, quand un point est abordé, il doit être traité dans son ensemble et en entier plutôt que de renvoyer à une partie ultérieure du plan.

Démarche scientifique et expérimentale

La démarche hypothético-déductive, consistant à présenter des mises en évidence des phénomènes biologiques (observations, expériences) avant d'en décrire le mécanisme est très rarement utilisée, ce que le jury déplore. Chaque description d'observation ou d'expérience a été valorisée : mise en évidence de l'induction du mésoderme par les cellules du pôle végétatif lors du développement embryonnaire du Xénope, mesure du délai synaptique lors de la transmission du message nerveux, expériences montrant la spécificité de l'interaction spermatozoïde/ ovocyte, etc.

Exemples et illustrations

Le jury félicite les candidats qui ont fait l'effort de choisir des exemples illustrant la diversité des interactions entre cellules de différentes origines : bactéries, eucaryotes unicellulaires, cellules animales et végétales, appartenant ou non au même individu ou à la même espèce.

La qualité des illustrations est très variable d'une copie à l'autre : propreté, précision, clarté, légende, titre mais aussi échelle sont appréciés et valorisés. Attention à la taille des figures, parfois illisibles à force d'être noyées dans le texte.

Conclusion

Une bonne conclusion ne doit pas se limiter à un résumé de ce qui a été présenté mais doit en tirer des messages généraux, répondant ainsi à la problématique soulevée en introduction. La référence à cette dernière est absente de la grande majorité des copies.

La quasi-totalité des candidats utilisent la communication endocrine, « à longue distance » comme ouverture, avec des formulations pas toujours convaincantes. Les copies présentant un effort de créativité (formation des tumeurs impliquant une perte d'interaction entre cellules voisines, évolution convergente de la pluricellularité, etc.) ont été valorisées.

Parties B, C et D (étude de documents) : commentaires généraux

La grande majorité des copies ont traité au moins en partie les trois exercices proposés, démontrant à nouveau une bonne préparation des candidats à cette épreuve difficile et exigeante. Le jury félicite notamment les candidats pour leur capacité de remobilisation sur chacune des parties, puisque contrairement à certaines sessions passées elles étaient totalement indépendantes.

Points positifs

- De nombreux candidats ont le réflexe de quantifier les résultats lors de leur description, ce qu'apprécie fortement le jury. En revanche, beaucoup se contentent de mentionner « plus grand »/ « plus petit » là où on attend un ordre de grandeur (10 fois plus grand/ 10 fois plus petit).
- Lors de l'interprétation des résultats, un grand nombre de candidats ont pensé à commenter la significativité de ceux-ci en soulignant le chevauchement ou non des barres d'erreurs, mais certaines copies n'en font jamais mention.
- La plupart des candidats restent prudents dans leurs analyses et signalent que leurs propositions restent, à ce stade, des hypothèses.
- Dans l'ensemble, les candidats ont su faire preuve d'esprit critique face à leurs analyses en détectant certaines incohérences (notamment pour la partie D) même s'ils n'ont pas tous été capables de les interpréter. Très peu en revanche sont capables de souligner que certains documents présentent des résultats similaires à des documents précédents (notamment dans la partie C) alors que cela est tout aussi important que de souligner les incohérences.

Quelques problèmes récurrents présents dans les copies et pouvant être améliorés

- Les candidats négligent de nombreuses informations fournies par l'énoncé. Dans les conditions stressantes de l'épreuve, ce n'est pas étonnant, mais cela peut empêcher les candidats de choisir rapidement les interprétations les plus logiques. Il était notamment clairement indiqué, pour la partie C, que le calamar étudié était un animal nocturne passant ses journées enfoui dans le sable. Présenter un mécanisme de contrôle de la luminescence en fonction de l'éclairement solaire n'était alors pas très judicieux. Le jury conseille aux candidats de ne pas hésiter à surligner les informations susceptibles d'être utiles pour la suite lors de la lecture du sujet.
- Les figures sont parfois décrites sans que les résultats soient réellement analysés et interprétés. Il est pourtant attendu une conclusion ou la proposition d'une hypothèse permettant d'expliquer chacune des figures. Une démarche trop superficielle ne permet pas de progresser dans les questions et l'exercice.
- Les phrases sont parfois trop complexes : mieux vaut utiliser un vocabulaire simple et précis dans des phrases courtes plutôt que des tournures alambiquées et faussement savantes qui ne donnent aucune information pertinente. Par ailleurs il ne faut pas hésiter à faire des schémas interprétatifs, qui peuvent mieux décrire qu'un texte.
- L'analyse des résultats est parfois très désordonnée. Les résultats sont présentés dans le désordre ou partiellement alors qu'il est souvent essentiel de discuter des témoins ou contrôles avant les autres résultats. De même, il est essentiel de bien rappeler ce qui est comparé (condition versus témoin ou deux conditions entre elles).
- Les paraphrases ne sont pas des interprétations. On a pu lire des choses comme « Dans le mutant X, la GFP n'est pas exprimée dans la racine, on en déduit que X est importante pour l'expression de la GFP dans la racine » ou bien « la luciférase n'est pas exprimée dans les mutants *luxA*, on en déduit que LuxA est important pour l'expression de la luciférase » : ces tournures de styles, n'apportant aucune information au lecteur, sont à éviter.

Quelques conseils généraux

- Ne pas hésiter à revenir sur les hypothèses précédentes et les confronter aux nouveaux résultats. Il est difficile, voire impossible, de suggérer dès le départ la bonne interprétation, mais l'accumulation des données et des résultats au fil des expériences et des figures permet d'éliminer certaines hypothèses et d'en conforter d'autres, voire d'en proposer de nouvelles, les figures successives d'une même partie étant liées.
- Eviter les guillemets (La cellule «voit » sa voisine) : soit le terme est adapté et on peut l'utiliser tel quel, soit il faut en trouver un autre, souvent plus approprié.

- Comme dans la synthèse, le soin apporté dans l'écriture est primordial pour que les correcteurs puissent prendre en compte la totalité des raisonnements. Une écriture illisible, un style télégraphique ou allusif (« le mutant et le sauvage se comportent de la même manière » sans plus de précision) sont préjudiciables.

Partie B « Nourrir toutes ses cellules » : commentaires et éléments de réponse

Question 1 : les réponses ont été en grande majorité satisfaisantes, montrant que l'anatomie végétale est maîtrisée par la plupart des candidats.

Question 2 :

a. Un très grand nombre de candidats ont confondu expression du gène et localisation de la protéine correspondante, ou encore gène et promoteur. Il était pourtant précisé dans l'énoncé que le gène *SUC2* est exprimé uniquement dans les cellules compagnes, qui d'après la figure 1 sont absentes de la pointe de la racine. La fluorescence observée dans toute la pointe racinaire avec la construction *pSUC2::GFP* dans les plantes sauvages pouvait alors s'expliquer par une diffusion de la GFP dans la partie terminale de la racine à partir des cellules compagnes. De nombreux candidats ont mal interprété cette image en suggérant que, contrairement aux indications de l'énoncé « le gène *pSUC2* est donc exprimé dans toute la racine » ou « les cellules compagnes sont donc présentes dans tout l'apex racinaire ».

Lorsque le promoteur *pSUC2* contrôle l'expression d'une grosse protéine (GFP + sporamine = 27 + 47 = 74 kDa), la fluorescence marque la zone de décharge du phloème (cellules compagnes, visibles sur la figure 1), ce qui suggère que la GFP-sporamine ne diffuse pas comme la GFP, probablement du fait de sa taille importante. Certains candidats n'ayant pas compris cette distinction entre expression et localisation ont proposé des hypothèses fantaisistes, par exemple que la GFP ou la Sporamine étaient des protéines endogènes de la plante et que la Sporamine inhibait le gène *SUC2*.

b. Bien que les phénotypes aient été correctement décrits, quasiment aucun candidat n'a remarqué le caractère co-dominant (ou semi-dominant) de la mutation *cal3-1*, suggérant que cette mutation était de type gain de fonction. Dans l'esprit des candidats, toutes les mutations semblent forcément conduire à une déficience de la protéine (sans qu'ils le disent explicitement cependant).

c. Les fonctions proposées pour le gène *CALS3* allaient par conséquent dans ce sens. Les copies présentant plusieurs hypothèses, notamment en fonction du type de mutation *cal3-1* (gain ou perte de fonction) ont été valorisées.

Question 3 :

a. La majorité des candidats ont répondu de façon générale à cette question, sans chercher à l'appliquer au contexte de l'exercice. S'il est difficile de prédire l'effet d'une mutation ponctuelle conduisant au changement d'un seul acide aminé, en revanche le codon stop introduit par la mutation *cal3-4* est situé au tout début de la séquence codante : il conduira à la formation d'une protéine drastiquement tronquée, très probablement non fonctionnelle, voire pas de protéine du tout. Des erreurs grossières dans les mécanismes d'expression des gènes, indiquant par exemple que le codon stop entraînait un arrêt de la transcription, ont été repérées dans quelques copies.

b. A nouveau, même si les phénotypes ont été bien décrits, les conclusions présentées dans la plupart des cas ont été erronées car les candidats ont considéré que seule la partie N-terminale de la protéine *CALS3* était nécessaire à sa fonction. Les copies qui, au contraire, ont indiqué que l'absence de *CALS3* n'avait pas d'effet sur le phénotype, probablement en raison de la redondance entre les différentes callose synthases, ont été valorisées.

Peu de candidats ont clairement indiqué que le mutant *CALS3m* présentait en fait deux copies sauvages et une copie mutée du gène *CALS3*. Le fait de retrouver les mêmes résultats phénotypiques qu'avec les hétérozygotes *cal3-1/CALS3* confirmait le statut gain de fonction de la mutation *cal3-1*. Celle-ci pourrait conduire à une protéine plus active, ou plus stable par exemple.

Question 4 :

a. La formule de la callose a été correctement décrite et les hypothèses concernant sa fonction tout à fait judicieuses.

b. De façon surprenante, un nombre non négligeable de candidats n'ont pas su reconnaître les cellules turgescence et plasmolysée et ont proposé un lien entre la présence de glucose et la synthèse de callose

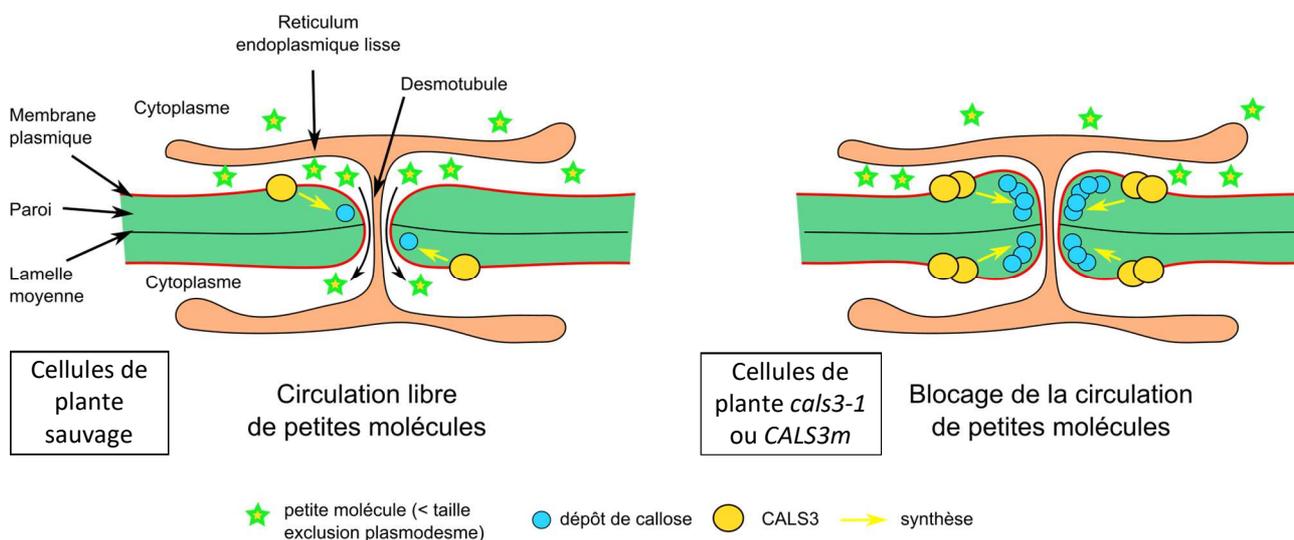
(composée de glucose), ce qui les a conduits à des hypothèses très éloignées du mécanisme attendu (par exemple activation de la transcription de *CALS3* par le glucose). La membrane de la vacuole (tonoplaste) est souvent confondue avec la membrane plasmique. Au contraire, certains candidats ont bien compris les deux conditions, ont mené une analyse rigoureuse et légendé les flèches correctement.

c. L'analyse du marquage au bleu d'aniline a été bien menée par certains candidats, mais a été source de confusion pour d'autres, qui ne savaient plus si on mettait en évidence la callose, la protéine *CALS3* ou même parfois *SUC2*. Les micrographies électroniques ont été la source de beaucoup de confusions, notamment par l'ignorance complète de la barre d'échelle (ou des ordres de grandeur) : les candidats ont parfois identifié deux cellules accolées (à la manière d'une synapse).

Dans un grand nombre de copies, les structures visibles dans les figures 4D et E n'ont pas été identifiées comme des plasmodesmes (parfois les structures ont été décrites sans être nommées), ce qui a rendu les interprétations complexes et confuses.

d. Le schéma bilan final a été discriminant et permettait de bien retranscrire ce que chaque candidat avait compris de l'ensemble du sujet. Certains ont présenté des figures très approximatives de plasmodesme (avec ou sans desmotubule, membrane limitante, des légendes incomplètes, un positionnement de la callose qui ne concorde pas avec celle des documents précédents), mais d'autres ont produit des schémas très proches des attendus.

Exemple de schéma-bilan pouvant être proposé :



Partie C « Le manteau de lumière du calamar » : commentaires et éléments de réponse

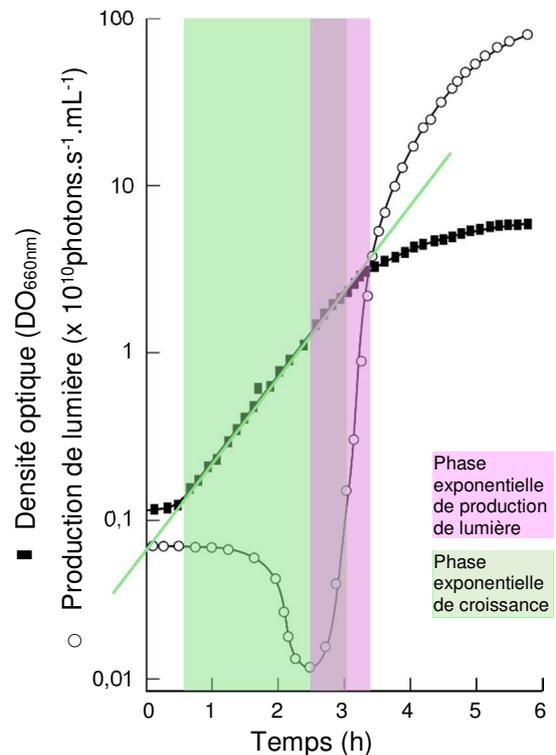
Question 1 :

a. La notion de turbidité d'une suspension de particules (ici des bactéries) est mal connue de la grande majorité des candidats, et sa mesure par diffraction/ réflexion/ diffusion de la lumière confondue avec celle de l'absorbance d'une solution. La mention de l'importance de la longueur d'onde utilisée, de la nécessité de faire un blanc et de réaliser une gamme-étalon ont été valorisées.

b. Les 3 phases classiques d'une croissance bactérienne ont été décrites par les candidats, bien que la phase de latence soit généralement passée sous silence. La plupart ont noté l'utilisation d'une échelle semi-logarithmique bien que quelquefois une croissance linéaire plutôt qu'exponentielle ait été mentionnée.

Question 2 :

En revanche, la plupart des candidats se sont laissé guider par leurs *a priori* et ont voulu faire coïncider les différentes phases d'émission de lumière avec celles de la croissance, ce qui est inexact. Par exemple, la diminution de la production de lumière observée entre 1,5h et 2,5h ne débute pas en même temps que la phase exponentielle de la croissance (qui elle, démarre à 0,5h de culture). De même, la ré-augmentation de la production lumineuse débute à 2,5h de culture, c'est-à-dire **pendant** la phase exponentielle de la croissance bactérienne et non à la fin de celle-ci (voir la superposition des zones vertes et violettes sur la figure ci-contre). Une observation très attentive de la figure était nécessaire pour éviter de proposer uniquement des hypothèses très simples comme le fait que les bactéries ne pouvaient pas à la fois se multiplier et produire de la lumière, mais plutôt suggérer une induction des éléments nécessaires à la production de lumière en fonction de la densité bactérienne.



Question 3 :

a. Nombreux sont les candidats à avoir proposé que, puisque l'activité luciférase mesurée *in vitro* ne présente pas la diminution observée *in vivo* entre 1,5 et 2,5h, celle-ci est probablement due à un déficit de substrats de l'enzyme, fournis en excès *in vitro*.

En revanche, très peu de candidat se sont intéressés à la seconde partie de la figure 3A, qui montrait que les activités *in vitro*, *in vivo* ainsi que le dosage de la luciférase étaient superposables, et présentaient une augmentation beaucoup plus forte que celle de la densité bactérienne (les échelles étant proportionnelles), suggérant une induction de la production de la luciférase (ou bien une augmentation de sa stabilité) lorsque la densité bactérienne augmente. A ce stade de la culture, les substrats ne semblent plus être en déficit non plus : très peu de candidats ont fait cette remarque et ont été valorisés.

b. La figure 3B a été analysée correctement par la plupart des candidats qui ont suggéré qu'un blocage de la chaîne respiratoire permettait, probablement par inter-conversion du NADH en FMNH₂, de fournir à la luciférase le substrat qui lui manque à ce stade de la culture bactérienne, confirmant les hypothèses formulées précédemment. Le raisonnement est le même pour l'aldéhyde aliphatique.

Question 4 :

a. De façon surprenante, de nombreux candidats ont mal interprété l'expérience de la centrifugation en suggérant que celle-ci faisait éclater les bactéries, ou qu'elle permettait de trier les bactéries en fonction de leur âge ou du nombre de protéines exprimées. Elle permet en fait de séparer les bactéries (qui se retrouvent rassemblées dans un culot) de leur milieu de culture (le surnageant).

b. L'analyse a souvent été superficielle mais la majorité des candidats ont bien identifié la corrélation entre l'ajout de surnageant de populations denses et le raccourcissement de phase de latence de production lumineuse. Comme l'étape de centrifugation a été rarement comprise, peu d'entre eux ont proposé une hypothèse explicative cohérente, qui était qu'au fil de la culture, le surnageant s'enrichit d'un composé capable d'induire la production de lumière.

Question 5 :

L'analyse du document a généralement été assez superficielle, seul le lien entre augmentation de la concentration en AHL et augmentation de la production lumineuse a été clairement identifié par les candidats. Ceux qui ont signalé l'existence d'une concentration-seuil d'AHL permettant d'induire la production de lumière ont été valorisés. Certains n'ont pas compris que le tableau 2 permettait de comparer les concentrations en AHL dans le milieu de culture et dans les bactéries.

Quelques candidats, toutefois, ont su analyser les résultats en détails, permettant de suggérer :

- que l'AHL est produite par les bactéries au fur et à mesure de la culture, et sécrétée dans le surnageant (figure 4A)

- que l'AHL présente dans le milieu de culture peut rentrer dans les bactéries (tableau), et que cette entrée induit l'induction de la production de lumière (figure 4B), après un court temps de latence (10 min)

Question 6 :

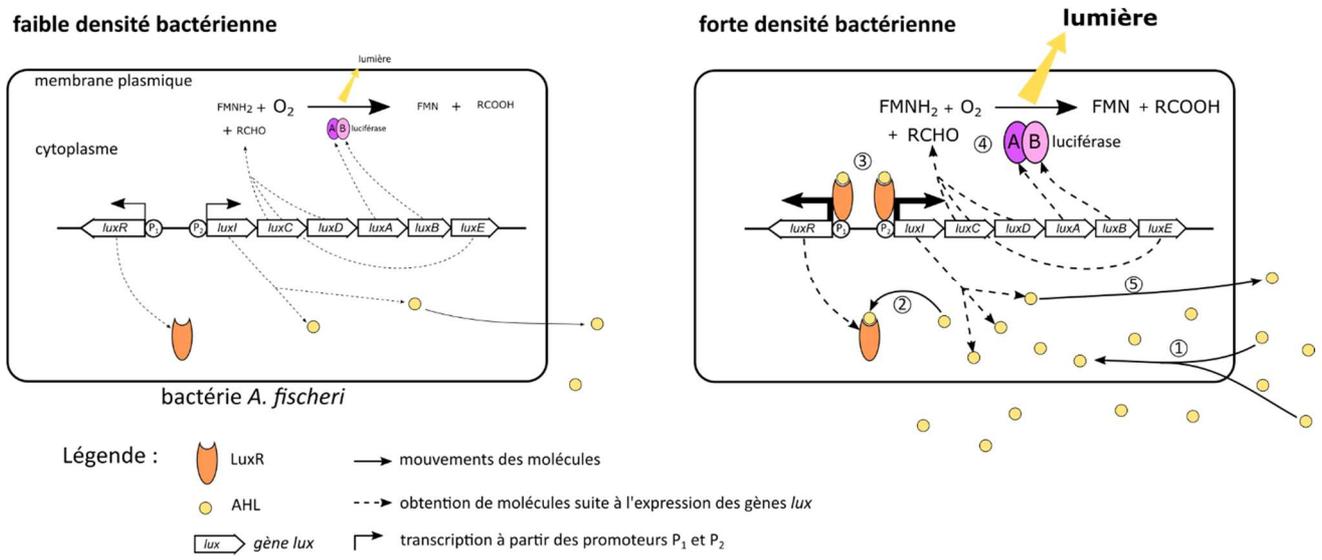
Si les phénotypes mutants ont généralement bien été analysés, de façon étonnante les candidats ont proposé des hypothèses beaucoup plus complexes que nécessaire : ainsi les gènes *luxA* et *luxB* ont été proposés comme « nécessaires à la production de la luciférase » ou encore « des facteurs de transcription permettant l'expression de la luciférase » alors que supposer qu'ils codaient les sous-unités de l'enzyme était beaucoup plus simple.

Question 7 :

L'expérience de retard sur gel a généralement été bien analysée et comprise par la plupart des candidats, même si certains ont proposé des interprétations fantaisistes (clivage du fragment d'ADN).

Question 8 :

De nombreux candidats ont proposé un schéma (généralement clair et bien annoté) montrant l'induction de l'expression de la région *lux*. En revanche, très peu sont arrivés à relier l'ensemble des résultats en montrant l'effet de la densité bactérienne. Exemple de figure pouvant être proposée :



Lorsque les bactéries sont en faible concentration (panneau de gauche), l'ensemble de la région *lux* est peu exprimée → peu de production de luciférase, et des substrats nécessaires à la production de lumière. Cette expression basale permet une petite production d'AHL (gène *lux I*) qui sort des bactéries et s'accumule dans le milieu.

L'augmentation de la concentration en AHL dans le milieu au fur et à mesure de la croissance bactérienne (panneau de droite) provoque son entrée dans les bactéries (1), sa fixation à LuxR (2) et la fixation du complexe sur les séquences Op des deux promoteurs P1 et P2 (3). Cela augmente la transcription des gènes *lux* et donc une importante production de LuxR, d'AHL, de la luciférase et de ses substrats (4) → sortie d'AHL et augmentation de sa concentration dans le milieu (5), emballement du système et production importante de lumière. Ce mécanisme, nommé quorum-sensing, permet d'adapter la production de lumière à la densité bactérienne : elle ne sera importante que lorsque les bactéries sont en concentration importante (dans le calamar), et non à l'état libre dilué.

Question 9 :

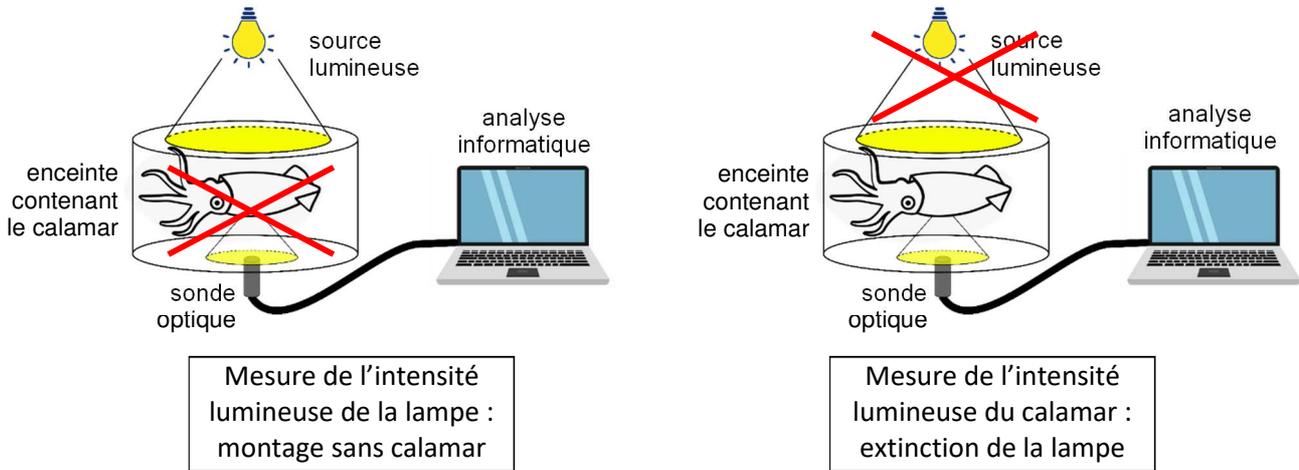
Cette question a été bien traitée par la grande majorité des candidats et l'hypothèse d'une symbiose mutualiste correctement formulée par la plupart.

Question 10 :

De nombreux candidats ont bien décrit le rythme circadien de production de lumière et formulé l'hypothèse d'une éjection des bactéries en fin de phase obscure.

Question 11 :

a. De façon surprenante, les candidats ont quasiment tous proposé un mode opératoire compliqué et peu réaliste basé sur une distinction des longueurs d'ondes utilisées, ce qui suggère une faible capacité de transposition des connaissances théoriques à la réalité concrète des expériences. La réalisation d'un montage sans calamar, et l'extinction de la lampe immédiatement avant les mesures permettait de mesurer indépendamment les intensités des deux sources lumineuses.



b. Peu de candidats se sont souvenu que cette espèce de calamar étant nocturne, les variations d'éclairage par le haut pendant la phase d'obscurité reproduisaient les variations de lumière provenant de la lune, en fonction de la présence de nuages par exemple.

c. La plupart des candidats n'ont pas compris la différence entre les variations d'éclairage sur 24h représentées sur la figure 9, qui peuvent s'expliquer par des variations de densité bactérienne (prolifération puis éjection par le calamar) et les variations très rapides montrées dans la figure 10 qui nécessitent une autre explication.

La question était très ouverte et tous les mécanismes compatibles avec un effet rapide sur l'émission de lumière ont été valorisés : remplissage/ vidange de la poche à encre faisant écran à la lumière, mouvement du réflecteur cachant la lumière, contraction de la lentille permettant une déviation de celle-ci...

Question 12 :

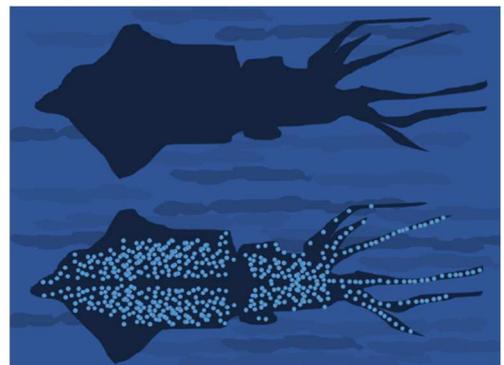
Parmi les candidats étant parvenus jusqu'à cette question, très rares ont été ceux capables de réaliser la synthèse de l'ensemble des résultats obtenus, et notamment de combiner le fait que la lumière est produite la nuit mais que son intensité dépend de celle de la lumière extérieure. Ainsi la plupart d'entre eux ont proposé que la lumière permettait d'attirer les proies de l'animal, ce qui ne rend pas compte du second élément. Certains candidats se sont égarés dans des explications fantaisistes selon lesquelles les bactéries (et même parfois le calamar) produisaient de l'énergie par absorption de lumière.

Quelques copies seulement ont proposé l'interprétation suivante :

A l'aube le calamar éjecte ses bactéries, la production de lumière s'arrête et il va s'enterrer dans le sable.

Pendant la journée, les bactéries prolifèrent grâce aux nutriments fournis par le calamar, et le phénomène du quorum-sensing permet la production efficace de lumière à la tombée de la nuit.

Durant la nuit le calamar va chasser en utilisant la bioluminescence des bactéries non pas comme source d'éclairage mais comme moyen de camouflage, par mécanisme de contre-illumination : la lumière qu'il produit l'empêche de former une ombre noire masquant la lumière de la lune → il est ainsi beaucoup moins facilement repérable par ses proies et ses prédateurs situés en-dessous de lui. L'animal est capable de contrôler rapidement l'intensité de la lumière qu'il émet en fonction des variations de la lumière extérieure (lune et nuages), ce qui rend la contre-illumination plus efficace (figure Wikipédia).



Partie D « Socialité chez les unicellulaires » : commentaires et éléments de réponse

Cette partie, souvent traitée en dernier, a été abordée moins en profondeur, voire pas du tout, par les candidats. Certains ont toutefois pu aller quasiment jusqu'aux dernières questions, avec des remarques pertinentes : félicitations à eux !

Question 1 :

La plupart des candidats ont proposé des hypothèses sur les avantages et inconvénients du processus décrit. De façon étonnante très peu ont indiqué que la mobilité du pseudoplasmode pouvait être un moyen d'échapper au milieu carencé. La possibilité de propagation des spores a en revanche été couramment présentée.

Question 2 :

a. De nombreux candidats ont analysé correctement la figure 2A, même si certains ont fait de grosses confusions entre le chimérisme réalisé et des notions de dominance/ récessivité/ homozygotie/ hétérozygotie inappropriées ici puisqu'il était clairement dit que les amibes restaient sous forme haploïde tout le long du cycle décrit.

b. La figure 2B a été bien décrite mais peu voire aucun candidat a conclu à une absence de mort cellulaire (puisque'il était dit qu'il n'y avait pas de division) au cours du processus. D'une façon générale pour cette partie, les témoins ont été analysés très superficiellement, possiblement par manque de temps.

c. De nombreux candidats ont proposé que la souche *dimA* était une souche « tricheuse » qui exploitait la souche sauvage en produisant davantage de spores à ses dépens.

Question 3 :

A nouveau la figure a été bien décrite mais pas forcément analysée très en profondeur. Un nombre assez important de candidats ont remarqué la contradiction de ces résultats avec les précédents.

Question 4 :

Rares sont les candidats qui sont arrivés jusqu'à cette question. Là encore, même si elle est correctement décrite par la plupart d'entre eux, peu ont réussi à l'interpréter en expliquant que la couleur bleue permettait de suivre le devenir des cellules de la zone pré-tige. La souche *dimA* apparaît alors comme une souche « tricheuse-perdante » car, bien que majoritaire dans la zone pré-spore, elle ne parvient pas à s'y maintenir et de nombreuses spores sauvages sont formées à partir de la zone pré-tige en contexte chimérique.

Question 5 :

De très rares candidats ont pu proposer un classement des différentes souches en trois catégories (mais aucun n'est allé jusqu'à en proposer des conséquences écologiques) :

(1) des tricheurs en contexte chimérique, avec une très bonne efficacité de sporulation en contexte normal (souche LAS2 par exemple). Dans la nature, ces souches ont toutes les raisons de survivre et risquent même de dominer la population au détriment des autres souches. On peut imaginer que ces souches ne sont trouvées que très localement, ou qu'elles sont affectées dans un autre processus (survie des amibes...) qui les empêchent de dominer la population.

(2) des tricheurs en contexte chimérique, avec une très mauvaise efficacité de sporulation en contexte normal (souche LAS3 ou *fbxA* par exemple). Ce sont des tricheurs obligatoires, on peut supposer que dans la nature, ils ne vivent qu'en association avec d'autres souches. Leur tricherie est tempérée par le fait qu'ils sporulent très mal tous seuls.

(3) des tricheurs perdants (faux tricheurs) en contexte chimérique, avec une bonne efficacité de sporulation en contexte normal (cas de *dimA* par exemple). Dans la nature, on peut supposer que ces souches vivent essentiellement seules et sont rapidement éliminées quand d'autres souches s'installent dans la population locale.

Pour réaliser ces exercices, les auteurs se sont librement inspirés des références suivantes :

Partie B :

Vatén et al., *Developmental Cell* (2011), 21 : 1144-1155
Yan, Yadav et al., *Nature Plants* (2019), 5(6) : 604-615
Müller et al., *Developmental Cell* (2015), 33 : 216-230
Bai et al., *Molecular Plant* (2014), 7(4) : 616-625

Partie C :

Boettcher et al., *J Comp Physiol A* (1996), 179:65-73
Devine et al., *Biochemistry* (1988), 27:837-842
Devine et al., *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* (1989), 86:5688-5692
Eberhard, *Journal of bacteriology* (1972), 109 (3):1101-1105
Engbrecht et al., *Cell* (1983), 32:773-781
Engbrecht & Silverman, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* (1984), 81:4154-4158
Graf & Ruby, *Microbiology* (1998), 95:1818-1822
Hastings & Greenberg, *Journal of bacteriology* (1999), 181(9):2667-2668
Jones & Nishiguchi, *Marine Biology* (2004) 144: 1151-1155
Kaplan & Greenberg, *Journal of bacteriology* (1985), 163(3):1210-1214
Mancini et al., *The Journal of Biological Chemistry* (1988), 263(28):14308-14314
Meighen, *Microbiological Reviews* (1991), 55(1):123-142
Nealson et al., *Journal of bacteriology* (1970), 104(1):313-322
Nealson, *Arch. Microbiol.* (1977), 112:73-79
Qin et al., *Journal of bacteriology* (2007), 189 (11):4127-4134
Visick et al., *American Society for Microbiology* (2000), 182(16):4578-4586

Partie D :

Foster et al., *Nature* (2004), 431 : 693-696
Santorelli et al., *Nature* (2008), 451 : 1108-1110