



**MINISTÈRES  
ÉDUCATION  
JEUNESSE  
SPORTS  
ENSEIGNEMENT  
SUPÉRIEUR  
RECHERCHE**

*Liberté  
Égalité  
Fraternité*

Direction générale des ressources humaines

## **RAPPORT DU JURY**

**SESSION 2025**

**Concours : Agrégation externe**

**Section : Sciences de la vie, sciences de la Terre et de l'Univers**

Rapport de jury présenté par : Cécile ROBIN, Professeure des universités  
Présidente du jury

# Rapport de jury

## Agrégation de SV-STU

### Session 2025

Cécile ROBIN, professeure des universités  
Présidente du Jury  
Hélène POUZET et Jean-Marc MOULLET, vice-présidents du Jury

#### **1. Présentation du concours**

- 1.1. Organisation et modalités du concours
  - 1.1.1 Épreuves écrites d'admissibilité
  - 1.1.2 Épreuves d'admission
- 1.2. Le déroulement du concours 2025
  - 1.2.1 Le calendrier
  - 1.2.2 Le déroulement pratique des épreuves d'admission du concours

#### **2. Quelques éléments statistiques**

- 2.1. De la candidature à l'admission
  - 2.1.1. Les candidats par secteurs
  - 2.1.2 Les candidats par sexe
  - 2.1.3 Âges des candidats
  - 2.1.4. Les candidats par statuts et/ou professions aux différentes étapes du concours
  - 2.1.5. Répartition géographique des candidats
  - 2.1.6. L'évolution du concours sur le long terme
- 2.2. Quelques données statistiques concernant l'écrit
  - 2.2.1. Épreuve écrite de secteur A
  - 2.2.2. Épreuve écrite de secteur B
  - 2.2.3. Épreuve écrite de secteur C
- 2.3. Quelques données statistiques concernant les épreuves pratiques
- 2.4. Quelques données statistiques concernant les épreuves d'admissibilité et d'admission pour les candidats admissibles

#### **3. Programme du concours**

#### **4. Épreuves écrites**

- 4.1. Epreuve écrite du secteur A
  - 4.1.1. Le sujet proposé
  - 4.1.2. Commentaires généraux sur l'épreuve
  - 4.1.3 Grille de notation
- 4.2. Epreuve écrite du secteur B
  - 4.2.1. Le sujet proposé
  - 4.2.2. Commentaires généraux sur la compréhension et le traitement du sujet
  - 4.2.3. Grille de notation
- 4.3. Epreuve écrite du secteur C

- 4.3.1. Le sujet proposé
- 4.3.2. Commentaires généraux sur l'épreuve
- 4.3.3 Grille de notation

## **5. Les épreuves pratiques**

- 5.1 Epreuve de travaux pratiques de spécialité du secteur A : Sujet et commentaires
- 5.2 Epreuve de travaux pratiques de spécialité du secteur B : Sujet et commentaires
- 5.3 Epreuve de travaux pratiques de spécialité du secteur C : Sujet et commentaires
- 5.4 Epreuve de travaux pratiques de contre-option du secteur A : Sujet et commentaires
- 5.5 Epreuve de travaux pratiques de contre-option du secteur B : Sujet et commentaires
- 5.6 Epreuve de travaux pratiques de contre-option du secteur C : Sujet et commentaires

## **6. Les Épreuves Orales**

- 6.1 Déroulement des épreuves
  - 6.1.1 Conditions de préparation
  - 6.1.2 Présentation et entretiens de la leçon d'option
  - 6.1.3 Présentation et entretiens de la leçon de contre-option
- 6.2 Constats et conseils pour les épreuves orales
  - 6.2.1 La leçon d'option : une épreuve de haut niveau scientifique visant à répondre à une problématique
  - 6.2.2 Le recul nécessaire pour traiter des thèmes plus ou moins classiques
  - 6.2.3 L'exploitation des documents imposés dans la leçon d'option
  - 6.2.4 Le choix et l'exploitation du matériel au service de la leçon (option et contre-option)
  - 6.2.5 Une démarche scientifique incontournable
  - 6.2.6 Un véritable travail de synthèse et de choix
  - 6.2.7 Une communication d'une qualité suffisante
  - 6.2.8 Une indispensable réactivité
  - 6.2.9 Les critères d'évaluation des leçons
- 6.3 Commentaires particuliers concernant les leçons de secteur A
  - 6.3.1 Maitriser les connaissances
  - 6.3.2 Intégrer de nouvelles connaissances pendant la préparation de la leçon
  - 6.3.3 Organiser l'exposé
  - 6.3.4 Travailler à toutes les échelles et construire le sens biologique
  - 6.3.5 S'appuyer sur du réel pour illustrer la leçon
  - 6.3.6 Adopter une démarche scientifique dans l'exploitation des documents
  - 6.3.7 Adopter une démarche didactique
  - 6.3.8 Maitriser l'oral
  - 6.3.9 Rester mobilisé pour les entretiens
- 6.4 Commentaires particuliers concernant les leçons de secteur B
  - 6.4.1 Des connaissances naturalistes à privilégier sans négliger les connaissances de base
  - 6.4.2 Exploitation du matériel et intégration dans l'exposé
- 6.5 Commentaires particuliers concernant les leçons de secteur C
  - 6.5.1 Connaissances scientifiques
  - 6.5.2 Organisation de l'exposé / Démarche
  - 6.5.3 Exploitation des documents fournis et des documents complémentaires
  - 6.5.4 Communication

- 6.6 Liste des leçons d'option de la session 2025
- 6.7 Liste des leçons de contre-option de la session 2025

# 1. Présentation du concours

## 1.1. Organisation et modalités du concours

Le concours comporte des épreuves écrites d'admissibilité constituées de trois compositions et des épreuves d'admission constituées de deux épreuves de travaux pratiques et de deux épreuves orales.

Lors de l'inscription, le candidat formule **un choix irréversible** se rapportant au champ disciplinaire principal sur lequel porteront les épreuves d'admissibilité. Trois secteurs (A, B ou C) sont ouverts au choix des candidats et détaillés ci-dessous.

Les modalités d'organisation du concours découlent de **l'arrêté du 28 décembre 2009 fixant les modalités des concours de l'agrégation.**

Le champ disciplinaire de l'agrégation externe de Sciences de la Vie - Sciences de la Terre et de l'Univers couvre les trois secteurs suivants :

- secteur A : biologie et physiologie cellulaires, biologie moléculaire ; leur intégration au niveau des organismes ;
- secteur B : biologie et physiologie des organismes et biologie des populations, en rapport avec le milieu de vie ;
- secteur C : sciences de la Terre et de l'Univers, interactions entre la biosphère et la planète Terre.

Le programme du concours concerne l'ensemble des épreuves d'admissibilité et d'admission. Il est réparti en connaissances générales et connaissances de spécialité. Le niveau des connaissances générales correspond à la Licence universitaire. Le programme de spécialité porte alors sur des connaissances de niveau Master.

Les Sciences de la Vie sont présentées de façon groupée, la répartition entre secteurs A et B est indiquée à la fin de la présentation générale des Sciences de la Vie. Les multiples facettes des SV-STU ne peuvent pas être toutes connues d'un candidat. Le programme limite donc le champ d'interrogation possible en occultant certaines questions et/ou en réduisant leur volume. Dans de nombreux cas, des exemples apparaissent qui semblent les plus appropriés, ce qui n'exclut pas d'en choisir d'autres tout en connaissant ceux qui sont explicitement indiqués.

### 1.1.1 Épreuves écrites d'admissibilité.

Les trois épreuves écrites d'admissibilité portent chacune sur un secteur différent.

Elles peuvent comporter ou non une analyse de documents :

- 1° Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur A (durée : cinq heures ; coefficient 2).
- 2° Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur B (durée : cinq heures ; coefficient 2).
- 3° Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur C (durée : cinq heures ; coefficient 2).

### 1.1.2 Épreuves d'admission.

**1° Épreuve de travaux pratiques** portant, sur le programme du secteur choisi par le candidat lors de son inscription : A, B ou C (durée : six heures ; coefficient 3).

**2° Épreuve de travaux pratiques portant sur les programmes de connaissances générales correspondant aux secteurs n'ayant pas fait l'objet de la première épreuve d'admission** (durée : quatre heures ; coefficient 2).

**3° Épreuve orale** portant sur le programme du secteur choisi par le candidat lors de l'inscription pour la première épreuve d'admission. L'ordre de passage des candidats et les intitulés de leçons sont associés de façon aléatoire par la présidence du concours.

- durée de la préparation : quatre heures
- durée de l'épreuve : une heure et vingt minutes maximum [présentation orale et pratique : cinquante minutes maximum ; entretien avec le jury : trente minutes maximum]
- coefficient 5.

**4° Épreuve orale** portant sur les programmes des connaissances générales des deux autres secteurs hors le secteur choisi par le candidat. L'ordre de passage des candidats et les intitulés de leçons sont associés de façon aléatoire par la présidence du concours.

Le sujet porte :

sur le programme des connaissances générales et sur des questions scientifiques d'actualité se rapportant au secteur B et C pour les candidats ayant choisi, lors de l'inscription, le secteur A pour la première épreuve d'admission ;

sur les programmes des connaissances générales et sur des questions scientifiques d'actualité se rapportant aux secteurs A et C pour les candidats ayant choisi, lors de l'inscription, le secteur B pour la première épreuve d'admission ;

sur les programmes des connaissances générales et sur des questions scientifiques d'actualité se rapportant aux secteurs A et B pour les candidats ayant choisi, lors de l'inscription, le secteur C pour la première épreuve d'admission.

- Durée de la préparation : quatre heures.
- Durée de l'épreuve : une heure et dix minutes maximum, [présentation orale et pratique : quarante minutes maximum ; entretien avec le jury : trente minutes]
- coefficient 4.

Ces modalités sont résumées dans le tableau 1

	Durée	Coefficients	Nombre de points
<b>1. Épreuves écrites d'admissibilité</b>			
1.1. Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur A	5h	2	40
1.2. Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur B	5h	2	40
1.3. Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur C	5h	2	40
<b>Total des épreuves écrites</b>			<b>120</b>
<b>2. Épreuves d'admission</b>			
2.1 Épreuves de travaux pratiques			
2.1.1 Épreuve portant sur le programme du secteur choisi (secteur A, B ou C suivant le choix du candidat)	6h	3	60
2.1.2 Épreuve portant sur le programme général des deux autres secteurs	4h	2	40
<b>Total des épreuves pratiques</b>			<b>100</b>
2.2 Épreuve orales			
2.2.1 Épreuve portant sur le programme du secteur choisi (secteur A, B ou C suivant le choix du candidat)	4h + 50 min.+ 30 min.	5	100
2.2.2 Épreuve portant sur le programme général des deux autres secteurs	4h + 40 min.+ 30 min	4	80
<b>Total des épreuves orales</b>			<b>180</b>
<b>Total général</b>		<b>20</b>	<b>400</b>

Tableau 1. Les modalités du concours

## 1.2. Le déroulement du concours 2025

### 1.2.1 Le calendrier

#### Admissibilité : épreuves écrites

- lundi 10 mars 2025 : épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur A,
- mardi 11 mars 2025 : épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur B,
- mercredi 12 mars 2025 : épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur C.

Les résultats de l'admissibilité ont été publiés le 30 avril 2025 à 11 h 30

### **Admission : épreuves pratiques**

- vendredi 6 juin 2025 : accueil des candidats des secteurs A, B et C,
- samedi 7 juin 2025 : travaux pratiques portant sur le programme de spécialité (secteur A, ou B, ou C),
- dimanche 8 juin 2025 : travaux pratiques portant sur le programme général des deux autres secteurs.

### **Admission : épreuves orales**

- du mercredi 18 juin 2025 au dimanche 29 juin 2025.

Les résultats de l'admission ont été publiés le lundi 30 juin 2025 à 16 h.

#### **1.2.2 Le déroulement pratique des épreuves d'admission du concours**

Les questions administratives à toutes les étapes du concours ont été réglées avec l'aide très efficace des personnes des services de la DGRH. Les questions financières et matérielles du concours ont été résolues grâce au soutien du Service Inter-Académique des Examens et Concours.

Les épreuves pratiques se sont déroulées au Centre de Formation Pratique en Biologie (CFPB) de la Faculté des Sciences et Ingénierie de Sorbonne Université (4 place de Jussieu, 75005 Paris) pour les candidats des secteurs A et B, et au laboratoire de SVT du Lycée Saint-Louis (44 boulevard Saint-Michel, 75006 Paris) pour ceux du secteur C.

D'excellentes conditions matérielles ont été offertes dans les locaux du bâtiment Atrium grâce à l'obligeance de la personne responsable du CFPB.

Il en fut de même au Lycée Saint-Louis grâce au soutien de Madame la Proviseure, de Madame l'Intendante et de toute l'équipe d'intendance et d'administration.

Les épreuves orales se sont déroulées au Lycée Saint-Louis (44 boulevard Saint Michel, 75006 Paris) grâce à l'accueil de toutes les personnes citées ci-dessus. Le bon fonctionnement des épreuves orales a été permis grâce à l'aide de personnels techniques de loge et d'entretien. Le Lycée Henri IV a prêté une partie du matériel utilisé par les candidats pendant leurs épreuves orales. Des équipements EXAO ont été fournis par les établissements Jeulin et Sordalab. Pour le bon fonctionnement des épreuves d'admission, le bureau du concours a pu s'appuyer sur une équipe technique de grande qualité, qui comportait des personnels de Sorbonne Université, équipe à laquelle se sont joints un professeur de CPGE du Lycée St Louis, deux professeurs agrégés des Lycées Gustave Eiffel de Gagny et du lycée Assomption-Bellevue de Lyon. 16 personnels de laboratoires travaillant dans le secteur des Sciences de la Vie et de la Terre dans différents lycées de la France métropolitaine.

Ce groupe a fait preuve comme à chaque session de grandes compétences, d'efficacité, d'une grande conscience professionnelle et d'un dynamisme de tous les instants, permettant ainsi un déroulement des épreuves des travaux pratiques du concours dans des conditions optimales malgré des contraintes matérielles qui imposaient un travail sur deux sites (Lycée Saint-Louis, Sorbonne Université) pour les épreuves de travaux pratiques. De plus, la même équipe a assuré dans un délai très court la préparation des salles, des collections, de la bibliothèque et du matériel informatique nécessaire à l'oral sur le site du Lycée Saint-Louis.

L'investissement personnel et le dévouement de l'ensemble de cette équipe se sont particulièrement manifestés vis-à-vis des candidats par un accueil et un suivi chaleureux et bienveillant pendant la préparation des leçons tout en gardant la réserve indispensable à l'équité du concours. Cette approche, associée à une coopération permanente avec les membres du jury des différentes commissions, a permis le bon déroulement de la session dans un esprit permettant aux candidats de faire valoir leurs qualités dans les meilleures conditions.



## 2. Quelques éléments statistiques

### 2.1 De la candidature à l'admission

#### 2.1.1 Les candidats par secteurs

##### Candidats inscrits 975

**304 candidats se sont inscrits en secteur A**

**372 candidats se sont inscrits en secteur B**

**299 candidats se sont inscrits en secteur C**

##### Candidats présents aux 3 écrits : 499 soit 51,8 % des inscrits

Candidats présents pour chaque épreuve écrite

Écrit secteur A	538
Écrit secteur B	510
Écrit secteur C	505

##### Candidats admissibles 160 soit 17 % des inscrits et 35 % des présents aux trois écrits

Secteur A	36	22,5 % des admissibles
Secteur B	68	42,5 % des admissibles
Secteur C	56	35 % des admissibles

##### Candidats admis 77 soit 48,1 % des admissibles

15,2 % des présents aux 3 écrits et 7,9 % des inscrits

Secteur A	14	18,7 % des admis
Secteur B	40	53,3 % des admis
Secteur C	21	28 % des admis

La totalité des postes mis au concours (77) a été pourvue.

Tout au long du concours l'égalité de traitement des candidats selon les secteurs a été assurée par des harmonisations adaptées aux différentes épreuves, reposant sur les modalités d'évaluation ainsi que de la qualité des prestations et non pas sur la recherche d'une répartition proportionnelle au nombre de candidats en lice.

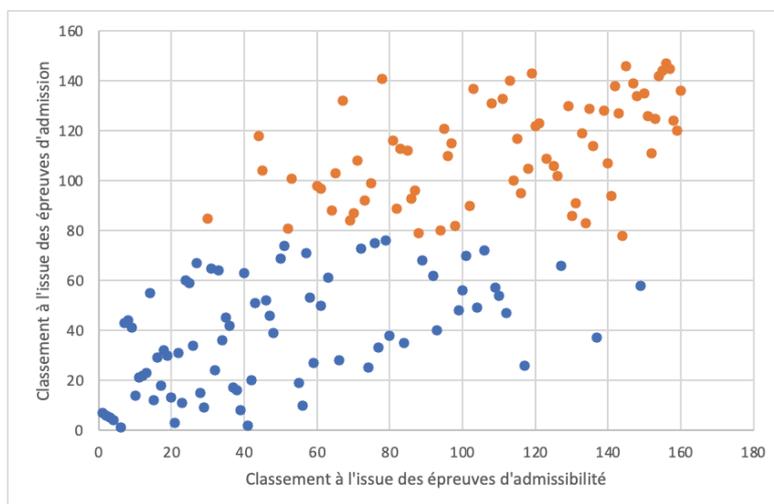
Pour cette session, la barre d'admissibilité est de 7,83/20. La moyenne des candidats qui ont présenté les trois épreuves écrites est de 6/20 et celle des admissibles est de 11,14/20. Les meilleurs candidats obtiennent de très bons résultats aux trois épreuves. Le jury souligne la grande homogénéité et les très bons résultats des candidats classés dans les 50 premiers après les écrits.

Pour l'admission, à l'issue de l'ensemble des épreuves, la moyenne de l'ensemble des candidats a été de 9,3 et celle des candidats admis de 11,17. La barre d'admission a été de 8,82/20.

Tout au long des épreuves du concours, les compétences scientifiques et pédagogiques des candidats sont les principaux critères d'évaluation. Lors des épreuves d'admissibilité, il est attendu des candidats qu'ils soient capables de présenter des connaissances structurées, qui viennent soutenir des démonstrations et des raisonnements qui permettent de répondre à une question scientifique énoncée clairement en introduction. Si les épreuves écrites servent à écarter des candidats dont les connaissances et compétences scientifiques sont jugées trop faibles, les épreuves pratiques et orales permettent au jury de sélectionner ceux qui manifestent de la façon la plus évidente des qualités de futurs enseignants. Dans les deux types d'épreuves, il est attendu du candidat qu'il démontre rigueur scientifique et aptitudes pédagogiques.

Chaque année, il est rappelé que toutes les épreuves ont leur importance, notamment lors de l'admission. Il est d'ailleurs très intéressant de noter que les épreuves pratiques et orales peuvent avoir un effet reclassant spectaculaire. Cela s'exprime dans le graphe suivant sur l'évolution du rang entre les épreuves

d'admissibilité et à l'issue de l'admission. Trois candidats placés au-delà de la 120<sup>e</sup> place à l'écrit ont été admis et un candidat termine le concours à la 59<sup>e</sup> place alors qu'il était 144<sup>e</sup> à l'issue des écrits. Il faut rappeler ici qu'à la suite de l'abandon des candidats ayant obtenu l'agrégation interne et de la démission de deux candidats seuls 147 candidats ont présenté les épreuves d'admission. Être reçu au concours 59<sup>e</sup> après avoir été classé 144<sup>e</sup> à l'écrit montre toute l'importance des épreuves d'admission de ce concours !



*La ligne bleu horizontale symbolise la barre d'admission à la 77<sup>e</sup> place du concours.*

Il est donc essentiel de souligner que le concours est un processus long et qu'il ne faut jamais baisser les bras ou se relâcher avant la fin. À ce propos une candidate voulait abandonner le concours lors de sa dernière épreuve, le jury a réussi à la convaincre de présenter son oral et elle le termine le concours reçue et très bien classée ! On ne doit jamais abandonner dans un concours !

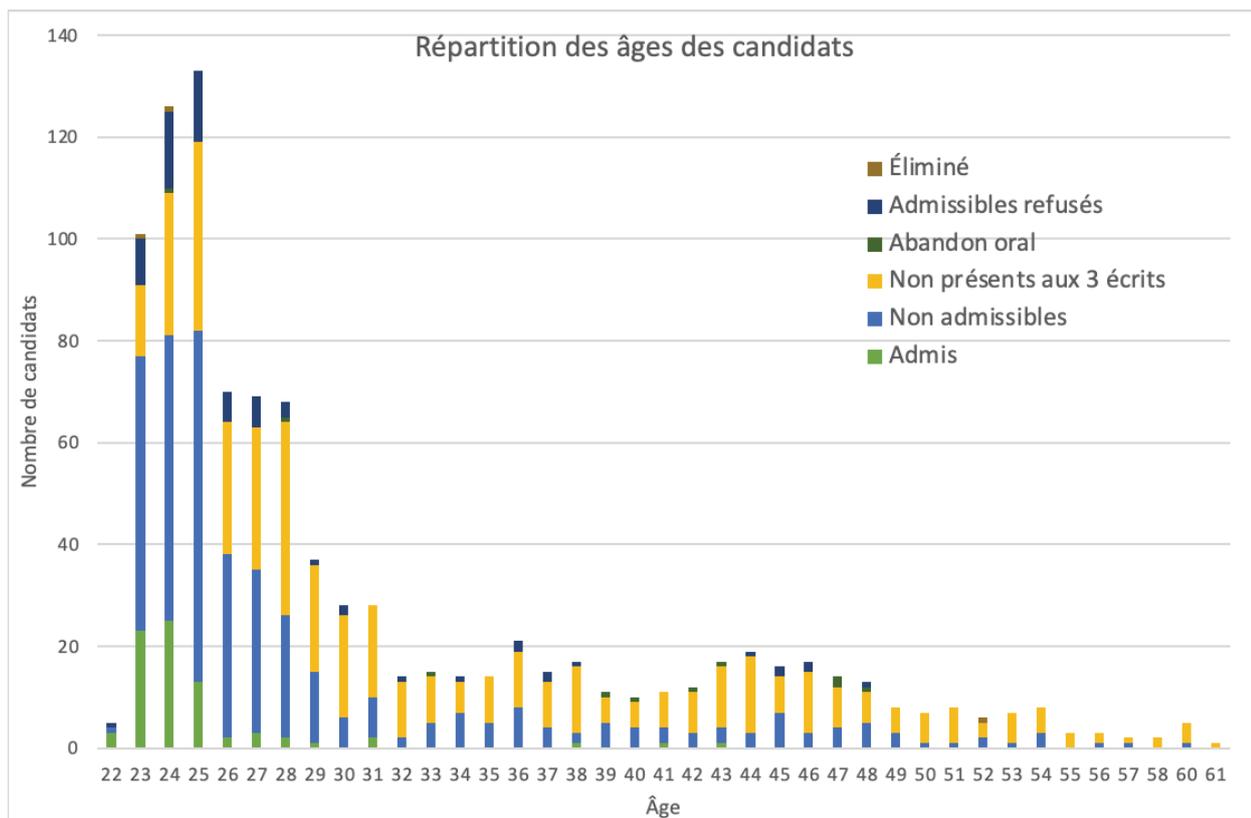
### 2.1.2 Les candidats par sexe

Répartition	Inscrits	Présents aux trois épreuves	Admissibles	Présents aux épreuves orales	Admis
♀	603 soit 62 %	305 soit 61 %	90 soit 56 %	81 soit 55 %	41 soit 53 %
♂	372 soit 38 %	194 soit 39 %	70 soit 44 %	66 soit 45 %	36 soit 47 %

La répartition des candidats par sexe est nettement en faveur des femmes pour les admissibles, conformément au ratio des inscrits. Cette répartition ne se maintient pas tout au long du concours ce qui représente une particularité de cette session.

### 2.1.3 Âges des candidats

Bien que les inscrits, et même les candidats se répartissent sur une large gamme d'âges, force est de constater que l'agrégation externe reste un concours réussi par des étudiants assez jeunes comme le montrent les histogrammes ci-dessous qui reprennent la distribution des âges en fonction des inscrits, des candidats éliminés (non présents aux trois épreuves écrites), des candidats admissibles et des candidats admis. En effet, l'immense majorité des lauréats sont soit en M2 (âge 22 à 23 ans) soit en année de préparation à l'agrégation post-master (âge de 22 à 24 ans). Les lauréats plus âgés sont logiquement moins nombreux, mais 12 professeurs titulaires et stagiaires passent et réussissent le concours de l'agrégation externe.



#### 2.1.4 Les candidats par statuts et/ou professions aux différentes étapes du concours :

	Total général	Non présents aux 3 écrits	Non admissibles	Abandon épreuves orales	Refusé après l'oral	Admis
<b>Agent Fonction Publique État Autres Ministères</b>	25	14	7		2	2
<b>Agent Fonction Publique Hospitalière</b>	5	5				
<b>Agent Fonction Publique Territoriale</b>	2	2				
<b>Agent MEN S/Contrat Droit Privé</b>	2	1		1		
<b>Agent Non titulaire du MEN</b>	134	78	51	1	3	1
<b>Elève d'une ENS</b>	30		3		4	23
<b>Enseignant Enseignement Privé</b>	16	11	5			
<b>Enseignant Titulaire MEN</b>	335	187	107	8	25	8
<b>Enseignant-CPE-COP Stagiaire</b>	62	26	25		7	4
<b>Étudiant</b>	277	91	117	3	28	38
<b>Hors Fonction Publique / Sans Emploi</b>	87	61	24		1	1
<b>Total général</b>	<b>975</b>	<b>476</b>	<b>339</b>	<b>13</b>	<b>70</b>	<b>77</b>

Si les candidats inscrits ont des statuts variés, cette variété est bien moindre parmi les admis.

En effet, les admis se répartissent en 2 grandes catégories : 69 sont étudiants, soit 92 % (masters disciplinaires hors ESPE ou année de préparation à l'agrégation ou élèves ENS), et 6 sont enseignants (stagiaires, professeur certifié ou contractuels) soit 8 %. Cette année un seul professeur certifié a été reçu à l'agrégation externe.



### 2.1.5 Répartition géographique des candidats :

Étiquettes de lignes	Total général	Non présents aux 3 écrits	Non admissibles	Abandon épreuves orales	Refusé après l'oral	Admis
ACADÉMIE D'AIX MARSEILLE	57	30	16	1	6	4
ACADÉMIE D'AMIENS	24	10	12	1		1
ACADÉMIE D'ORLÉANS-TOURS	30	20	9			1
ACADÉMIE DE BESANCON	18	8	9		1	
ACADÉMIE DE BORDEAUX	43	17	17		5	4
ACADÉMIE DE CLERMONT-FERRAND	17	11	5		1	
ACADÉMIE DE CORSE	4	1	2		1	
ACADÉMIE DE DIJON	13	6	5	1	1	
ACADÉMIE DE GRENOBLE	25	16	6		3	
ACADÉMIE DE LA GUADELOUPE	13	11	2			
ACADÉMIE DE LA GUYANE	9	6	3			
ACADÉMIE DE LA MARTINIQUE	11	7	4			
ACADÉMIE DE LA NOUVELLE CALÉDONIE	1	1				
ACADÉMIE DE LA POLYNÉSIE FRANCAISE	3	1	2			
ACADÉMIE DE LA RÉUNION	11	8	1	1	1	
ACADÉMIE DE LILLE	43	22	17		4	
ACADÉMIE DE LIMOGES	6	5	1			
ACADÉMIE DE LYON	75	23	20	1	6	25
ACADÉMIE DE MAYOTTE	6	3	3			
ACADÉMIE DE MONTPELLIER	23	7	12		1	3
ACADÉMIE DE NANCY-METZ	28	13	9	2	3	1
ACADÉMIE DE NANTES	30	22	6		1	1
ACADÉMIE DE NICE	21	14	7			
ACADÉMIE DE NORMANDIE	41	19	20		1	1
ACADÉMIE DE PARIS	1	1				
ACADÉMIE DE POITIERS	27	14	11	1	1	
ACADÉMIE DE REIMS	23	12	9		2	
ACADÉMIE DE RENNES	56	19	33		1	3
ACADÉMIE DE STRASBOURG	38	10	14		4	10
ACADÉMIE DE TOULOUSE	42	24	15		1	2
SIEC - ACADÉMIES DE CRETEIL PARIS VERSAILLES	236	115	69	5	26	21
<b>Total général</b>	<b>975</b>	<b>476</b>	<b>339</b>	<b>13</b>	<b>70</b>	<b>77</b>

Les candidatures se répartissent dans de très nombreuses académies. Cependant, il est frappant de constater le contraste entre ce nombre et celui, beaucoup plus modeste, des académies qui présentent des candidats admis. Sur les 30 secteurs géographiques qui présentent des candidats, 20 ont des candidats admissibles et seuls 13 ont des admis.

À y regarder de près, on remarque que les différences académiques sont marquées dès l'admissibilité. Le mouvement de concentration des centres de préparation à l'agrégation de SV-STU, amorcé depuis plusieurs années, se retrouve cette année encore. La haute technicité du concours et des stratégies universitaires spécifiques de préparation aux concours de recrutement expliquent ce phénomène.

## 2.1.6 L'évolution du concours sur le long terme

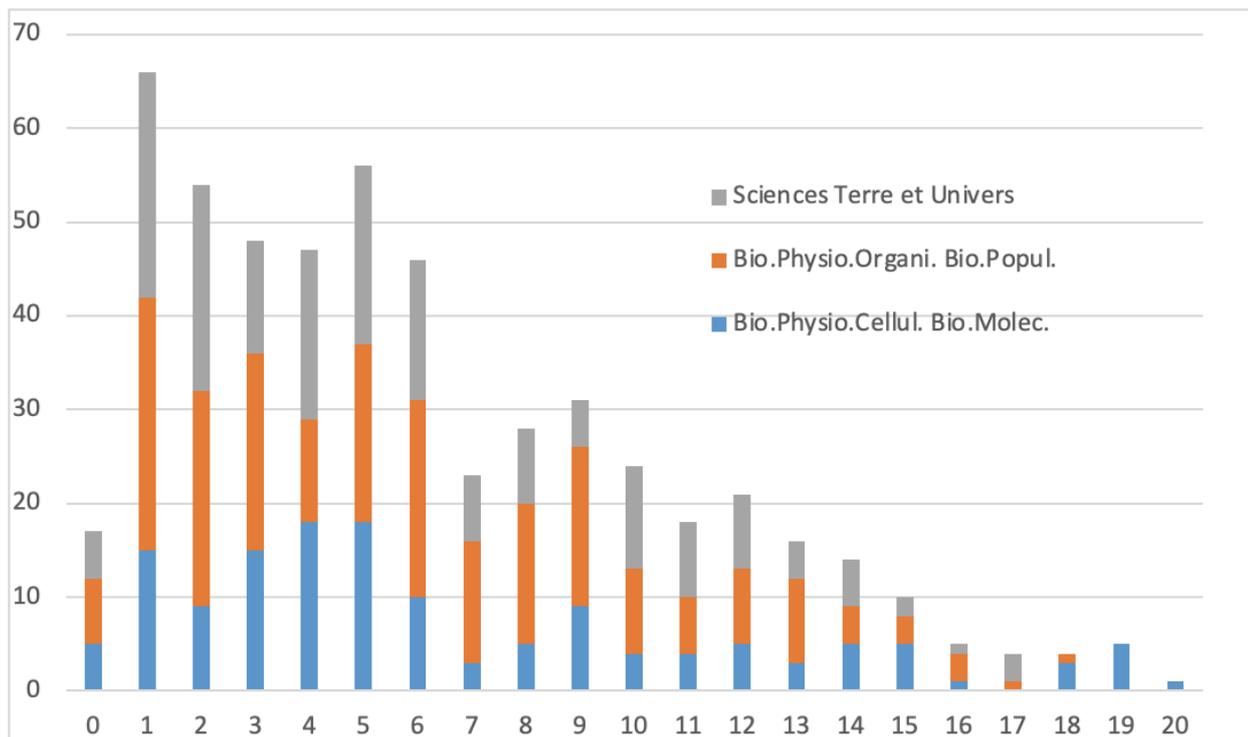
année	nombre de postes mis au concours	nombre d'inscrits	nombre de présents	nombre d'admissibles	nombre d'admis	liste complémentaire
1993	154	1439	819	233	148	Non
1994	154	1581	950	241	154	Non
1995	154	1770	1034	242	142	Non
1996	154	2041	1252	245	154	Non
1997	130	2273	1473	245	130	Non
1998	150	2416	1413	240	150	Non
1999	155	2477	1491	257	155	Non
2000	160	2678	1749	278	160	Non
2001	165	2924	1828	276	165	Non
2002	177	2521	1537	346	177	6
2003	198	2440	1553	378	198	Non
2004	160	2793	1733	334	160	Non
2005	160	2921	1827	334	160	Non
2006	105	3075	1707	257	105	Non
2007	105	2704	1489	259	105	Non
2008	87	2300	1420	217	87	Non
2009	87	1858	1056	196	87	Non
2010	80	1766	928	180	80	Non
2011	65	1354	592	145	65 (+1)	Non
2012	70	1535	636	155	70	Non
2013	80	1729	705	180	80	Non
2014	85	1455	650	190	85	Non
2015	101	1308	650	234	101	Non
2016	103	1464	640	231	103	Non
2017	95	1494	662	225	95	Non
2018	76	1359	578	178	76	Non
2019	65	1217	548	149	65	Non
2020	65	1099	492	140	65	Non
2021	65	1046	484	145	65	Non
2022	65	919	445	146	65	4
2023	70	873	431	151	70	Non
2024	75	937	443	160	75	Non
2025	77	975	505	160	77	Non

## 2.2 Quelques données statistiques concernant l'écrit

Il va de soi que ces valeurs décrivent plus les modalités adoptées pour l'harmonisation (calage des médianes et des écarts types tout en exploitant toute la gamme des notes disponibles) qu'un résultat à commenter.

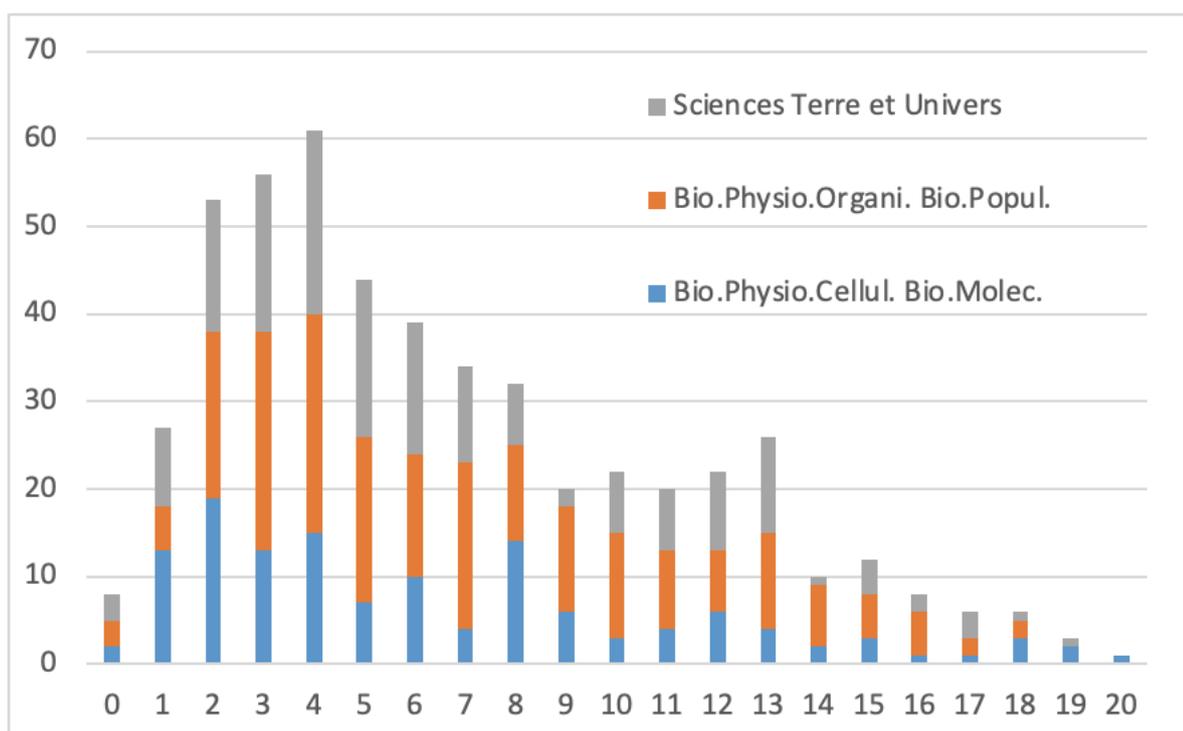
### 2.2.1 Épreuve écrite de secteur A

**Histogramme des notes de l'épreuve écrite de secteur A pour les candidats non admissibles, les candidats admissibles non admis et les candidats admis avec leur choix de spécialité**



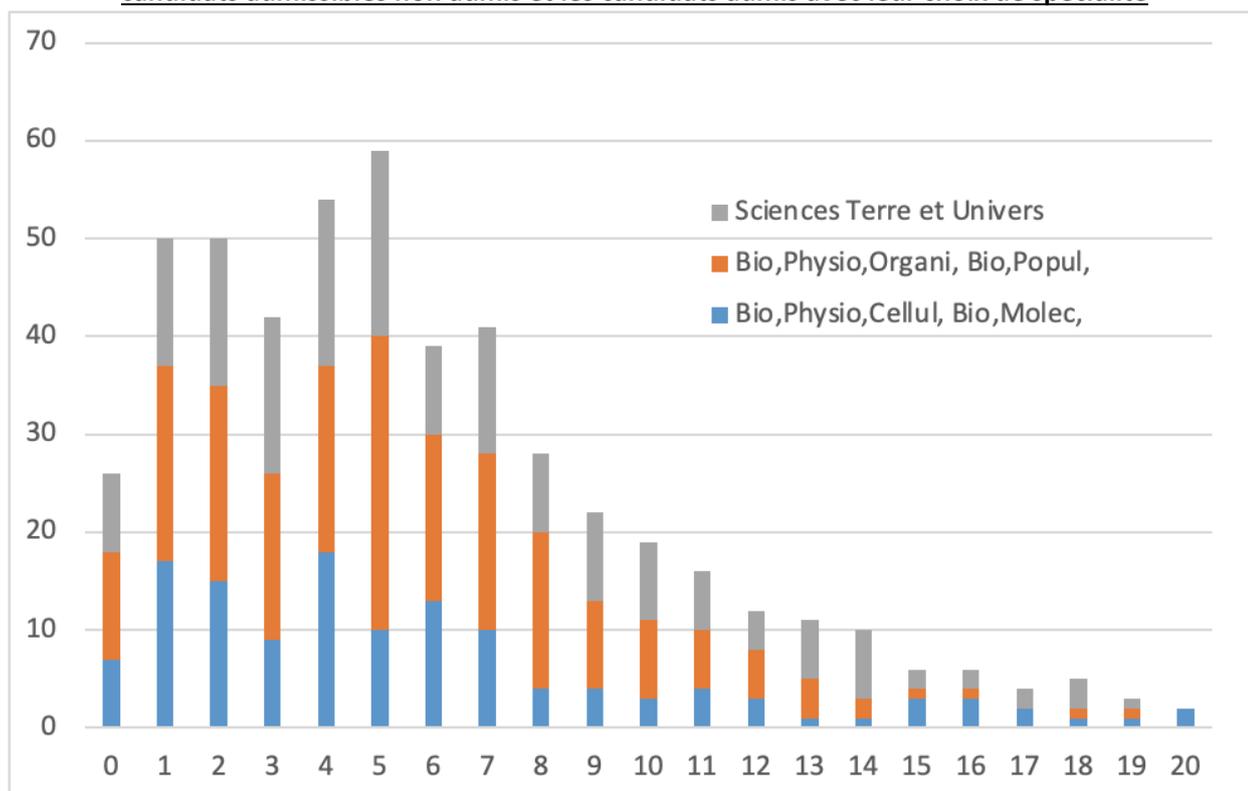
### 2.2.2 Épreuve écrite de secteur B

**Histogramme des notes de l'épreuve écrite de secteur B pour les candidats non admissibles, les candidats admissibles non admis et les candidats admis avec leur choix de spécialité**



## 2.2.3 Épreuve écrite de secteur C

**Histogramme des notes de l'épreuve écrite de secteur C pour les candidats non admissibles, les candidats admissibles non admis et les candidats admis avec leur choix de spécialité**



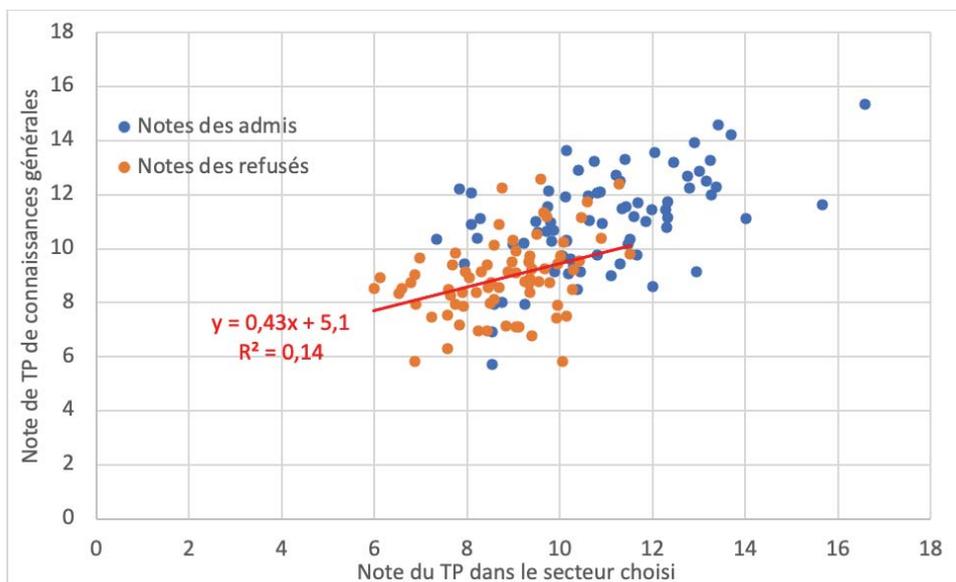
## 2.3 Quelques données statistiques concernant les épreuves pratiques

	TP sur le programme de spécialité secteur A	TP sur le programme de spécialité secteur B	TP sur le programme de spécialité secteur C	TP sur le programme de connaissances générales secteur A	TP sur le programme de connaissances générales secteur B	TP sur le programme de connaissances générales Secteur C
<b>Moyenne</b>	10	10	10	10,45	9,86	9,85
<b>Écart type</b>	2,38	1,54	1,91	2,04	1,83	1,95
<b>Max</b>	<b>16,57</b>	<b>13,26</b>	<b>15,66</b>	<b>15,36</b>	<b>13,63</b>	<b>13,92</b>
<b>Min</b>	<b>5,99</b>	<b>6,11</b>	<b>6,6</b>	<b>5,82</b>	<b>5,73</b>	<b>6,77</b>

Le graphique suivant montre le nuage de points obtenus en mettant en relation la note du TP de spécialité et la note du TP sur connaissances générales obtenues par chaque candidat :

$$f(\text{note du TP sur connaissances générales}) = \text{note du TP de spécialité.}$$

Le jury note que les deux épreuves ont abouti à une hétérogénéité de notes plus forte que les années précédentes, en lien avec la diversité des compétences testées. ( $R^2=0,14$ ). Le jury rappelle que la somme des coefficients des épreuves de travaux pratiques atteint 5 et que celles-ci jouent un rôle important pour l'admission.



## 2.4 Quelques données statistiques concernant les épreuves d'admissibilité et d'admission pour les candidats admissibles

	Ensemble des candidats	Secteur A	Secteur B	Secteur C
Moyenne écrit	11,14	12,58	10,45	11,06
Moyenne ensemble des candidats écrit A	11,14	13,62	10,43	10,4
Meilleure moyenne écrit A	19,84	19,84	17,8	17,45
Plus basse moyenne écrit A	1,55	5,18	3,09	1,55
Moyenne ensemble des candidats écrit B	11,73	12,68	11,61	11,26
Meilleure moyenne écrit B	19,65	19,65	18,01	18,8
Plus basse moyenne écrit B	3,5	5,57	5,8	3,5
Moyenne ensemble des candidats écrit C	10,57	11,45	11,52	11,52
Meilleure moyenne écrit C	19,97	19,97	18,99	19,49
Plus basse moyenne écrit C	3,7	3,7	4,23	4,36
Moyenne TP secteur	10	10,01	10	9,99
Note max TP secteur	16,57	16,57	13,26	15,66
Note min TP secteur	5,99	5,99	6,11	6,6
Moyenne TP con. générales	10	10,45	9,86	9,85
Note max TP con. générale	15,36	15,36	13,625	13,92
Note min TP con. générale	5,73	5,82	5,73	6,775
Moyenne oral secteur choisi	7,44	8,16	7,55	6,87
Note max oral secteur choisi	19,2	20	19,2	19,2
Note min oral secteur choisi	1,8	1,2	1	1,6
Moyenne oral con. générales	7,93	8,25	7,92	7,75
Note max oral con. générales	20	20	19,2	19,2
Note min oral con. générales	1	1,2	1	1,6
Moyenne des admissibles	9,3	10,02	9,09	9,07
Meilleure moyenne des admissibles	17,1	17,1	15,23	15,81
Plus basse moyenne des admissibles	4,98	4,98	5,34	5,54



# 3. Programme du concours

Ce programme est disponible sur le site du Ministère de l'Éducation Nationale à l'adresse suivante :

<https://www.devenirenseignant.gouv.fr/media/9898/download>

Le programme de l'agrégation externe des Sciences de la Vie-Sciences de la Terre et de l'Univers (SV-STU) précise le socle des connaissances sur lesquelles les épreuves du concours sont élaborées. Cependant, il convient de bien rappeler que les connaissances ne sont pas une fin en soi et que les éléments du programme sont avant tout à considérer comme des outils à la disposition des candidats pour faire la démonstration de leurs compétences de scientifiques et de futurs enseignants.

Le programme est présenté sous la forme de paragraphes qui ne doivent pas cloisonner des domaines qui gagnent à être mis en relation. De même si le jury est attentif lors des épreuves d'admission au secteur choisi par les candidats, il est attendu, quand cela est pertinent, que des liens entre des secteurs disjoints puissent être effectués (changement d'échelle, de temps et d'espace par exemple).

Le haut niveau scientifique de l'agrégation nécessitera donc du candidat qu'il fasse la démonstration de sa maîtrise des différents éléments d'une démarche scientifique tout au long des épreuves du concours. Si les épreuves d'admissibilité se concentrent avant tout sur la capacité du candidat à organiser ses idées autour d'une problématique justifiée et construite selon une stratégie rigoureuse et raisonnée, les épreuves d'admission vérifient ses compétences scientifiques et pédagogiques exprimées en temps réel dans des épreuves pratiques ou des exposés oraux.

Tout au long des épreuves du concours, le jury aura le souci de faire travailler les candidats sur des documents scientifiques originaux qui peuvent donc (depuis la session 2018) être rédigés en langue anglaise.

# 4. Épreuves écrites

Remarque : un travail de cohérence et de coordination des grands principes de notation a été mené dans le cadre des 3 sujets d'écrit.

## 4.1 Épreuve écrite du secteur A :

### 4.1.1 Le sujet proposé

#### « Du Génome au Transcriptome.

*Une attention particulière sera portée à la démonstration expérimentale des concepts à partir d'exemples concrets. »*

### 4.1.2 Commentaires généraux sur l'épreuve

#### **Rappels sur les attendus du secteur A**

Le sujet portait sur des notions classiques du programme de secteur A, contenues dans les parties 1.1, 1.4, 1.5, 6.1, 6.2, 6.3 et 7.7.

Il est utile de rappeler que le secteur A a pour thématique la biologie cellulaire et moléculaire. Il était donc attendu la présentation de mécanismes moléculaires **précis**. Pour prendre l'exemple de la structure de l'ADN, la simple présentation de la double hélice est insuffisante. De même, la mention de l'existence de facteurs de transcription sans aucun détail moléculaire de leur interaction avec l'ADN ne correspond pas aux précisions attendues.

Les sciences de la vie sont des sciences expérimentales. L'énoncé du sujet appelait le candidat à s'appuyer sur une démarche expérimentale complète. Celle-ci répond à une question scientifique qui doit être clairement énoncée et elle doit s'appuyer sur des résultats expérimentaux précis. Il était donc légitime d'attendre des exemples concrets et une démonstration expérimentale. Trop peu de copies présentaient ces éléments.

Par ailleurs, il faut rappeler qu'il n'était pas pertinent ou trop chronophage de présenter une démarche expérimentale pour toutes les notions du sujet. Il était attendu du candidat qu'il fasse des choix afin de présenter des démarches expérimentales appropriées en lien avec le sujet. Quelques exemples possibles : les techniques d'activation d'un facteur de transcription, les techniques de modification du transcriptome, les techniques d'étude du transcriptome, ...

Le jury rappelle que le concours de l'Agrégation se base sur des connaissances biologiques modernes. Une approche historique est certes intéressante pour montrer l'acquisition des données, mais ne saurait suffire à la complétude des points abordés. La science a franchi le cap du 21<sup>ème</sup> siècle ...

Par exemple, la liste quasi-exhaustive des expériences historiques qui ont mené à la découverte de la structure de l'ADN n'était pas attendue. En revanche, la description des principes des expériences comme la RT-qPCR, les puces à ARN, le séquençage d'ARNs, ou le Northern Blot apportait un vrai bonus à l'étude du transcriptome.

Pour la présentation des résultats sous la forme de figures, il convient de rappeler qu'il est nécessaire de porter une attention particulière aux titres, aux légendes et aux axes (notamment les unités). Les échelles doivent être présentes. Rappelons que les illustrations permettent d'apporter des notions utiles au sujet, en complément du texte. Celles-ci ne doivent pas être uniquement figuratives, mais doivent montrer des notions scientifiques pertinentes liées au sujet. Tout élément illustratif qui n'a pas de lien direct avec le sujet est une perte de temps.

Enfin, le candidat doit garder à l'esprit que l'objectif de l'épreuve écrite est de valoriser des connaissances scientifiques de niveau universitaire. Il n'est pas opportun d'utiliser des périphrases telles que l'on pourrait les utiliser dans l'enseignement secondaire. Des phrases comme « Le génome est un livre de recettes [...] La transcription photocopie les pages du livre de recettes » ne devraient pas figurer dans une telle synthèse.

## **Points relatifs au sujet**

### Introduction

Elle doit permettre au candidat de contextualiser le sujet et d'en analyser les termes pour aboutir à une problématique logique, sous la forme de questionnement, ou non, et d'explicitier le fil directeur de la composition en lien avec la problématique énoncée. Il faut éviter les accroches « passepartout » et trop naïves dans les introductions. L'amorce d'une introduction doit être l'occasion de montrer l'intérêt du sujet. Il était attendu que les candidats définissent le génome et le transcriptome, principaux termes du sujet. De nombreux candidats ne semblent pas en mesure d'en donner une définition correcte, voire ne parlent même pas du transcriptome.

Dans de nombreuses copies, la délimitation du sujet ne convient pas : génome restreint aux Eucaryotes, génome confondu avec génotype, transcription avec traduction, exclusion des virus. Notons également que la réplication et la traduction ne faisaient pas partie du sujet et ont pourtant été détaillés dans de nombreuses copies.

La problématique fait partie des conventions de l'introduction. Elle ne doit pas être une simple transformation du sujet en question mais doit être construite à partir de l'analyse du sujet tout en précisant ses limites. Enfin l'annonce du plan permet de montrer la démarche qui sera suivie par le candidat pour répondre au sujet et résoudre la problématique énoncée.

### Commentaires relatifs à quelques points spécifiques du sujet

#### *La molécule de l'ADN*

Le jury rappelle que la molécule d'ADN fait partie des quelques grandes molécules dont la formule, la structure, la représentation doivent être connues des candidats. Trop de copies se contentent de citer une base azotée à ribose et groupement phosphate. Force est de constater que lorsque la formule est développée, le ribose se transforme régulièrement en glucose, les liaisons phosphodiester sont quasi-systématiquement fausses et l'orientation 5'-3' est rarement mentionnée.

#### *La diversité des séquences d'ADN*

La majorité des candidats mentionne la diversité des supports (chromosomes, plasmides, etc.). Cependant, peu de copies rentrent dans la diversité fonctionnelle des séquences d'ADN, celle-ci se résumant à introns-exons, les différents types de séquences répétées n'ont été abordées que dans de très rares copies.

#### *Les techniques d'étude (génomique, transcriptomique, techniques associées à la régulation de l'expression, les techniques de biotechnologie)*

Elles représentent la principale pierre d'achoppement des compositions évaluées par le jury. Celles-ci sont généralement mal présentées, hors contexte, et se résument souvent à des techniques plutôt anciennes. Le principe moléculaire des techniques n'est visiblement pas compris, leur apport à la connaissance non plus. Cette difficulté rend les démonstrations expérimentales présentées dans les copies très peu convaincantes.

### *Le transcriptome et sa diversité*

La diversité des ARN dépasse rarement ARNr, ARNm et ARNt. Leurs fonctions et leurs structures ne sont pas présentées. Les autres ARN non codants sont au mieux cités.

### *La transcription*

De nombreuses confusions sont présentes dans les copies. Le jury s'étonne de voir plusieurs copies où la transcription est assurée par des ribosomes ! Si l'ARN polymérase est mentionnée, sa structure et son fonctionnement restent très imprécis. Rappelons que la transcription commence au +1 de la transcription et non au codon START et qu'elle s'arrête sur un site de terminaison et non au codon STOP.

La diversité des ARNpol est rarement mentionnée. Seule l'ARNpol II semble être connue des candidats.

La maturation des ARN se résume souvent à un épissage, une coiffe et une queue pour les ARNm, sans aborder les autres ARN.

### *Contrôle de la transcription*

Celui-ci doit s'appuyer sur des exemples concrets et être contextualisé. Les facteurs de transcription ont généralement été mentionnés mais aucun détail sur la façon dont ils se fixent à l'ADN et sur leur mode d'action (complexe du médiateur) n'est généralement présent pour expliciter leur fonctionnement. Les connaissances scientifiques du fonctionnement des facteurs de transcription sont issues d'expériences scientifiques concrètes que le jury n'a jamais lu sur aucune copie.

L'exemple de l'opéron lactose est souvent abordé mais rarement de façon complète et juste. Les voies de signalisation aboutissant à la modulation de l'expression ne sont, elles, quasiment jamais abordées.

L'épigénétique se résume souvent à un simple état de condensation de la chromatine, sans exemple, sans détail et dont les modalités ne sont pas connues. De nombreux exemples auraient pu servir à cette démonstration mais ont fait défaut.

### *Modifications du génome et du transcriptome par l'Homme*

Le jury s'étonne de ne jamais retrouver d'exemples liés à ces notions. Elles sont pourtant nombreuses dans le programme (points 1.4.4 et 6.1) et dans l'actualité (vaccins à ARN, OGM, CRISPR-Cas9, ...). Les quelques copies ayant abordé ces points ont été valorisées.

#### 4.1.3 Grille de notation

La grille présentée ci-dessous ne constitue pas un corrigé type. Elle présente l'ensemble des notions attendues dans le sujet pour en faire une couverture la plus complète possible. Il n'était pas possible dans le temps imparti de présenter l'ensemble des points avec un niveau de détail moléculaire et une démonstration expérimentale. Il revient au candidat de choisir quelques points pertinents pour développer cette approche démonstrative.

La colonne de droite présente le pourcentage de réussite des copies pour chacun des points de la grille. Ceci permet de mettre en lumière des angles du sujets méconnus, non maîtrisés ou oubliés des candidats.

Introduction	Analyse du sujet dont les termes qui débouche sur des fils directeurs ancrés dans un sens biologique			
annonce du plan = axe directeur en lien avec la problématique				
Contenu notionnel			Réussite	
Titre partie	Titre sous partie	Item et description des niveaux	(%)	
Le génome et son organisation	Définition et composition	Définition du génome : Le génome représente <b>la totalité de l'information génétique</b> transmissible à la descendance.	40,6	
		L' <b>ADN</b> , polymère de nucléotides, est le support du génome des cellules. Sa structure permet le codage et la stabilité de l'information génétique.	39,4	
		Chez certains virus, c'est l' <b>ARN</b> qui supporte cette fonction.	13,5	
		Il existe une <b>diversité des supports</b> du génome en fonction des êtres vivants (chromosome circulaire/linéaire, plasmide, ...) ainsi qu'une <b>diversité de tailles</b> (ordres de grandeur attendus/ multiples ploïdie). Chez les eucaryotes, le génome est dans le noyau et dans les organites (explication par théorie endosymbiotique de l'origine du génome des organites)	23,9	
		Le génome contient une grande <b>diversité des séquences</b> (séquences codantes, introns, séquences régulatrices, séquences répétées diverses, familles multigéniques, pseudogènes, minisatellites, microsatellites...). La proportion de ces différents types de séquences est variable selon les êtres vivants.	10,3	
		<b>Techniques d'étude de génomes</b> (séquençage de Sanger, NGS, endonucléases de restriction, électrophorèses, southern, PCR, cartographie des génomes, annotation des génomes)	12,9	
	L'organisation du génome	Le génome a une <b>organisation séquentielle</b> au sein des chromosomes et des plasmides (centromères, télomères, ADN ribosomique, origines de réplication, opérons, ...)	6,8	
		Le génome possède une <b>organisation spatiale</b> dans la cellule. Chez les eucaryotes, le génome nucléaire est organisé en territoires (nucléole, hétérochromatine, euchromatine, boucles et TADs)	13,0	
	La conservation et la modification des génomes à court terme	Les cellules peuvent procéder à des <b>réarrangement</b> actifs du génome (exemple des anticorps et des Récepteurs des cellules T). <b>Les éléments transposables</b> peuvent se déplacer/se copier dans le génome.	4,0	
		<b>Transmission verticale</b> du génome de cellule-mère à cellule-fille	14,4	
		Le génome subit de nombreuses mutations. Des <b>mécanismes de réparation de l'ADN</b> permettent la réparation ces mutations et la conservation du génome.	9,6	
		Certaines cellules peuvent réaliser des <b>transferts horizontaux de gènes</b> permettant une complexification du génome.	6,3	
	Transcriptome et transcription	Le transcriptome et sa diversité	Définition du <b>transcriptome</b> : ensemble des ARN d'une cellule. Il contient une large <b>diversité d'ARN</b> (ARNm, ARNr, ARNt, miARN, piRNA, snRNA, snoARN, lncARN, ...)	38,5
			<b>Structure générale</b> des ARNs : Les ARN sont des polymères de nucléotides séquencés	29,1
Structure et fonction de l' <b>ARNm</b>			16,7	
Structures et fonctions des <b>ARNr et ARNt</b>			10,0	
Structures et fonctions des <b>miARN, piARN, sgRNA...</b>			6,1	
<b>Diversité</b> du transcriptome en fonction des <b>types cellulaires</b> chez les organismes pluricellulaires. Diversité du transcriptome <b>au cours du temps</b> .			9,4	
Les mécanismes de la transcription		<b>Techniques d'étude du transcriptome</b> (Northern Blot, RT-PCR, RT-qPCR, ISH, puces à ARN, RNA sequ)	9,3	
		La transcription est assurée par des enzymes : les <b>ARN-polymérase</b> .	25,5	
		Il existe une diversité d'ARN pol. Chez les eucaryotes, il existe plusieurs ARN-polymérase spécialisées dans différentes transcriptions.	11,6	
		L'initiation de la transcription nécessite les <b>facteurs généraux de la transcription</b> . Ceci assure la mise en place de l'ARN-polymérase appropriée au niveau du <b>promoteur</b> et sa phosphorylation pour lancer l'élongation.	24,4	
		Il existe de nombreux mécanismes de <b>terminaison de la transcription</b> en fonction des organismes.	11,0	
		Les ARN transcrits subissent divers types de <b>maturation</b> (coiffe, queue polyA, clivage, épissage, structures secondaires, édition de base) aboutissant une grande variété de transcrits.	21,5	

Le contrôle de la transcription	Le contrôle de la transcription à court terme	Des <b>séquences régulatrices</b> modulent la transcription du génome (enhancer/silencer/opérateur). <i>Techniques d'étude associées : gènes rapporteur, luciférase, délétion de promoteur, ...</i>	7,3
		Les <b>facteurs de transcription</b> sont des protéines qui se fixent spécifiquement à leur séquence régulatrice spécifique (hélice-tour-hélice, doigt de zinc, leucine zipper, ...). <i>Techniques d'étude associées : ChIP, retard sur gel</i>	6,2
		Les FT modulent la transcription via le <b>médiateur</b> chez les eucaryotes	2,4
		La présence/l'activité des FT dépend de <b>voies de signalisation</b> ou de l'activité cellulaire. Modification de la transcription au cours de la différenciation cellulaire et/ou du développement embryonnaire	8,0
		Contrôle de la transcription par les conditions du milieu : ex. de l' <b>opéron lactose ou tryptophane</b>	15,9
		Activation ou dormance de provirus intégrés dans le génome (cycle lysogénique du bactériophage lambda, ou dormance du provirus VIH) OU transcription du génome viral	1,5
	Epigénétique et modifications du transcriptome à long terme	L'ADN est associé à des protéines de structure, les <b>histones</b> , et forme la <b>chromatine</b> . La transcription du génome dépend de l'accessibilité de la chromatine + organisation interne du noyau	19,4
		Les <b>modifications épigénétiques</b> modifient la chromatine sans modifier la séquence de nucléotides (MPT des histones, meCpG, lncRNA)	14,8
		Les modifications épigénétiques sont <b>héréditaires</b> . Elles sont conservées et copiées lors de la réplication.	1,4
		Exemple précis de régulation épigénétique (Inactivation du chromosome X ou Empreinte génétique parentale ou Inactivation du gène FLC, ...)	6,5
		Les modifications épigénétiques s'accumulent au cours de la vie d'un organisme et module son transcriptome. Concept d'horloge épigénétique	1,1
		L' <b>environnement</b> influe sur l' <b>épigénome</b> . La formation d'épiallèles peut induire le développement de pathologies	2,6
	Les contrôles post-transcriptionnels du transcriptome	L' <b>épissage alternatif</b> des ARNm est un processus contrôlé augmentant la diversité du transcriptome	17,6
		Il existe des contrôles qualité de la transcription des ARNm (NMD, problèmes circularisation -> endonucléases)	1,0
		Les ARN ont une temps de vie court. <b>Turn-over</b> du transcriptome et élimination par endonucléases	1,3
		Les cellules peuvent moduler l'expression de leur transcriptome par le mécanisme d' <b>ARN interférent</b> : miRNA et siRNA et contrôle post-transcriptionnel des ARNm	6,1
	Modifications des génomes et transcriptomes en biotechnologie et santé	Les techniques de <b>transgène</b> permettent le transfert artificiel de gène entre organisme et la modification des génomes. <i>Transformations par Agrobacterium, transfection, biolistique, ...</i>	2,2
Les techniques d' <b>édition des génomes</b> permettent la modification directe du génome des cellules. <b>CRISP-Cas9</b> , mutagenèse dirigée, ...		3,6	
La thérapie génique et la modifications du génome humain dans le cadre de pathologies génétiques		0,6	
La technique de modification/modulation du transcriptome : interférence à ARN, morpholinos, traitements antirétroviraux, vaccins à ARNm...		1,3	
Clonage animal et végétal		0,3	
<b>Qualité des démonstrations et de l'argumentation</b>			
Qualité du plan et de l'organisation de la copie	adéquation au sujet		
	cohérent globalement (niveau hiérarchique homogène des découpages du plan)		
	logique dans la progression de la copie		
	unités paragraphiques : une idée par paragraphe en adéquation avec son titre		
	transitions : explicite la logique de changer de paragraphe/partie		
Illustrations	richesse de la copie en illustrations		
	qualité des illustrations : soignée (titre, légende, échelle si pertinent), fait apparaître une		
Orthographe/syntaxe			
Clarté/concision/soin			
Conclusion	synthèse (qui n'est pas une simple redite) des idées fortes développées au long de l'exposé avec ou pas		
	ouverture de qualité vers un prolongement intéressant du sujet/remise en perspective		

## 4.2. Épreuve écrite du secteur B

### 4.2.1 Le sujet proposé

#### LA COMMUNICATION AU SEIN DU MONDE VIVANT : MODALITES ET CONSEQUENCES.

*On limitera le sujet aux organismes pluricellulaires.*

*Les échelles de la cellule à celle des écosystèmes sont attendues.*

### 4.2.2 Commentaires généraux sur la compréhension et le traitement du sujet

Le sujet s'inscrivait dans différentes rubriques du programme du concours « Biodiversité, écologie, éthologie, évolution » et invitait, explicitement par son sous-titre, à considérer différentes échelles. On peut notamment citer :

Partie 4 : L'organisme dans son environnement

- 4.3 Perception du milieu, intégration et réponses. Squelette et port

- 4.4 Reproduction et cycle de développement

Partie 5 : Biodiversité, écologie, éthologie, évolution

- 5.3 Interactions des espèces au sein des communautés : compétition interspécifique, prédation, parasitisme et mutualisme, symbioses

- 5.4 Biologie du comportement animal

Partie 7 : Éléments de biologie et de physiologie dans l'espèce humaine

Les attentes du jury portaient sur plusieurs aspects :

**1. Maîtrise des concepts fondamentaux de la biologie des organismes, de la biologie des populations et de l'écologie scientifique** : Les candidats devaient démontrer une compréhension approfondie des concepts et mécanismes de génération, transfert, réception et réponse de l'information au sein des organismes (communication hormonale et phytohormonale, nerveuse, paracrine), des populations et des écosystèmes. Une diversité de types de signaux était attendue. Les conséquences biologiques, écologiques et évolutives de l'occurrence ou de l'absence de ces mécanismes de communication étaient attendues (interactions proie-prédateurs, mimétismes, parasitisme, niche écologique, sélection sexuelle, co-évolution, spéciation, ...)

**2. Capacité à présenter des concepts généraux concernant plusieurs échelles biologiques** : Ce sujet, vaste, appelait à mobiliser de façon synthétique et ordonnée, des mécanismes biologiques et des processus écologiques impliquant plusieurs acteurs (tissus, organes, organismes, populations) et leur implication dans de grandes fonctions biologiques et processus écologiques. Il était attendu des candidats une présentation synthétique et ordonnée des concepts discutés et illustrés aux différentes échelles. La simple juxtaposition d'exemples sans liens conceptuels ne permettait pas d'aborder l'aspect transversal de ce sujet.

**3. Utilisation d'exemples concrets et diversifiés** : La capacité à illustrer la théorie par des exemples précis : en situant bien quelle fonction biologique est visée, chez quels organismes, dans quels organes le cas échéant, avec le nom des espèces impliquées, des éléments de temporalité le cas échéant. L'aspect transversal du sujet doit également transparaître dans les différents écosystèmes (terrestres et aquatiques) abordés. Cette diversité d'exemples, en contexte, a été particulièrement valorisée.

Les interactions avec l'espèce humaine devaient également être abordées. Plusieurs aspects pouvaient être évoqués : l'utilisation des signaux de communication dans les méthodes de détection et d'inventaire des populations, l'effet des perturbations anthropiques de la communication au sein des écosystèmes et les méthodes de remédiation, l'utilisation ou la modification des signaux de communication en biologie de la conservation ou en lutte biologique. Les intégrer dans la présentation ou l'analyse des processus biologiques, écologiques et évolutifs impliqués dans la répartition des organismes permettait de montrer une réelle maîtrise de ces concepts.

**4. Une présentation illustrée, fonctionnelle et démonstrative** : La nature fonctionnelle du sujet appelait un soin particulier dans la démonstration des mécanismes de communication. Certains mécanismes sont

en effet décrits beaucoup plus pédagogiquement à l'aide de schéma et d'illustrations claires, bien légendés. Ces illustrations doivent soutenir la réflexion synthétique, mais ne peuvent pas s'y substituer.

**5. Capacité de problématisation et de synthèse** : Le sujet offrait une opportunité aux candidats de démontrer des capacités de synthèse sur un champ disciplinaire large. Une problématisation claire du sujet et une organisation rigoureuse de l'argumentation étaient essentielles pour structurer la réflexion, avec une attention particulière portée aux transitions entre les différentes parties.

Quelques copies ont traité le sujet avec de réelles qualités et obtenu de très bonnes notes. Celles-ci se démarquent par leur capacité à circonscrire le sujet, à s'appuyer sur des exemples et expériences précis pour établir avec rigueur les notions et théories de l'écologie scientifique sous-tendues par ce sujet. Revenons ci-après sur les principaux problèmes identifiés dans les copies par le jury, certains d'entre eux se révélant d'autant plus problématiques qu'ils sont mentionnés de manière récurrente dans les rapports de jury.

### **Délimiter le sujet, organiser des idées et construire un plan**

**L'introduction** doit permettre au candidat de définir les termes du sujet, d'énoncer une problématique et de présenter la démarche qu'il propose afin d'y répondre.

Les termes du sujet ont généralement été correctement définis à l'exception de certains candidats qui ont assimilé communication et comportement ce qui les a conduits à limiter le sujet aux Métazoaires et à n'envisager que l'échelle des organismes. De nombreuses accroches ont présenté une promenade dans les bois avec des chants d'oiseaux posant une argumentation discutable sur le constat d'une communication. D'autre part, certains candidats ont fait une présentation obsolète du vivant en présentant les « 3 règnes : animal, végétal et des champignons », ce qui est préjudiciable.

**Le plan** proposé doit répondre à la problématique initiale, ce qui a été fait de façon claire dans de nombreuses copies. Le jury rappelle qu'il est inutile d'écrire l'intégralité du plan à la suite de l'introduction. Cela n'est pas exigible et représente une perte de temps.

Les limites du sujet ayant parfois été mal posées, cela a conduit à des plans inappropriés et à des hors-sujet. Certains candidats ont confondu communication et flux de matière ou ont intégré une échelle intracellulaire inutile (modalités de l'expression génétique, diversité des échanges membranaires, flux intracellulaires de matière...). L'expression « organismes pluricellulaires » a parfois été mal définie amenant des développements inutiles.

Les différentes parties du plan doivent permettre de développer des idées clés. Ainsi, un titre ne peut pas être un exemple, (Ex : « la réponse immunitaire adaptative »), mais doit être mis en lien avec un concept lié au sujet. Le développement ne doit pas non plus être la récitation de l'exemple pour lui-même. Les titres génériques qui ne sont pas en lien avec une notion clé de ce sujet sont également à proscrire. Des confusions d'échelles sont également notées ([un titre faisant référence à l'échelle de l'écosystème et un développement centré sur le fonctionnement d'un organisme par exemple](#)).

### **Construire une démarche scientifique démonstrative basée sur des exemples pertinents**

Les notions en lien avec le sujet doivent être argumentées et construites à partir de données scientifiques précises et de nature variée. Un seul exemple, bien traité, peut suffire pour étayer un concept et cela doit être réalisé à plusieurs reprises. Énoncer « des scientifiques ont montré que » ne constitue pas une argumentation expérimentale. De même, présenter un exemple précis sans dégager des modalités de la communication est insuffisant. Le jury a également noté que certaines argumentations sont incohérentes, voire fantaisistes (ex : Si on sectionne les pattes arrière du grillon, le comportement reproducteur n'a pas lieu donc...) et que des expériences historiques sont tronquées ou mal comprises. Le jury a été sensible à la culture naturaliste de certains candidats apportant de nombreux exemples pertinents et bien maîtrisés. La majorité des transitions entre parties quand elles existent se résument à "après avoir vu telle idée, nous allons voir l'idée suivante", empêchant d'explicitier au jury le lien logique entre les parties.

### **Utiliser des illustrations au service de la démonstration et/ou du traitement du sujet**

Les illustrations font partie des attendus incontournables. Cependant, une illustration n'est pas une décoration de la copie. Communiquer graphiquement doit permettre d'explicitier des aspects relatifs au

sujet, d'apporter des idées complémentaires du texte ou de faire un bilan par exemple. Cela ne peut cependant pas se substituer au texte. Les schémas proposés doivent s'accompagner d'un titre, de légendes ainsi que d'un ordre de grandeur ou d'une orientation si cela est nécessaire. Ces derniers aspects sont trop souvent oubliés. Le titre proposé est parfois trop général et ne fait pas le lien avec la communication. Trop peu de schémas sont fonctionnels et la signification des figurés et des flèches n'est pas toujours précisée. Les cartes mentales, qui peuvent être utiles dans la phase de réflexion, sont rarement pertinentes dans la copie. Les mots clés sont reliés par des flèches, parfois de significations diverses, ce qui les rend peu compréhensibles.

Les copies comportent souvent de nombreuses illustrations, mais on déplore encore des copies totalement dépourvues de schémas, avec un nombre trop modeste ou avec des schémas simplistes et inutiles.

Beaucoup de candidats choisissent de terminer leur devoir par des schémas bilans. Ce choix peut s'avérer judicieux, dès lors que le schéma révèle une synthèse des idées développées dans la copie avec l'objectif de répondre à la problématique initiale.

### **S'exprimer dans un langage clair et précis en évitant tout finalisme**

Comme chaque année, le jury alerte les candidats sur l'usage récurrent du finalisme, raisonnement dans lequel les phénomènes tendent vers une finalité ou un but, qui démontre que la réflexion biologique de la théorie de l'évolution n'est pas encore intégrée ("Étant fixés les végétaux ont dû développer des caractéristiques pour faire face à ce mode de vie" / "Les êtres vivants vont chercher à se reproduire afin de perpétuer l'espèce plutôt que de penser à leur propre survie").

Le jury entend rester très vigilant concernant cette vision finaliste du vivant, inacceptable pour un futur enseignant de sciences et comme chaque année, le jury engage fortement les candidats à lutter contre ces formulations finalistes délétères.

### **S'exprimer sans fautes de français et écrire lisiblement**

Au-delà du fond, la forme revêt également un aspect pédagogique. Le jury attire l'attention des candidats sur la lisibilité des copies et sur le soin qui doit être apporté à la limitation des fautes de français, y compris aux fautes d'orthographe sur le nom des espèces citées. La case de numérotation des pages doit également être complétée.

### **Gérer le temps de l'épreuve, conclure**

Le temps parfois mal géré ne permet pas de traiter l'ensemble du plan et de nombreuses copies présentent les titres du plan accompagnés de sections de pages non remplies.

La conclusion est nécessaire pour récapituler de façon concise les idées fortes développées dans le devoir, répondre à la problématique posée en introduction et formuler de nouvelles questions qui ouvrent les perspectives au sujet. La conclusion a trop souvent été bâclée, en lien avec une mauvaise gestion du temps, et rares sont les copies dans lesquelles celle-ci permet de reprendre de façon synthétique les idées principales du développement. Le jury a cependant noté la présence de quelques conclusions très bien menées avec des schémas bilans remarquables.

Très peu de copies proposent une ouverture du sujet vers un prolongement pertinent et beaucoup se sont contentés d'un changement d'échelle présentant peu d'intérêt, à l'image de « après avoir considéré l'échelle des êtres vivants pluricellulaires, on pourrait s'intéresser aux unicellulaires ». L'ouverture ne doit pas être sur une notion qui aurait dû faire partie du développement.

## 4.2.3 Grille de notation

Une version modifiée de la grille d'items utilisés pour la notation des copies est présentée. Elle ne constitue en aucun cas un plan type ou un corrigé, mais elle propose les notions pouvant être abordées avec quelques commentaires précisant des attendus et des remarques du jury sur le contenu des copies corrigées et des pistes concernant l'organisation ou les transitions possibles d'une copie.

Agrégation externe Épreuve du secteur B	Sujet : LA COMMUNICATION AU SEIN DU MONDE VIVANT : MODALITÉS ET CONSÉQUENCES. On limitera le sujet aux organismes pluricellulaires. Les échelles de la cellule à celle des écosystèmes sont attendues.	Compléments sur les attendus	Commentaires
Introduction	Analyse du sujet (dont les termes) qui débouche sur un/des fils directeurs ancrés dans un sens biologique Annonce du plan = axe directeur en lien avec la problématique	Cerner le concept de communication : émission, messenger/message, réception, interprétation du message et réponse biologique ou écologique. Dégager une problématique à laquelle le devoir répondra pour éviter les productions de type « exposé ».	Une contextualisation, type « accroche » est attendu, mais sans tomber dans le spectaculaire ou l'anthropocentrisme à outrance. Le détail fin du plan n'est pas attendu, mais les grandes parties et leur articulation doivent être annoncées.
À l'échelle de l'organisme, des processus cellulaires complémentaires	Caractéristiques des différents types de communication	Différents modes de communication explicités attendus : → nerveuse : - sur les fibres : potentiel d'action (caractéristiques, propagation, gaine de myéline, vitesse, fréquence et codage) ; - au niveau des synapses (fonctionnement, codage en concentration de neurotransmetteur...) ; - sur la membrane post-synaptique (PPS, transmission décrémente, sommations, zone gâchette, naissance des PA, codage...). → hormonale animale : - hormone émise par cellule endocrine, glandes endocrines ; - différentes natures d'hormones (stéroïdes, peptidiques, thyroïdiennes, corticoïdes), transport par un fluide circulant, concentration variable ; - cas des neuro-hormones. → paracrine animale : codage en concentration avec effet dose-dépendant, diffusion dans la MEC/ gradient de concentration. → juxtacrine et par contact direct : cas des jonctions gap, plasmodesmes... → par phytohormones chez les végétaux : transport par la sève ou de cellule à cellule.	Les caractéristiques générales de la communication intercellulaire (émetteur, messenger/message, récepteur, interprétation du message et réponse cellulaire) devaient être précisées. De nombreuses copies présentent les communications nerveuse et hormonale, mais trop rarement les notions de messenger et de message. Le codage est mentionné dans moins de 5% des copies et le message nerveux se limite souvent à la description d'un potentiel d'action. Les exemples proposés ont souvent été présentés pour eux-mêmes sans être exploités dans l'optique de ce sujet. limiter la communication nerveuse à une communication juxtacrine a entraîné des incohérences et ne permettait pas d'avoir une vue d'ensemble de la communication. De nombreuses argumentations expérimentales pouvaient être abordées (patch clamp, voltage clamp, ablation de glandes, greffe, injection d'extraits...). Une bonne gestion du temps impliquait de ne pas détailler de façon excessive les aspects moléculaires abordés afin de pouvoir envisager toutes les échelles.

	Réception, transduction, réponse, extinction	- Réception, transduction et amplification du signal sur la cellule cible, avec modification de l'activité cellulaire. - Extinction du signal (ou compétence pendant le développement).	De nombreux exemples permettaient d'illustrer ces différents aspects, mais leur multiplication était inutile. La notion d'extinction du signal (dégradation des messagers, importance physiologique) a rarement été abordée.
	Conséquences biologiques à l'échelle de l'organisme	- Homéostasie, intégrité de l'organisme : concept de boucle de régulation, fonctionnement coordonné des organismes pluricellulaires, intégration à l'échelle de l'organisme. - Développement au sens large (animal et végétal). - Autre grande fonction biologique (reproduction...).	Certains candidats ont eu du mal à définir correctement les grandes fonctions : la fonction de reproduction faisant partie des fonctions de relation par exemple. L'exemple de la boucle de régulation de la glycémie a souvent été utilisée comme exemple, mais devait être mis en lien avec les conséquences biologiques de la communication.
	Comparaison des différents types de communication	Publique (hormonal) / privée (nerveuse, juxtacrine) - vitesse Animal / végétal Distance d'action temps d'action...	Cet aspect a parfois été judicieusement abordé avec un tableau comparatif.
Communication entre organismes	Systèmes de communication intra ou interspécifiques : émission d'un messenger, message et codage, transport, réception et réponse	- Nature et diversité des signaux utilisés (avec bases physico-chimiques) : visuels (postures, parades...), sonores (chant, stridulation...), tactiles ou haptiques, chimiques (phéromones, substances allélochimiques...), électriques, vibratoires... - Variations de fréquence, d'amplitude et de temporalité des signaux. Production des signaux par des structures spécialisées +/- contrôlées : <ul style="list-style-type: none"> <li>• chimiques : cellules sécrétrices, glandes exocrines</li> <li>• visuels : lumineux =&gt; photophores</li> <li>• acoustiques : grande variété d'émission</li> </ul> - Caractéristiques de la transmission des signaux dans l'environnement qui peut agir comme un filtre, propagation variable en fonction du biotope (ex : vibrations sonores/air-eau, signaux visuels et vibrations/sol, signaux olfactifs/air...), effet Lombard. - Réception et transduction en message : Chez les animaux : organes des sens (audition/vision).	L'importante diversité des signaux impliquait de faire des choix dans les signaux présentés. Un élargissement était cependant nécessaire pour traiter de la diversité des signaux, de leur production, de leur transmission et de leur réception. Un schéma global pouvait être construit. Certains candidats se sont appuyés sur des exemples précis et bien maîtrisés. Pour qu'il y ait communication, le message émis doit se fixer spécifiquement (=reconnaissance d'un seul message) sur un récepteur (protéine) et doit être interprété (cascade de réactions). Un exemple détaillé permettait de dégager les étapes de la réception et la transduction en messages transmissibles chez un Métazoaire, mais, là encore, un élargissement était nécessaire. La présentation d'un organe récepteur ne suffisait pas pour définir une communication (Ex : une chauve-souris qui fait de l'écholocalisation ne communique pas.). La communication a été confondue avec la perception de l'environnement par certains candidats. La communication chimique chez les Angiospermes a parfois été judicieusement abordée.

	Place de l'inné et de l'acquis dans les apprentissages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Communication innée et stéréotypée.</li> <li>- Apprentissage : dans la réception et/ou l'émission des signaux.</li> </ul> Notion d'apprentissage social.	L'inné est le produit de la sélection naturelle et héréditaire et une attention toute particulière devait être apportée à la rédaction afin de ne pas être finaliste. De nombreux exemples pouvaient être indifféremment être utilisés (apprentissage vocal chez les Oiseaux, sons à basse fréquence des Sauroptides, cris dans les communautés de chimpanzés et « dialectes »...). Différentes argumentations expérimentales pouvaient être proposées (expérience de Tinbergen sur la tâche rouge...).
	Communication interspécifique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Signaux honnêtes : attraction/répulsion (pollinisateurs, aposématisme, mycorhization...)</li> <li>- Détournement : mimétisme, manipulation...</li> <li>- Interactions hôte/symbiotes = communication dans l'hobionte (ex : mycorhizes) et augmentation de la surface explorée/exploitée.</li> </ul>	La manipulation, ou émission d'un signal à l'unique avantage de l'émetteur a rarement été évoquée (ex des Primates qui émettent un signal mimant un prédateur face à un mâle dominant). De même, une confusion récurrente entre communications interspécifiques et flux intracellulaires a été notée. Une bonne gestion du temps impliquait de ne pas détailler de façon excessive et uniquement descriptive tous les cas possibles de communication interspécifique sous forme « catalogue » afin de pouvoir envisager leur conséquence et de pouvoir traiter toutes les échelles visées par le sujet.
Rôles biologiques et conséquences des communications de l'échelle des populations à l'écosystème	Communication intraspécifique	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Interaction de parentalité et parentèle (entre parents et descendants, entre individus d'une portée...).</li> <li>- Reconnaissance des partenaires sexuels :             <ul style="list-style-type: none"> <li>• parade nuptiale et rapprochement des partenaires.</li> <li>• répartition territoriale (chant, marquage territorial par phéromones,...)</li> </ul> </li> <li>- Communication obligatoire au sein d'un groupe social :             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Structuration du groupe social et hiérarchie</li> <li>• Coordination des comportements collectifs (ex : recherche de nourriture, coopération dans la réalisation de tâches collectives. Ex : trophallaxie des hyménoptères)</li> </ul> </li> </ul>	La communication a parfois été assimilée à toute forme de relation, trophique par exemple, conduisant les candidats à développer de façon excessive les différentes formes d'interactions dans un écosystème, à établir des pyramides écologiques... sans lien explicite avec le sujet. Citer le fait qu'une espèce réalise une parade nuptiale sans la décrire ne permet pas de montrer comment la communication entre en jeu, et ne constitue donc pas un argument. Les différents aspects de la communication (notamment la notion de réception et de réponse au message) ont parfois été oubliés.

		- Entre Angiospermes : avertissement d'un danger (COV, via réseau mycorhizien...), réponse = synthèse de composés toxiques	Les organismes végétaux ont très souvent été « oubliés » ou traités très approximativement
	Conséquences sur la structuration et sur la dynamique des populations et des écosystèmes	- Régulation des populations : maintien des effectifs, distribution spatiale (allélopathie, kairomones...), - Importance de la communication dans la niche écologique réalisée par rapport à la niche potentielle. - Évitement des prédateurs/herbivores. - Influence sur la reproduction (pollinisation, dispersion, parasitisme...) et stabilité des effectifs	L'exemple de la nodosité et de Rhizobium a souvent été utilisé alors que Rhizobium, souvent présenté comme un mycète, n'est pas un organisme pluricellulaire. Les conséquences de la communication dans le déroulement des processus fonctionnels et écologiques ont souvent été peu, voire pas abordés. Très peu d'approches démonstratives (par exemple effet écologique de la suppression d'un élément de communication) ont été développées sur cet aspect. Les notions basiques de niche écologique réalisée et de niche écologique potentielle en lien avec la communication n'ont pratiquement jamais été présentées.
	Conséquences évolutives	- Coévolution entre communicants, théorie de la Reine Rouge. - Implication sur la variation de fitness et sélection naturelle. - Isolement reproducteur, spéciation allopatrique. - Concept de sélection sexuelle (CSS extravagants, théorie du handicap...).	Il n'était pas nécessaire de détailler tous les aspects relatifs aux forces évolutives comme la dérive génétique par exemple, mais l'implication de la communication dans les phénomènes évolutifs étaient attendus
	Interactions avec l'être humain	Interactions positive ou négative sur les populations (perturbation de la communication dans les milieux ou exploitation de la communication par l'être humain, ...). - Utilisation des signaux de communication dans les méthodes de détection/inventaire des populations, dans la biologie de la conservation ou dans la lutte biologique ; - Perturbations anthropiques de la communication au sein des écosystèmes et méthodes de remédiation	Ces aspects ont été très bien traités dans quelques copies, mais sont encore très souvent oubliés. On attend ici une analyse scientifique, biologique et écologique. Le militantisme sans démonstration scientifique est à éviter.
Conclusion		Synthèse (qui n'est pas une simple redite) des idées fortes développées au long de l'exposé avec ou pas un schéma de synthèse Ouverture de qualité vers un prolongement intéressant du sujet/remise en perspective	Rares sont les copies dans lesquelles les idées principales sont reprises de manière synthétique dans la conclusion. Toute tentative pertinente de réalisation d'un schéma bilan a été valorisée par le jury.

			Très peu de copies proposent une ouverture du sujet vers un prolongement pertinent.
Qualité des démonstrations et de l'argumentation		Qualité et justesse scientifique et déductive Inclusion dans l'argumentation générale	Dans certaines copies des paragraphes sont constitués uniquement du récit d'une expérience (certes à propos pour le sujet), mais ne la remplace pas dans l'argumentation générale et ne permet pas de voir son apport à la problématique affichée dans l'introduction.

#### 4.3. Epreuve écrite du secteur C

##### 4.3.1. Le sujet proposé

### **Le géotherme terrestre**

##### 4.3.2. Commentaires généraux sur l'épreuve

L'énoncé n'a pas posé de véritables problèmes aux candidats qui ont généralement compris qu'il s'agissait de présenter nos connaissances sur l'évolution de la température à l'intérieur de la Terre depuis la surface vers son centre et ce grâce à une diversité de méthodes. Dans un certain nombre de copie, cependant, la notion de géotherme était inconnue ou mal définie en introduction, ce qui a conduit à une mauvaise analyse du sujet, réduit à une simple réflexion sur « la chaleur de la Terre ». Deux principales difficultés ont, semble-t-il, été rencontrées : la première a été de présenter une véritable démarche démonstrative. Le Jury rappelle que la démonstration est l'essence même du concours de l'agrégation, à l'écrit comme à l'oral, et que le barème est conçu en conséquent, c'est-à-dire qu'il est généreux pour les notions et concepts ayant été démontrés. Le manque de démonstration est fréquent dans les copies et le sujet expliquait pourtant que « La notation favorisera(it) la démonstration plutôt qu'une approche se résumant à citer des généralités et/ou des mots clés. » La seconde difficulté a été de traiter l'intégralité du sujet et notamment de l'évolution spatiale et temporelle du géotherme.

Avant de présenter un exemple de correction, voici les points relevés par le jury : Il y a un véritable problème d'ordres de grandeurs sur un certain nombre de copies (bar au lieu de GPa ; 100°C au lieu de 1000°C) questionnant les correcteurs sur la compréhension même des processus.

Les éléments radioactifs sont souvent cités de façon très aléatoires : des éléments fils sont parfois mentionnés comme sources de chaleur (Ar, Pb) ou des éléments en quantité infime (Sm...) au détriment des contributeurs prépondérants que constituent l'Uranium et Thorium et le Potassium. L'exemple du couple rubidium-strontium, relevant de la datation absolue, a ainsi été assez souvent mobilisé pour illustrer la production de chaleur par radioactivité dans le manteau, de façon maladroite. Le principe du fonctionnement et d'acquisition de données en presses à enclume de diamant n'a quasiment jamais été expliqué, alors qu'il est essentiel pour comprendre certaines données expérimentales clés pour construire le géotherme terrestre. La construction même du géotherme était souvent absente ou oubliée. La plupart des notions associées à ce sujet ont été abordées, à l'exception notable de la différence de flux de chaleur entre lithosphère océanique et lithosphère continentale. Le géotherme archéen a, en revanche, souvent été bien traité. Le magmatisme a été évoqué dans de nombreuses copies, mais rarement relié au sujet ; la fusion partielle est expliquée dans différents contextes, sans lien clair avec le géotherme. De la même manière, le métamorphisme est abordé comme conséquence du géotherme, beaucoup trop rarement comme méthode pour reconstituer les géothermes en des lieux et moments précis. Une confusion fréquente a été observée entre sismicité, sismologie et sismique réflexion ainsi qu'entre chaleur et température. Le modèle de référence utilisé pour la tomographie est souvent passé sous silence et lorsque le modèle PREM est cité son obtention est systématiquement absente ou confuse. Il semblerait également que les notions de LVZ (Low Velocity Zone) et LAB (Lithosphere-Asthenosphere-Boundary) soient aléatoirement utilisées l'une à la place de l'autre. Enfin, la diversité des géothermies est rarement reliée au géotherme ou au contexte géodynamique local. Les exemples (Soultz, Bouillante...) sont souvent cités sans explication du cadre géodynamique associé.

##### 4.3.3 Grille de notation

## Exemple de correction possible

# Le géotherme terrestre

*La notation favorisera la démonstration plutôt qu'une approche se résumant à citer des généralités et/ou des mots clés.*

## Introduction

*Définition* : Le géotherme représente le profil de température à l'intérieur de la Terre c'est-à-dire la variation de la température en fonction de la profondeur.

*Accroche* : Très clairement, l'existence de source hydrothermales chaudes, ou l'augmentation de la température directement constatée lorsqu'on descend dans une mine souterraine montrent que la température augmente avec la profondeur. Une explication simple à cette tendance générale est que la production de chaleur est un processus volumique (notamment lié à la désintégration d'éléments radioactifs comme nous ne verrons dans la partie I), alors que la chaleur est évacuée par la surface, faisant de cette zone la plus « froide » du globe (la température moyenne de surface est également celle de l'atmosphère, c'est-à-dire environ 15°C ; cette température étant contrôlée par des paramètres astronomiques, ainsi que par la composition de l'atmosphère – ces aspects ne seront pas abordés dans ce travail) et du centre de la Terre la zone la plus chaude. Connaître le géotherme en surface est relativement simple (mesure de la température en fonction de la profondeur dans un puit de forage – de nombreuses interpolations sont nécessaires et débattues pour obtenir une carte mondiale), mais en profondeur, il est plus difficile à aborder et ne peut être estimé que de façon indirecte.

*Problématique* : Plusieurs problématiques peuvent-être proposées et en premier lieu : avec quels outils/données/hypothèses construit-on le géotherme terrestre ? On peut également se poser la question de l'origine de la chaleur libérée par la Terre ? Quelles sont ses variations spatiales et temporelles ? Enfin quelles utilisations trouve-t-on à l'augmentation de la température avec la profondeur ?

*Plan* : Dans une première partie nous mettrons en évidence l'existence d'un gradient de température en surface et nous présenterons l'origine de la chaleur interne du globe ainsi que l'organisation de la structure interne de la Terre et les modes de dissipation de chaleur qu'elle implique.

Dans une seconde partie, nous présenterons les outils, données et hypothèses qui permettent de construire un géotherme terrestre moyen.

Dans une troisième partie, nous aborderons les variations spatiales et temporelles du géotherme terrestre.

Enfin dans une quatrième partie, nous présenterons les utilisations possibles du géotherme.

## I. Mise en évidence et origine du géotherme

### A. Géotherme et flux de chaleur en surface

Les sources thermales, connues depuis le début des temps historiques, sont sans doute les manifestations les plus populaires de la présence en profondeur de températures plus élevées qu'en surface. Le village de Chaudes-Aigues dans le Cantal doit son nom aux sources thermales qui y sont utilisées : l'hiver pour le chauffage des habitations et l'été pour les thermes. Ce village possède une trentaine de sources dont les températures vont de 40°C à 82°C. Dans le cas des sources thermales, la température élevée de l'eau est interprétée comme résultat de l'interaction de cette dernière avec des roches de température élevée en profondeur. Une méthode plus directe pour observer l'augmentation de la température avec la profondeur est de descendre dans les mines. Afin d'extraire des substances minérales utiles, les conduits des mines souterraines descendent parfois à plusieurs centaines de mètres de profondeur où des températures élevées rendent l'atmosphère suffocante si les conduits sont insuffisamment ventilés. Les sources thermales comme les mines

montrent une augmentation de température avec la profondeur. Quantifier cette augmentation en surface (gradient géothermique) permet d'en déduire le flux de chaleur (énergie dégagée) à la surface de la Terre.

La façon la plus simple de mesurer le gradient géothermique est d'enregistrer la variation de la température avec la profondeur dans un forage. La température augmente quasi-linéairement lorsqu'on s'enfonce avec une moyenne autour de 30°C/km. Une fois le gradient connu, les géophysiciens en déduisent le flux de chaleur, c'est-à-dire la quantité d'énergie (thermique) qui traverse une unité de surface par unité de temps (unité = J/s/m<sup>2</sup> ou W/m<sup>2</sup>). La loi de Fourier explique que le flux de chaleur par conduction est l'opposé du produit de la conductivité thermique des roches par le gradient de température. Son expression est :

$$q = -K \frac{dT}{dz}$$

Pour connaître le flux de chaleur en un point de la surface de la Terre il faut donc déterminer à la fois le gradient de température (thermomètre dans puit de forage) et la conductivité thermique des roches sous-jacentes (mesurée en laboratoire à partir des roches prélevées dans le forage en question).

En milieu continental, la conductivité thermique des roches K vaut environ 2,5 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> (de l'ordre de 2,2 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour les basaltes et 3,1 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour les péridotites).

*Remarque* : Les roches sont de « mauvais » conducteurs thermiques : la conductivité thermique d'un métal est d'environ 420 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> (cas de l'argent) ; celle de l'eau est environ 6 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>. La conductivité thermique des roches est cependant supérieure à celle du bois (~ 0,1 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>), ce qui appelle à discuter sur l'évolution des pratiques en terme de matériaux de construction.

Le gradient de température, est vertical à la surface terrestre. En l'absence de circulation d'eau, le flux de chaleur est donc également vertical.

Si on applique la loi de Fourier avec les valeurs moyennes présentées :

$$q = -2,5 \times \frac{30}{1000} = 0.075 \text{ W.m}^{-2}$$

Si on intègre cette approximation sur la surface de la Terre on obtient :

$$Q = q \times S = 0.075 \times 5,10 \times 10^{14} = 3.8 \times 10^{16} \text{ W} = 38 \text{ TW}$$

Ce qui est assez proche de l'estimation d'un flux global de 42 TW généralement proposée pour la Terre.

L'intégration de la loi de Fourier permet d'exprimer directement la température en fonction de la profondeur pour les quelques premiers kilomètres de profondeur, connaissant la conductivité thermique des roches, le flux de chaleur, et la température en surface et en faisant l'hypothèse que le milieu ne comprend pas de source ou de puits de chaleur.

On obtient alors

$$T(z) = -\frac{q_0}{K} \times z + T_0$$

Avec :

$q_0$  : flux de chaleur en surface

K : conductivité thermique des roches

$T_0$  : température en surface

Notons que le gradient thermique doit nécessairement diminuer en profondeur. Si l'augmentation de température était constante et équivalente à celle enregistrée en surface (environ 30°C/km), la température au centre de la Terre serait de 500 000°C. Cette valeur immense, évidemment fautive, montre que le géotherme terrestre est plus complexe qu'une simple fonction linéaire de la profondeur.

## B. Origine de la chaleur interne du globe

L'origine de la chaleur interne du globe fait encore l'objet d'étude et n'est pas totalement déterminée. Dans les tous premiers temps de l'histoire de la Terre, les principales sources de chaleur ont sans doute été l'accrétion (énergie d'impact transformée en énergie mécanique (compression et changement de phase) et en énergie thermique) et la radioactivité de courte période (principalement <sup>26</sup>Al et du <sup>60</sup>Fe). Lors des nombreux chocs de météorites au début de l'histoire du système solaire, ces processus ont pu contribuer à une immense

partie de l'énergie thermique accumulée qui a abouti à la formation d'océans magmatiques pour les planètes terrestres (voir chapitre III.).

On estime actuellement que 42 TW sont dégagés par la Terre. En mesurant par spectrométrie de masse la teneur moyenne en éléments radioactifs des différentes enveloppes terrestre et en prenant en compte la l'énergie émise par désintégration par unité de temps, on peut estimer la part de chaleur interne provenant de la radioactivité des principaux éléments radioactifs du manteau et de la croûte : l'uranium ( $^{235}\text{U}$ , 94 mW/kg de roche pour  $^{238}\text{U}$ , 27 mW/kg), le thorium (27 mW/kg) et le potassium (28 mW/kg). Cela correspond à environ 25 TW. La cristallisation de la graine (2 TW) et la contraction de la planète (2,7 TW) produisent également de la chaleur qui peuvent être quantifiées par des expérimentation. Le reste est essentiellement dû à la chaleur résiduelle de la Terre primitive (13,3 TW hérités de la chaleur d'accrétion et de celle liée à la différenciation de la Terre primitive) bien qu'une partie soit associées aux forces de marées. Cette dernière source de chaleur est relativement anecdotique pour la Terre mais devient prépondérante pour d'autres corps du système solaire (e.g. Io, satellite de Jupiter).

## C. La structure interne du globe et les modes de transmission de la chaleur

Trois processus physiques permettent l'échange de chaleur :

**Le rayonnement** : la chaleur émise dépend (pour les corps noirs) de la température (en Kelvins) du corps exposant quatre, selon la loi de Stefan-Boltzmann :

$$W = \sigma T^4$$

avec  $\sigma$  : constante de Boltzmann. Ce processus d'échange de chaleur n'agit que dans les milieux transparents, ce qui n'est pas le cas des enveloppes silicatées de la Terre.

**La convection/advection** : c'est un processus d'échange de chaleur par déplacement de matière sous l'effet d'un changement de masse volumique d'origine thermique. Ces déplacements ne sont possibles que si la dilatation thermique du milieu est élevée, le gradient de température est fort, et la viscosité et la diffusivité thermique du milieu sont limitées. Ainsi, pour qu'une convection puisse être mise en place, on admet généralement qu'il est nécessaire que leur nombre de Rayleigh (sans dimension et dérivé de l'équation de Navier-Stokes) soit supérieur à 2000.

Ce nombre sans dimension s'écrit :

$$Ra = \frac{\alpha \Delta T d^3 g}{\eta \kappa}$$

Avec  $\alpha$  = coefficient de dilatation thermique ;  $\Delta T$  = différence de température ;  $g$  = gravité ;  $d$  : dimension caractéristique du système ;  $\eta$  : viscosité cinématique ;  $\kappa$  : diffusivité thermique.

**La conduction** : c'est un processus de diffusion où les molécules transmettent leur énergie cinétique (vibrations) à d'autres molécules par collision entre elles. La chaleur est conduite dans un milieu en réponse à une variation spatiale de la température. La relation de base qui décrit le transport de chaleur par conduction est la loi de Fourier décrite précédemment. Ce processus agit indépendamment de la viscosité du milieu ou de sa transparence.

L'organisation de l'intérieur de la Terre selon les données sismologiques montre que cette dernière est organisée en lithosphère/asthénosphère/noyau externe/graine. Les géophysiciens s'accordent sur le fait qu'à l'exception des transferts hydrothermaux de fluides, l'essentiel des transferts de chaleur dans la lithosphère ont lieu par conduction. Dans l'asthénosphère et dans le noyau externe, les nombres de Rayleigh élevés font penser que la convection est le mécanisme dominant. La possibilité que la graine convecte (i.e. que la convection soit un mode de dissipation actif dans cette enveloppe) est encore débattue, et les arguments pour reposent essentiellement sur une anisotropie sismique dans la graine qui serait le résultat de mouvements de matière.

Les modes de transmission de chaleur conditionnent le gradient thermique. En effet un milieu en convection, comme l'asthénosphère ou le noyau externe, étant « brassé » est plus homogène thermiquement ( $dT/dz$  petit) qu'un milieu sans convection comme la lithosphère ( $dT/dz$  plus grand).

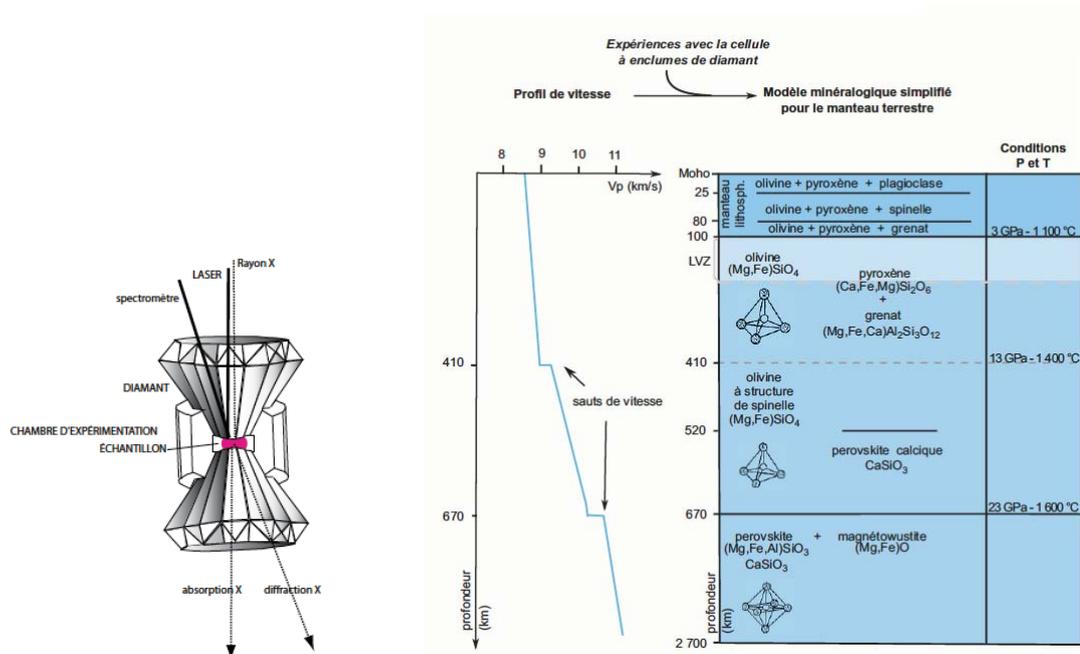
*Transition* : La mesure directe de la température à l'intérieur de la Terre est, en pratique, impossible au-delà des profondeurs atteintes par les forages les plus profonds, qui ne dépassent pas une douzaine de kilomètres. Comment construit-on un géotherme « moyen » jusqu'au centre de la Terre ? »

## II. Construction du géotherme actuel moyen (1D)

### A. Les points d'ancrage

Pour contraindre le géotherme de la Terre profonde, on utilise les données indirectes issues des modèles structuraux, minéralogiques et chimiques ils fournissent des **points d'ancrage essentiels** notamment (en plus de la température de surface... point d'ancrage évident) :

- 1) **Température à la base de la lithosphère** : Elle est estimée à environ 1300°C. En sismologie, une zone de changement de propriété rhéologique est identifiée à environ 100 km de profondeur, au-dessus de la Low Velocity Zone (LVZ). En pétrologie expérimentale, cette température marque la transition mécanique de la péridotite, qui passe des pressions correspondant à 100 km de profondeur ( $P = \rho \cdot g \cdot h$ ) d'un comportement solide plastique à solide fluant à environ 1300°C.
- 2) **Transitions de phase dans le manteau** : Les expériences en minéralogie haute pression (en cellule à enclumes de diamants) menées sur des matériaux péridotitiques (principalement olivine et pyroxènes) permettent de construire les diagrammes de phases, c'est-à-dire d'évaluer les températures associées aux transitions de phase responsables des sauts de vitesse sismique observés par les sismologues aux environs de 410 km et 670 km de profondeur : Vers 410 km, la transition de l'olivine à structure néosilicate vers une structure de spinelle exige une température proche de 1400°C. Vers 670 km, la transition de la structure de spinelle vers la pérovskite implique une température avoisinant les 1600 ± 100°C



**Dispositif expérimental à cellule à enclumes de diamants (d'après Laurent Emmanuel et al., Maxifiches Géologie); modèle couplant analyse minéralogique et données sismiques pour estimer les températures dans le manteau qui serviront de points d'ancrage.**

- 3) **Température au niveau du noyau** : La température de fusion de l'alliage fer-nickel à la pression correspondant à l'interface graine-noyau externe est estimée à environ 4725 ± 1000°C.

TABLEAU 3.4 PRINCIPAUX POINTS D'ANCRAGE ET TEMPÉRATURES LE LONG DU GÉOTHERME.

Profondeur (km)	Nature de l'ancrage	Type d'extrapolation	Température proposée ( K)
100	Limite lithosphère -asthénosphère	–	1 600 ± 50
400	Transition olivine - olivine à structure de spinelle	–	1 750 ± 50
670	Transition olivine à structure de spinelle - perovskite	–	1 900 ± 100
2 700	–	À partir de l'ancrage à 670 km, en utilisant le gradient adiabatique pour la péridotite	2 500 à 3 000
2 900	–	À partir de l'ancrage à 5 150 km, en utilisant le gradient adiabatique pour l'alliage Fe-Ni	3 500 à 4 800
5 150	Température de changement d'état d'un alliage Fe-Ni, aux pressions envisagées	–	4800 ± 1 000

*Principaux points d'ancrages permettant de construire le géotherme terrestre, d'après Peycru et al., BCPST Tout en 1 - Dunod*

## B. Les gradients en lien avec les modes de propagation

**Une fois ces points d'ancrage obtenus, on utilise pour les relier des hypothèses sur les gradients géothermiques.**

Le gradient géothermique conductif, calculé pour la partie supérieure de la croûte, n'est pas une constante applicable à toute la profondeur. On estime en général que la lithosphère est conductive et qu'il existe une différence de production d'énergie entre la croûte et le manteau lithosphérique liée à la différence de composition chimique (plus d'éléments radioactifs dans la croûte car ils sont plus incompatibles). Depuis la température et le gradient en surface, en estimant la production de chaleur dans la croûte on peut estimer l'allure du géotherme dans la croûte. En prenant égaux les températures et flux de chaleurs en haut de la croûte (estimés précédemment) et en haut du manteau lithosphérique, et en faisant des hypothèses sur la production de chaleur dans le manteau lithosphérique, on peut estimer le géotherme dans le manteau lithosphérique.

Dans les couches convectives de la Terre, pour un matériau péridotitique à faible diffusivité thermique, le gradient géothermique minimum correspond au gradient adiabatique, soit  $0,3^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ . Dans le manteau, les valeurs aux différentes profondeurs (points d'ancrage) sont extrapolées aux limites supérieures et inférieures.

Pour le noyau externe en convection le gradient adiabatique est d'environ  $0,5^{\circ}\text{C.km}^{-1}$ . On extrapole la température depuis la limite noyau externe/graine (discontinuité de Lehmann) jusqu'à 2 900 km de profondeur. Au-delà, dans la graine solide, le gradient thermique est plus hasardeux, mais la température ne doit pas beaucoup augmenter car la conductivité du fer est élevée et la radioactivité de la graine sûrement assez faible.

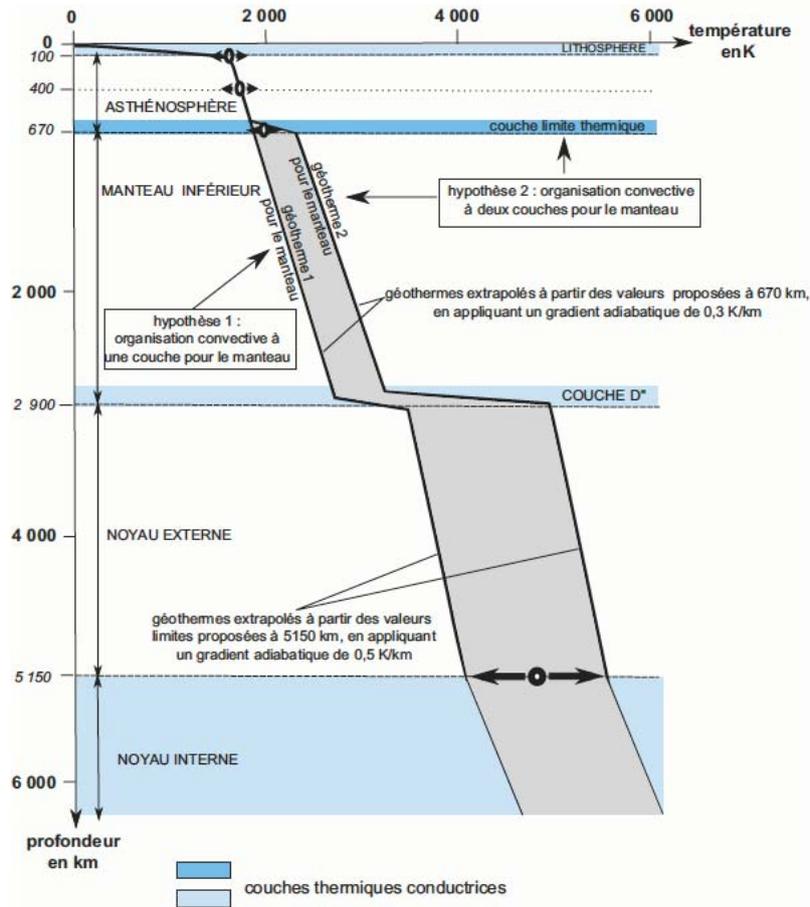


Figure 3.35 Géotherme établi à partir de 4 points d'ancrage profonds et des gradients adiabatiques pour le manteau et le noyau.

**Le géotherme terrestre, construit à partir des points d'ancrage et extrapolé en considérant les modes de propagation de la chaleur dans les différentes enveloppes. D'après Peycru et al., BCPST Tout en 1.**

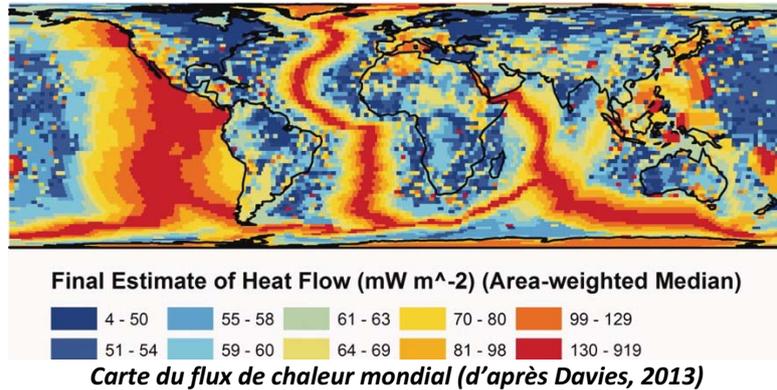
*Transition :* Le géotherme moyen présenté dans cette partie est « 1D » c'est à dire à symétrie sphérique, et actuel. Il s'agit d'un modèle, négligeant les variations latérales liées à la géodynamique ainsi que l'évolution temporelle liées au refroidissement séculaire de la Terre. Comment ces variations spatio-temporelles peuvent-elles être appréhendées ?

### III. Les variations spatiales et temporelles du géotherme

#### A. Les hétérogénéités spatiales actuelles

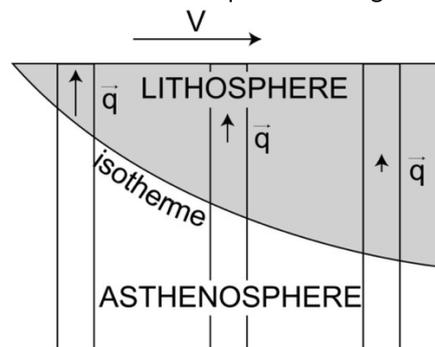
##### 1) En surface (flux de chaleur) témoin de l'épaisseur de la lithosphère

Le flux de chaleur en surface a été déterminé à partir de plus de 38 000 données de terrain aussi bien sur croûte continentale qu'océanique. En complétant par des estimations dans les zones non étudiées, une carte mondiale peut être proposée (figure ci-dessous).



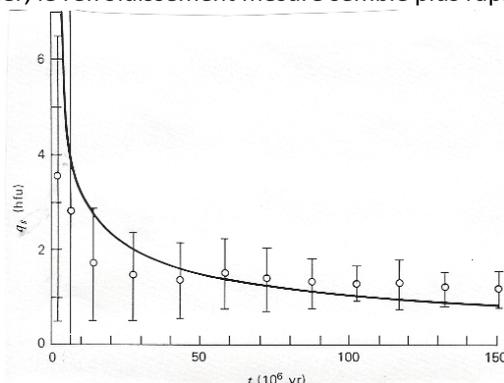
Cette carte est riche en informations : tout d'abord, l'échelle de variations du flux de chaleur est très grande, allant de zone ayant un flux de  $4 \text{ mW.m}^{-2}$  à des zones ayant un flux de l'ordre de  $130\text{-}919 \text{ mW.m}^{-2}$ . Le flux de chaleur moyen est de l'ordre de  $87 \text{ mW.m}^{-2}$ , mais il est différent sur les continents ( $\sim 65 \text{ mW.m}^{-2}$ ) et sur les océans ( $\sim 100 \text{ mW.m}^{-2}$ ).

Il existe une association claire des zones à flux de chaleur élevé avec les dorsales océaniques, et le flux de chaleur diminue ensuite de part et d'autre des dorsales depuis des valeurs pouvant atteindre  $919 \text{ mW.m}^{-2}$  jusqu'à des valeurs de l'ordre de  $<50 \text{ mW.m}^{-2}$ . Si on reprend la loi de Fourier, entre deux zones à différentes distances de la dorsale, à travers la lithosphère (de conductivité constante), comme le  $dT$  est identique ( $1300^\circ\text{C}$  dans les deux cas entre le sommet de la lithosphère à environ  $0^\circ\text{C}$  et la base de la lithosphère à  $1300^\circ\text{C}$ ) la variation de flux de chaleur s'explique au premier ordre par le  $dz$  (l'épaisseur). L'évolution traduit la présence de matériel chaud (l'asthénosphère à  $1300^\circ\text{C}$ ; voir chapitre précédent) très près de la surface au niveau des dorsales, et de plus en plus profond au fur et à mesure que l'on s'éloigne des dorsales.



**Modèle sans dimension de l'épaississement de la lithosphère océanique depuis un zone théorique de dorsale (à gauche). L'épaississement de la lithosphère éloigne de la surface l'isotherme  $1300^\circ\text{C}$  et explique la diminution du flux de chaleur observée quasi-symétriquement de part et d'autre de la dorsale.**

Il s'agit là d'un modèle conductif, mais on ne doit pas oublier qu'une partie de la chaleur est évacuée de façon convective par l'hydrothermalisme océanique et la circulation de fluide à travers la lithosphère. Cette circulation explique la différence du flux de chaleur observé versus modélisé avec une simple conduction sur le plancher océanique. En particulier, le refroidissement mesuré semble plus rapide que celui théorique.



**Flux de chaleur sur le plancher océanique en fonction de l'âge. Théorie (trait continu) et mesures (ronds blancs) d'après <http://www.geologie.ens.fr/~vigny/cours/chp-gphy-1.html>**

La carte mondiale du flux de chaleur met en évidence la dichotomie entre dorsales lentes et rapides : la zone à fort flux de chaleur, c'est-à-dire à fort gradient thermique, est assez étroite dans l'océan Atlantique en comparaison de la zone à fort flux de chaleur dans l'océan Pacifique. Cette différence est à mettre en relation avec la différence de vitesse d'expansion des dorsales océaniques atlantique (« dorsale lente ») et pacifique (« dorsale rapide »). Le flux de chaleur est élevé au niveau des arcs volcaniques tandis qu'il est faible au niveau des fosses associées à la subduction à cause de l'enfoncement de matériel froid. Il est généralement très faible au niveau des cratons (épais).

L'énergie libérée par le flux de chaleur est ainsi largement supérieure à celle libérée par l'ensemble de l'activité volcanique ( $\sim 0,8$  TW) ou celle libérée par l'ensemble de l'activité sismique ( $\sim 1$  TW), mais elle est largement inférieure à l'énergie solaire que nous recevons (173 000 TW).

Notons que ce flux de chaleur traduit un gradient thermique qui doit nécessairement diminuer en profondeur. Si l'augmentation de température était constante est équivalente à celle enregistrée dans la figure 2 ( $80^\circ\text{C}/\text{km}$ ), la température au centre de la Terre serait de  $500\,000^\circ\text{C}$ . Cette valeur est évidemment immense et fautive. Les géophysiciens estiment en fait que la température ne doit pas excéder  $6000^\circ\text{C}$  au centre de la Terre. Essayons dans une seconde partie de comprendre les mécanismes de transfert de chaleur et de déterminer l'origine de la chaleur interne du globe.

Notons également que le géotherme contrôle la rigidité de la lithosphère et le découplage/lithosphère/asthénosphère. C'est ce découplage mécanique qui conditionne la tectonique des plaques.

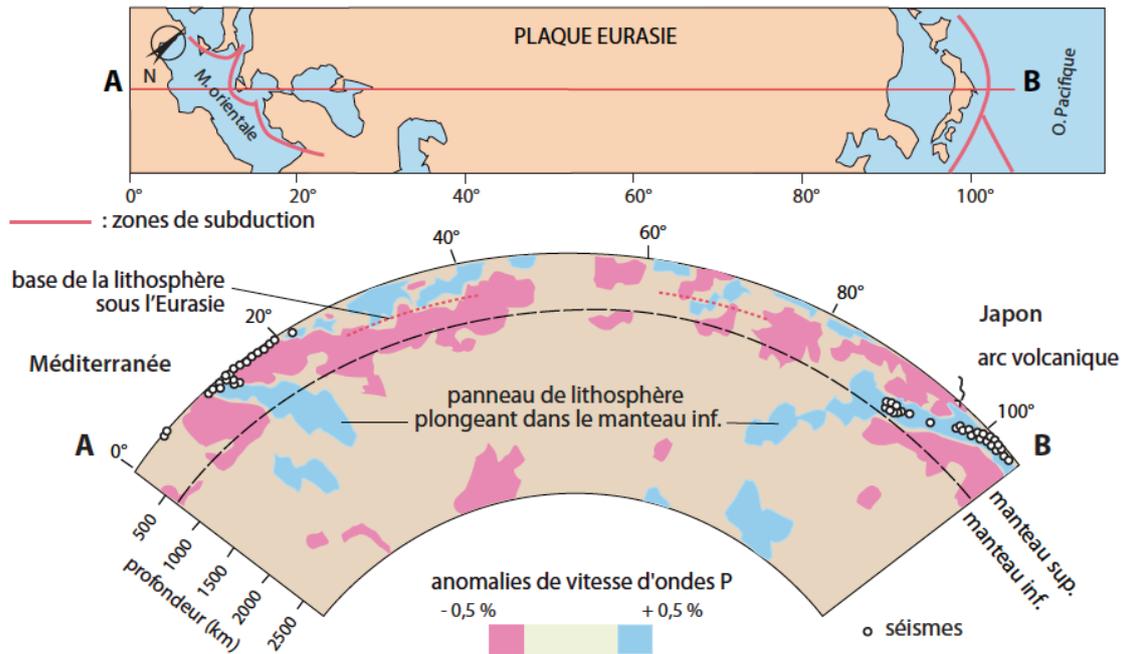
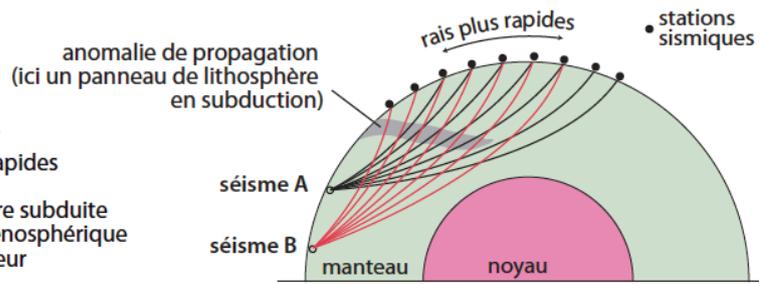
Enfin la faible conductivité thermique de la lithosphère continentale a des conséquences importantes lors de la présence de supercontinents. Par exemple, l'effet bouclier thermique de la Pangée est sans doute à l'origine d'une accumulation de chaleur ayant abouti à la formation de l'immense Province Magmatique Centre Atlantique (CAMP).

## 2) Dans le manteau asthénosphérique, la tomographie sismique témoin d'anomalies du géotherme... (et mouvements du manteau)

Le géotherme décrit dans le chapitre précédent est à géométrie sphérique pour les couches internes. La tomographie sismique permet aujourd'hui de discuter cette idée. La tomographie sismique repose sur la comparaison des temps d'arrivée des ondes sismiques avec des temps théoriques dans un modèle de Terre de référence (PREM) à géométrie sphérique (figure ci-dessous). Cette comparaison met en évidence l'existence et la géométrie de zones anormalement lentes ou rapides dans le manteau terrestre. Ces différences de temps d'arrivée des ondes (mesure versus théorique) sont généralement interprétées comme liées à des zones d'« anomalie » de vitesse des ondes à mettre en relation avec des « anomalies » de température du milieu (matériau anormalement chaud ou froid). Ainsi, la tomographie sismique soutient l'idée d'un géotherme très variable spatialement. Elle contribue à comprendre les mouvements (ascendants de matériel chaud et descendant de matériel froid) dans le manteau. Par exemple, en réalisant une coupe tomographique entre la mer Méditerranée et le Japon (figure ci-dessous), on remarque des anomalies de vitesses positives dans le manteau assimilables à un matériau plus froid plongeant dans le manteau sous la mer Egée et la Mer du Japon. Ces anomalies mettent en évidence les plaques lithosphériques froides des subductions égéenne et ouest-pacifique.

### Principe de la tomographie sismique

Cette méthode permet d'imager les zones rapides et lentes dans le manteau  
 zones plus rapides = panneaux de lithosphère subduite  
 zones plus lentes = manteau supérieur asthénosphérique  
 zones à vitesse « normale » = manteau inférieur



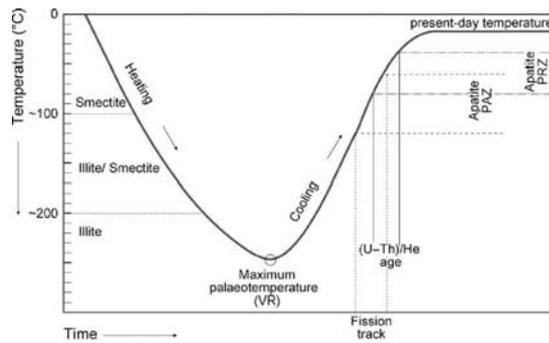
**Coupe tomographique à travers l'Eurasie montrant les subductions en Méditerranée et sous le Japon**  
**Principe de la tomographie sismique et coupe tomographique à travers l'Eurasie. D'après Lagabrielle et al., Mémo Visuel de géologie**

Nous avons mis en évidence une disparité spatiale importante du géotherme. Cette photographie complexe s'inscrit dans une évolution temporelle de notre planète.

### B. L'évolution du géotherme sur les temps courts (10aine de ma) témoigne des processus pétrogénétiques

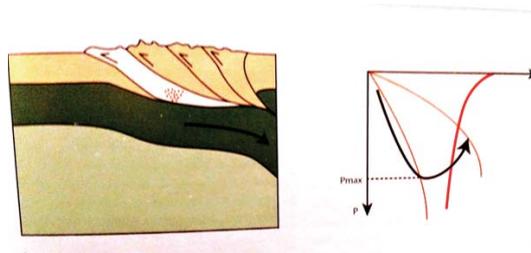
#### 1) Implications du géotherme : le lien entre enfouissement / augmentation de température / et diagenèse voire magmatisme

Lorsque des sédiments se déposent, cela se produit dans des environnements de surface à basses température et pression. Si le processus d'apport de particules se poursuit, un enfouissement se produit éloignant les couches les plus précoces de la surface (froide). Une augmentation de la température a lieu, suivant le géotherme. Cette augmentation de la température puis la diminution lorsque ces roches reviennent en surface peut être enregistrées (figure ci-dessous) et datées. Dans ce cas elles renseignent sur la chronologie du trajet des sédiments le long du géotherme. Il existe ici une ambiguïté entre une augmentation de la température qui serait induite par l'enfouissement et celle qui serait liée à un réchauffement.



***Histoire thermique d'un bassin sédimentaire reconstituée en intégrant des données issues de plusieurs paléothermomètres et chronomètres. Les données sur l'illite permettent de contraindre la phase d'enfouissement ou de chauffage de l'histoire thermique du bassin, la réflectance de la vitrinite (VR) enregistre la température maximale, et la thermochronologie combinée des apatites permet de déterminer le moment du refroidissement et de la dénudation (modifié d'après Pevear, 1999).***

Dans les chaînes de collision, l'enfouissement se joue à échelle crustale et peut être contrôlé par les fronts de chevauchement. Pour la zone chevauchée, la température augmente pour deux raisons : d'une part elle s'éloigne de la surface (froide) et d'autre part, la surface de la zone chevauchée est mise en contact avec la base (chaude) de la zone chevauchante. Il y a une modification du géotherme, liée à la superposition de nappes. L'augmentation de température est importante et peut aboutir à la fusion (en particulier lorsque la pression est relâchée par la dénudation ; voir figure ci-dessous) dont témoigne de nombreux granites orogéniques (par exemple varisques). Ce processus de fusion participe au recyclage de la croûte continentale.

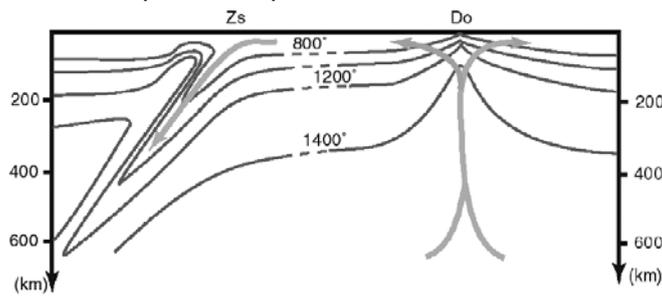


***Fusion de la croûte continentale au cours de la collision par enfouissement et relaxation thermique. Le trait gras représente le solidus ; les traits fins représentent le géotherme avant et après enfouissement. La flèche noire montre qu'une roche crustale enfouie selon un géotherme moyen peut franchir le solidus et donc fondre lorsque le géotherme se rééquilibre dans des conditions d'épaississement crustal plus chaudes (d'après Jaujard, Géodynamique – Pétrologie – Etudes de terrain).***

## 2) Un lien entre paragenèse/géotherme et contexte géodynamique révélé par les roches métamorphiques

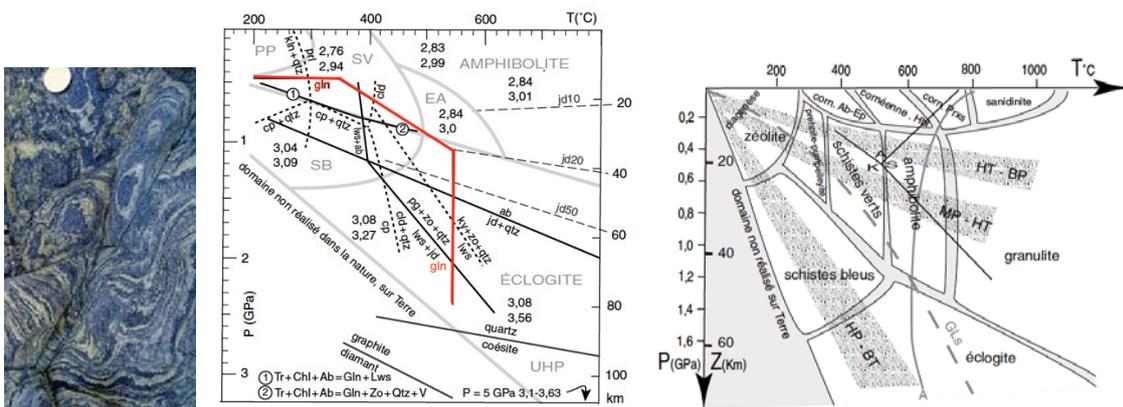
Précédemment, nous avons mis en évidence un lien fort entre géodynamique et géotherme. Une synthèse peut être représentée à travers la figure suivante présentant la profondeur des isothermes en fonction de la profondeur. Dans cette figure, on observe que dans les zones de subduction (Zs) les isothermes sont plus espacés. Dans ce cas, le gradient géothermique est plus faible, ce qui signifie que l'on s'attend à trouver des roches anormalement froides pour leur profondeur. Symétriquement, dans les zones de dorsale

(Do), les isothermes sont plus resserrés, signifiant qu'on peut trouver dans ces zones des roches anormalement chaudes pour leur profondeur.



**Représentation des isothermes dans la croûte et le manteau supérieur. D'après Nicollet, Métamorphisme et géodynamique, Dunod.**

Traiter de la température et la pression enregistrées par les roches est le cœur de métier de la pétrologie métamorphique. Elle associe à une composition chimique, une température et une pression un assemblage minéralogique (ou paragenèse). La stabilité des différents minéraux et assemblages du métamorphisme ont initialement été étudiés en pétrologie expérimentale. D'immenses bases de données permettent aujourd'hui de réaliser des modélisations thermodynamiques. Des assemblages caractéristiques observés pour des metabasites ont permis de proposer des grands « types » de faciès métamorphiques. Certains faciès sont particulièrement caractéristiques de contextes géodynamiques. Par exemple, lorsque dans une chaîne de collision comme les Alpes ou dans une chaîne plus ancienne comme la chaîne Varisque on trouve une metabasite à glaucophane (métagabbro du Guil dans les Alpes ou Glaucophanite de l'île de Groix pour la chaîne varisque ; figure ci-dessous), on peut en déduire un passage d'une roche typique d'une croûte océanique en faciès schistes bleus, c'est-à-dire en condition de haute pression – basse température. Cela renseigne directement sur le paléogéotherme (ici plus froid que la moyenne), et indirectement sur le contexte géodynamique passé (témoin d'un contexte de subduction ou du matériau « froid » se retrouve à des pressions inhabituelles). On dresse ici un lien entre l'étude d'un paléogéotherme et un contexte, qui permet de décrypter l'histoire géodynamique d'une région.



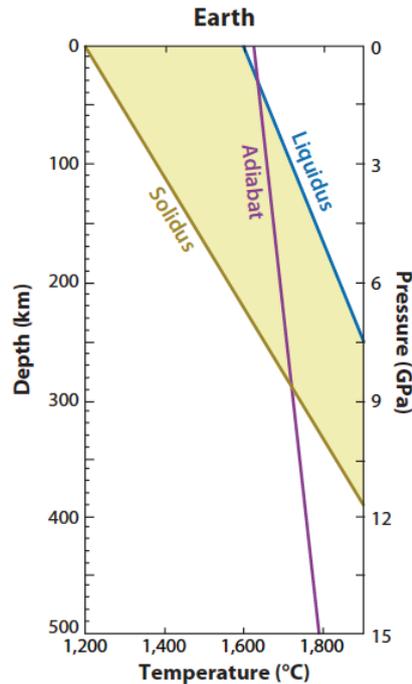
**Echantillon de metabasite en faciès schiste bleu de l'île de Groix (d'après site web, Christian Nicollet) ; domaine de stabilité de la glaucophane d'après Nicollet, Métamorphisme et géodynamique, Dunod. ; Faciès métamorphiques et gradient associés d'après Nicollet, Métamorphisme et géodynamique, Dunod.**

C. L'évolution du géotherme sur les temps longs (milliards d'années) est mise en évidence par les roches magmatiques et consiste en un refroidissement séculaire

### 1) L'océan magmatique témoin d'une Terre initialement très chaude

Comme présenté précédemment, la Terre n'a sans doute jamais été aussi chaude qu'à sa naissance il y a 4.5 Ga, alors que les impacts apportaient beaucoup plus de chaleur que maintenant et alors que la radioactivité (courte et longue période) était à son paroxysme. Depuis la fréquence des impacts a diminué de plusieurs ordres de grandeurs, et la radioactivité propre à chaque élément a connu une décroissance exponentielle. En remontant le temps, on s'attend donc à ce que la Terre primitive ait été beaucoup plus chaude qu'aujourd'hui, à tel point qu'elle a pu être entièrement fondue. On parle d'océan magmatique. L'argument historique en faveur de l'océan magmatique est l'existence du noyau, dont la formation (séparation fer/silicate) paraît difficile au sein d'une Terre entièrement solide. D'autres arguments confirment cette hypothèse comme ceux révélés par la géochimie. L'abondance de l'isotope  $^{142}\text{Nd}$ , issu de la décomposition d'un isotope radioactif aujourd'hui éteint, le  $^{146}\text{Sm}$  est presque identique dans toutes les roches terrestres. Deux exceptions sont des roches du Canada et du Groenland datant d'au moins 3,7 Ga. Celles-ci présentent dans leur composition, des traces d'inhomogénéités primordiales constituées au moment de cette cristallisation d'un l'océan magmatique. Un manteau en grande partie ou entièrement fondu nécessite des températures bien plus élevées qu'actuellement témoignant d'un géotherme très différent de l'actuel. Ces conditions n'ont pas pu durer longtemps, les zircons les plus anciens (Jack Hills) indiquant que l'océan magmatique a dû se solidifier progressivement entre 4,53 et 4,40 Ga, permettant l'émergence d'une croûte primitive et, potentiellement, des premières interactions avec l'eau.

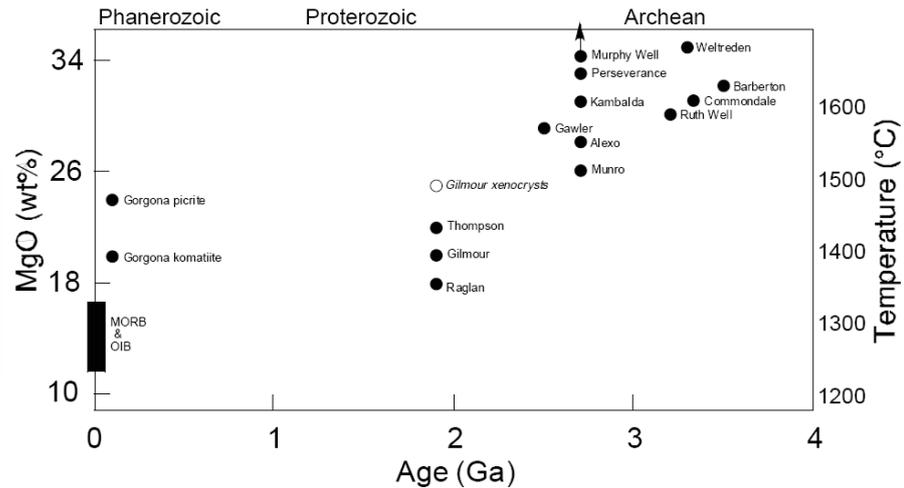
Depuis le géotherme de l'Hadéen et jusqu'à celui que nous connaissons actuellement, comment s'est refroidie la Terre ? Les roches anciennes témoignent de cette histoire thermique.



***Solidus et liquidus du manteau terrestre témoignant des températures à atteindre pour un manteau entièrement fondu, tel qu'au début de l'histoire de la Terre. D'après Elkins-Tanton et al., 2012***

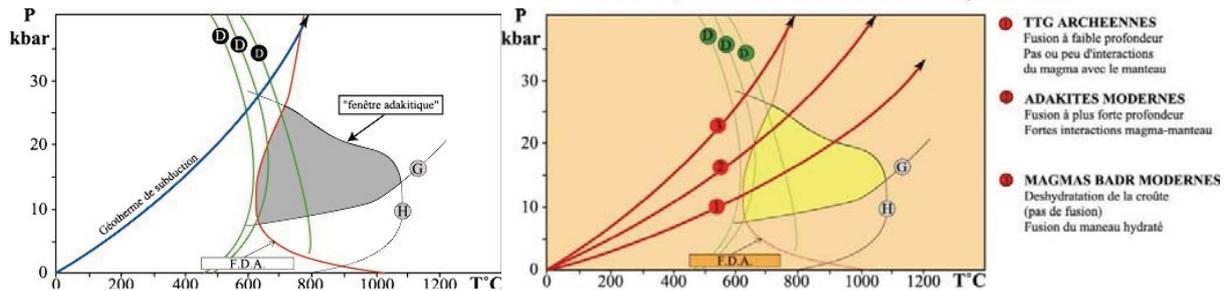
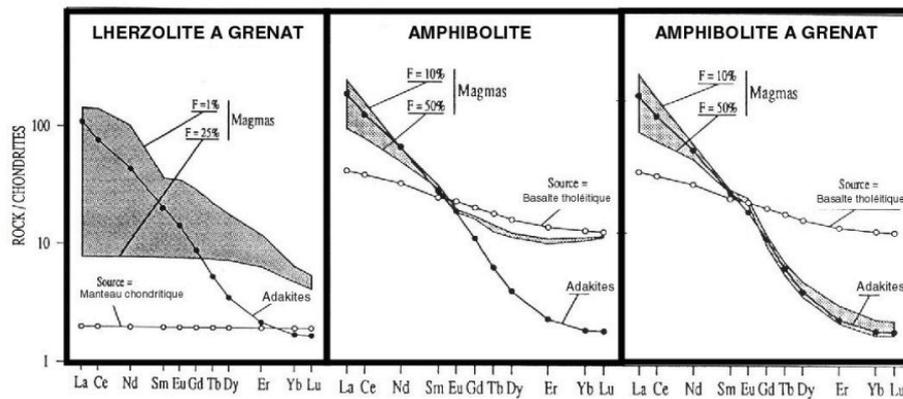
## 2) Les komatiites et les TTG, témoins d'un refroidissement séculaire de la Terre

Les **komatiites** sont des roches volcaniques ultramafiques riches en magnésium présentant souvent une texture spinifex, formée par des cristaux allongés d'olivine ou de pyroxène. Cette texture indique un refroidissement rapide du magma, conduisant à la croissance rapide de ces cristaux dans une matrice de verre. Un magma riche en MgO (élément compatible) témoigne d'un fort taux de fusion et provient d'un manteau fondu à très haute température. Ainsi, les komatiites, contenant plus de 18 % de MgO, indiquent des températures de magma extrêmement élevées (~1500-1600°C), tandis que les basaltes modernes, avec environ 8-12 % de MgO, reflètent des températures plus modérées (~1100-1250°C). Représenter la teneur en magnésium des roches volcaniques ultramafiques et mafiques au cours du temps permet ainsi de caractériser le refroidissement du manteau terrestre. Il y a 3 Ga, le manteau devait être approximativement 300°C plus chaud qu'aujourd'hui et le géotherme décalé vers ces hautes températures (figure ci-dessous). Un ordre de grandeur de refroidissement du manteau semble avoisiner les 100°C/Ga.



**Komatiite de la Komati River Valley (Afrique du Sud). La texture allongée des olivines témoigne directement d'un refroidissement rapide (surfusion) et indirectement de la température très élevée du magma qui a cristallisé (d'après Alex Streckeisen, site web). Teneur en magnésium (assimilable à une température) de roches volcaniques ultramafiques et mafiques, en fonction du temps. Il y a 3 Ga, le manteau devait être approximativement 300°C plus chaud qu'aujourd'hui (d'après Arndt et al., Komatiites, Cambridge).**

D'autre part, à l'Archéen les lithologies dominantes sont des orthogneiss gris, souvent très déformés avec une composition de granitoïdes sodiques : ce sont des tonalites (diorites quartzifères), des trondhjémites (plagiogranites) et des granodiorites : On parle de série « T.T.G. ». Dans ces roches, le plagioclase représente le feldspath dominant comme c'est le cas dans les **adakites** actuelles. Les adakites sont des roches volcaniques formées dans les zones de subduction qui se distinguent des « classiques » basalte-andésite-dacite-rhyolite par leur minéralogie, leur composition chimique et leur origine : alors que les basalte-andésite-dacite-rhyolite sont formés lorsqu'une « vieille » lithosphère océanique plonge en subduction, se déshydrate en hydratant le manteau et que le manteau hydraté fond étant à l'origine du magma, c'est différent pour les adakites. Leur spectre de terre-rares ne peut être reproduit expérimentalement par une fusion de péridotite (Iherzolite à grenat dans la figure ci-dessous) mais par celle d'une croûte océanique amphibolitisée et contenant du grenat. Ces indices permettent de contraindre les conditions P,T de formation des adakites (on parle de fenêtre adakitique délimitée par les courbes de fusion-déshydratation de l'amphibole ; stabilité du grenat, et disparition de l'amphibole ; voir figure ci-dessous) : la singularité des adakites est que la magma proviendrait de la fusion directe de la croûte, en relation avec le fait que les adakites sont géographiquement localisés là où une jeune plaque océanique (encore chaude) passe en subduction). Dans ce cadre, le solidus est franchi avant la courbe de déshydratation. Cela implique un géotherme anormalement chaud dans ces rares zones de subduction aujourd'hui. Au contraire à l'Archéen, l'abondance des TTG montre que les « subductions chaudes » étaient peut-être la norme contraignant une fois encore le refroidissement séculaire de la Terre.

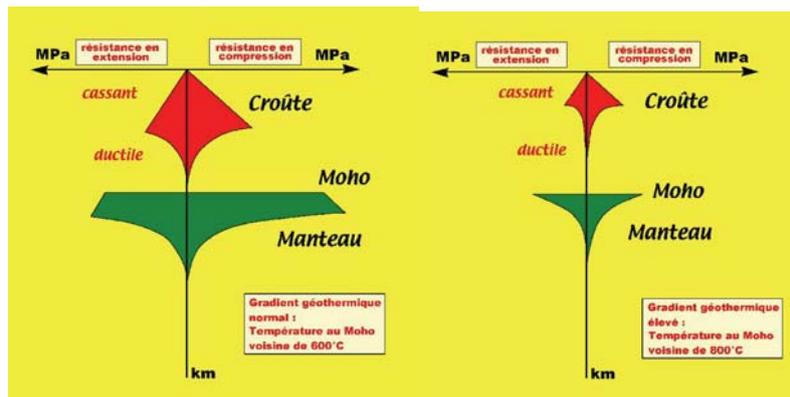


**Diagramme P-T, montrant les réactions de fusion-déshydratation de l'amphibole dans un basalte hydraté et les courbes de déshydratation des minéraux hydratés le composant (chlorite, actinote ...). FDA : fusion-déshydratation de l'amphibole ; D : déshydratation des minéraux hydratés composant le basalte. La courbe G correspond à la limite inférieure de stabilité du grenat, H correspond à la disparition de l'amphibole (hornblende). Le champ grisé figure la « fenêtre adakitique ». Les traits épais représentent les gradients géothermiques dans une zone de subduction. (D'après <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/adakites.xml>)**

**Transition :** Après avoir contraint le géotherme moyen terrestre, nous avons mis en évidence à la fois une évolution temporelle, mais aussi une grande évolution spatiale. Dans certaines régions du globe la température du sous-sol augmente plus vite que dans d'autres. Cela constitue une ressource de chaleur, c'est-à-dire d'énergie, qui peut être avantageuse. Voyons quelles utilisations l'on fait de la géothermie.

## D. Conséquences des variations spatiales et temporelles du géotherme sur la tectonique de plaques

Les variations spatiales du géotherme ont une conséquence majeure sur la localisation de la déformation. Conséquence de l'amincissement, la modification du géotherme (resserrement des isothermes) dans les zones en extension entraîne une modification de la rhéologie de la lithosphère. En effet, cette dernière dépend entre autres de sa température et donc le « réchauffement » du géotherme réduit la viscosité des roches ductiles favorisant leur déformation plastique (Dans le cas d'un gradient géothermique fort, les zones de résistance deviennent moins épaisses et les courbes de ductilité remontent vers de plus basses pressions ; figure ci-dessous). Une lithosphère chaude est plus faible mécaniquement et ceci est impliqué dans la localisation de l'ouverture océanique.



**Profils rhéologiques en extension et en compression pour un gradient géothermique normal (gauche) et pour un gradient élevé (droite). D'après <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/profils-rheologiques.xml>**

Si l'évolution spatiale du géotherme aide à la localisation des dorsales, l'évolution temporelle du géotherme (refroidissement séculaire de la Terre) contraint la longueur globale des dorsales. En effet, actuellement l'essentiel de la chaleur interne s'échappe au niveau des dorsales et à l'époque où la Terre était plus chaude, plus de chaleur devait s'échapper par plus de dorsales (une plus grande longueur globale). Ceci a vraisemblablement eu des conséquences sur le découpage de la lithosphère en plaques : si à l'Archéen il y avait plus de longueur de dorsale, la lithosphère devait être plus découpée et les plaques devaient être plus nombreuses et plus petites.

## IV. Les utilisations du géotherme : « la géothermie »

Le terme de géothermie regroupe des utilisations de la « chaleur » terrestre extrêmement différentes. Dans cette partie, nous nous intéresserons à la diversité des technologies développées et aux implications en termes de sites d'installation, face à l'hétérogénéité géographique du gradient géothermique.

### 1) La géothermie de très basse-énergie

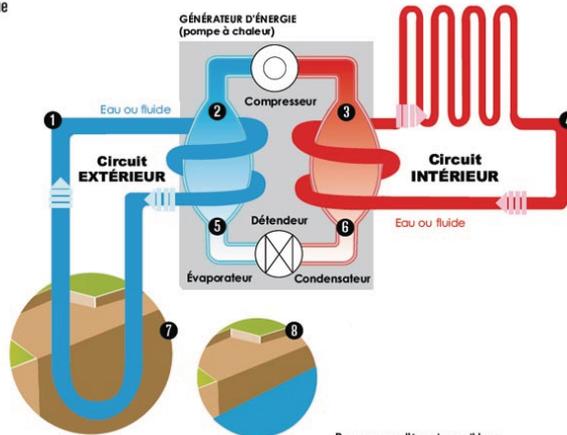
Cette technologie s'est démocratisée ces dernières années pour le chauffage individuel des habitations. Elle ne nécessite pas de ressource particulièrement rare, et n'utilise finalement que l'inertie thermique des roches en surface – dont la température avoisine les 15°C – pour faire fonctionner une pompe à chaleur.

La température du sol et du sous-sol (jusqu'à une profondeur de 10 à 20 m), reste constante tout au long de l'année. Elle correspond à la moyenne annuelle/pluriannuelle locale des températures, en prenant en compte les variations jour-nuit et été-hiver. En France métropolitaine, cette température se situe généralement entre 12 et 15 °C. Cette température superficielle du sous-sol est déterminée par le rayonnement solaire et la température de l'air, donc par des facteurs comme la latitude et l'altitude. Elle n'est pas influencée par le flux de chaleur provenant des profondeurs de la Terre et donc **indépendante du géotherme**. Cette technologie peut donc être installée sans contrainte d'ordre géodynamique et repose sur l'exploitation de l'inertie de cette température moyenne du sous-sol, ainsi que celle des nappes phréatiques qui s'y trouvent, pour chauffer nos habitations.

Le principe consiste à utiliser une pompe à chaleur couplée à un réseau de tuyaux enterrés sous un jardin ou connectés à une nappe phréatique superficielle. Cette pompe extrait la chaleur du sous-sol et/ou de la nappe en les refroidissant, pour ensuite la transférer au réseau d'eau chaude de la maison (chauffage ou eau sanitaire) (figure ci-dessous). Au bout de quelques mois d'utilisation, le sous-sol et/ou la nappe pourraient se refroidir, rendant leur énergie indisponible. Cependant, l'été permet de recharger naturellement le sous-sol grâce à la chaleur solaire.

Principe schématique de la pompe à chaleur géothermique

- 1 Circuit d'eau glycolée
- 2 Vapeur basse pression
- 3 Vapeur haute pression
- 4 Circuit de chauffage
- 5 Liquide basse pression
- 6 Liquide haute pression
- 7 Source de chaleur : la terre
- 8 Source de chaleur : l'eau (nappe souterraine)



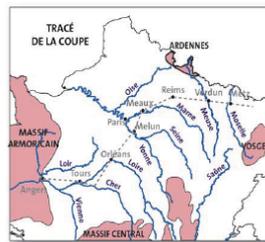
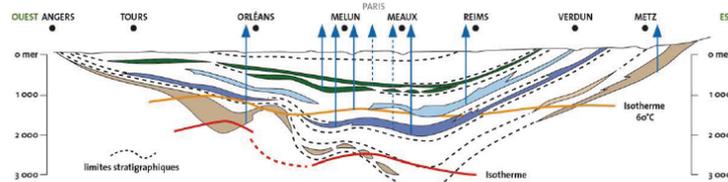
Deux sources d'énergie possibles :  
 - la terre (captage horizontal et vertical)  
 - l'eau (captage sur nappe)

Principe de la géothermie très-basse énergie. D'après Source : [www.guide-geothermie.org](http://www.guide-geothermie.org)

Lorsque l'on dispose à quelques centaines de mètres de profondeur d'eau dont la température avoisine les 40°C – ce qui, là encore, est relativement courant – cette eau peut directement être utilisée pour le chauffage des piscines, ou serres.

## 2) La géothermie de basse énergie

Elle utilise de l'eau pompée en profondeur (>1000 m) et dont la température avoisine 80°C pour le chauffage collectif. Le cas du bassin parisien, dont les aquifères profonds permettent de chauffer les HLM de villes (par exemple Châteauroux ; voir figure ci-dessous). Cette technique nécessite un aquifère géothermal adapté, c'est-à-dire relativement profond, comme celui du Dogger du bassin de Paris. La géothermie basse énergie utilise directement le géotherme terrestre, dans la mesure où l'aquifère est chaud de par sa profondeur.



PÉRIODES		AQUIFÈRES
TERTIAIRE 65 millions d'années		
CRÉTACÉ 100 millions d'années	NEOCÉTACÉ	Sables de l'Albien
	ÉOCÉTACÉ	Sables du Néocomien
JURASSIQUE 195 millions d'années	MALM	Calcaires du Lusitanien
	DOGGER	Calcaires du Dogger
	LIAS	Grès du Retien
TRIAS 225 millions d'années	TRIAS	Grès de Lorraine à l'est Grès fluviatiles à l'ouest
PRIMAIRE		

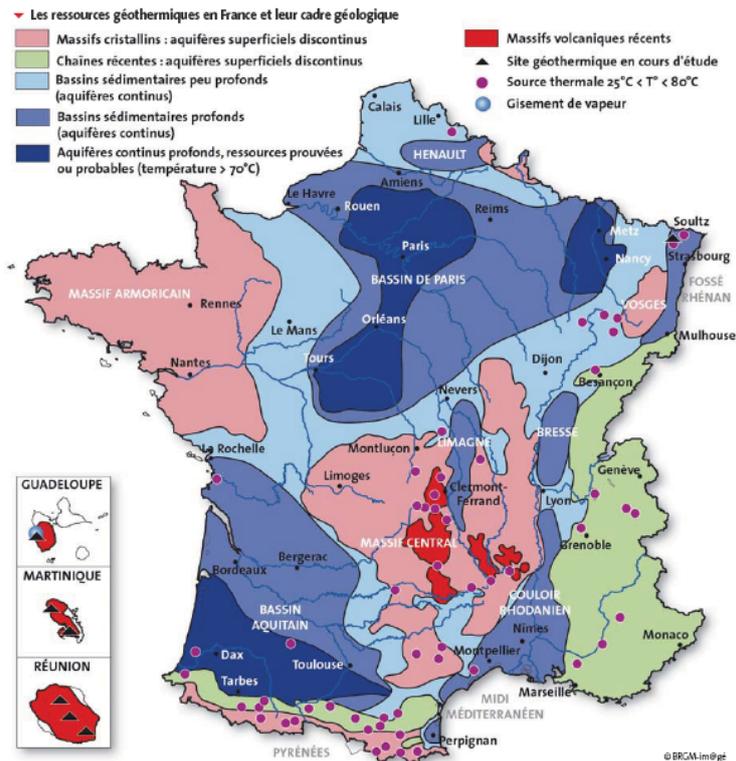
Formé par un empilement de couches sédimentaires qui se sont déposées au cours des trois dernières ères géologiques sur un socle cristallin ou granitique plus ancien, le Bassin parisien possède la particularité d'être très stable. Cinq grands réservoirs aquifères géothermaux y ont été recensés, dans différentes couches de sédiments.

La plus connue et la plus exploitée est celle du Dogger (un étage du Jurassique) dans la région Ile de France. Ce réservoir, calcaire, qui s'étend sur 15 000 km<sup>2</sup>, offre des températures variant entre 35°C et 85°C et assure le fonctionnement de 34 installations géothermales. Mais dans la région Centre, ce sont les sédiments gréseux du Trias qui permettent à

Châteauroux de chauffer 1 310 logements HLM. Et à Paris, un autre réservoir situé dans les sédiments de l'Albien (les "sables verts") assure le chauffage et la climatisation de la Maison de Radio France. Les sédiments du Lusitanien et du Néocomien sont, quant à eux, peu exploités, bien que leurs ressources ne soient pas négligeables.

Coupe géologique simplifiée du bassin de Paris figurant les principaux aquifères (d'après BRGM)

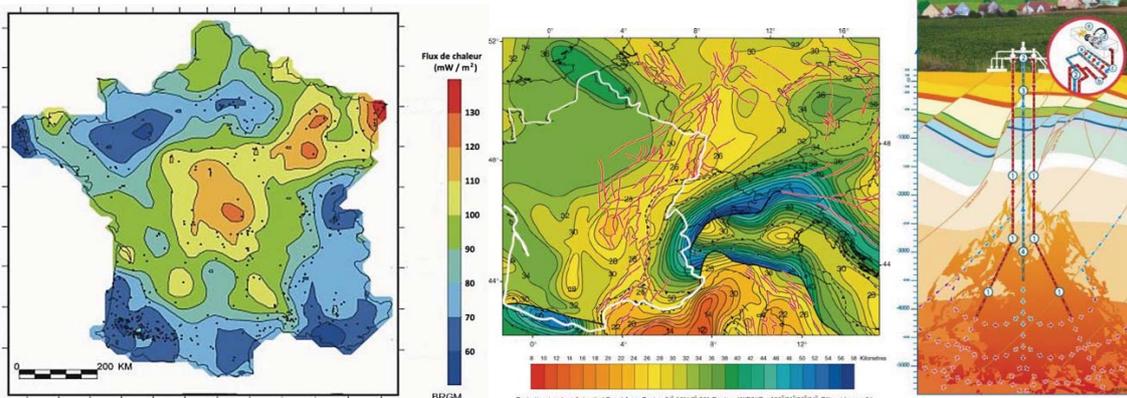
En France (figure ci-dessous), l'exploitation d'aquifères chauds n'est possible que dans le bassin de Paris et le sud du bassin aquitain. Il ne s'agit pas nécessairement de zones présentant un gradient géothermique supérieur (ou un géotherme plus chaud) à la moyenne, mais plutôt de zones géologiquement adaptées grâce à la géométrie des aquifères.



Les ressources géothermiques en France et leur cadre géologique (d'après BRGM).

### 3) La géothermie profonde

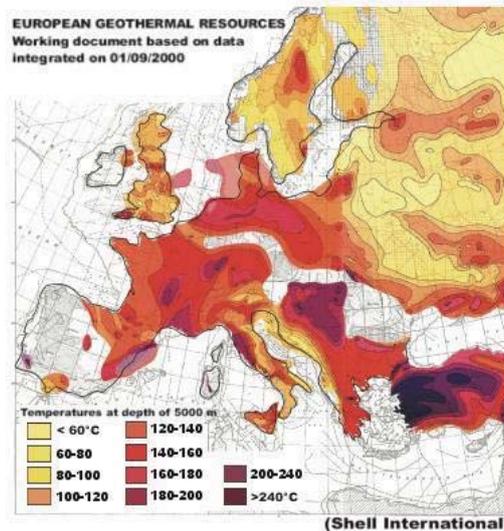
En France métropolitaine, le flux de chaleur est maximal (c'est-à-dire le gradient géothermique est maximal ou encore le géotherme est le plus chaud) en Alsace (figure ci-dessous). Ce flux de chaleur élevé est lié à un amincissement lithosphérique dont témoigne la carte de profondeur du Moho (figure ci-dessous). C'est une région où la géothermie profonde peut-être testée. Elle utilise l'extraction d'eau chaude du sous-sol par un ou plusieurs puits profonds (~5 000 m). Cette eau est transformée en vapeur par un échangeur thermique, et la vapeur est utilisée pour entrainer une turbine qui produit de l'électricité via un alternateur. L'eau refroidie est alors réinjectée en profondeur. Cette technique a été testée à Soultz-sous-Forêts (figure ci-dessous) et permet cette fois de transformer la chaleur en électricité, une énergie particulièrement facile à transporter et transformer.



Carte du flux de chaleur en France. D'après BRGM, modifié par <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/chaleur-Terre-geothermie.xml> ; Profondeur du Moho, modifié d'après Ziegler et al., 2002  
 Principe de la géothermie à Soultz-sous-Forêts : (1) extraction de l'eau chaude du sous-sol par deux puits de production. (2) En surface, transformation par l'intermédiaire d'un échangeur de l'eau chaude en vapeur pour entrainer une turbine productrice d'électricité. (3) Ré-injection d'eau refroidie à 5000 m de profondeur par le

**puit central. (4) Circulation d'eau dans les fractures et réchauffement au contact de la roche chaude (200°C).**  
D'après <http://www.soultz.net/fr/>

Le contexte géodynamique, à l'origine de l'amincissement lithosphérique et de la modification du **géotherme** proche de la surface est ici déterminant. A l'échelle européenne, il y a une grande inégalité devant cette ressource dont pourraient profiter turcs ou italiens mais pas les scandinaves (figure ci-dessous). A une même profondeur (accessible au forages) de 5 000 m, la température est de plus de 240°C vers Ankara contre moins de 60°C à Stockholm.

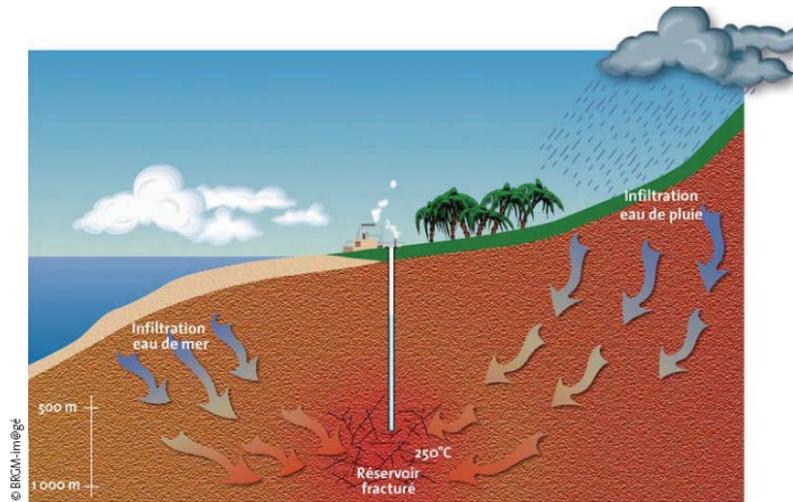


**Carte de la température à 5 000 m de profondeur en Europe (d'après Shell International)**

Même s'il s'agit là de l'exploitation d'une ressource naturelle renouvelable et gratuite aux premiers abords, le pompage de l'eau et le processus de transformation de l'eau en vapeur par échangeur thermique entraînent des surcoûts qui font que cette énergie est assez chère. Cette ressource deviendra plus compétitive uniquement lorsque le prix des matières premières énergétiques aura augmenté, pour des raisons géopolitiques d'accès à ces ressources, ou pour des raisons environnementales privilégiant les énergies renouvelables.

#### 4) La géothermie de haute-énergie

La géothermie à très haute température repose sur l'exploitation, par forage et fracking, de nappes phréatiques ou de roches sèches (avec injection d'eau), dont la température dépasse largement celle d'ébullition de l'eau. Ce procédé permet de produire une vapeur dite « sèche » qui alimente directement des turbines pour générer de l'électricité. Ce type d'installation ne peut être réalisé que dans des zones présentant un gradient thermique très élevé, typiquement dans des régions volcaniques comme l'Islande ou les Caraïbes. À l'instar de la géothermie haute température, il faut réinjecter l'eau condensée et refroidie dans le réservoir pour maintenir son fonctionnement. Ce refroidissement de l'encastrement pourrait avoir tendance à épuiser la ressource, mais dans les zones bénéficiant d'un flux thermique intense, la durée de vie de ces installations peut être extrêmement longue. Cela en fait une énergie souvent qualifiée de « renouvelable » dans les cas où le flux thermique naturel est supérieur à celui exploité. La puissance installée à l'échelle mondiale est de l'ordre de 9000 MW électriques, soit l'équivalent de neuf centrales nucléaires, dont 15 MW en France, notamment grâce à la centrale de Bouillante, située en Guadeloupe. Cette technique repose sur des **distorsions locales du géotherme** autour de chambres magmatiques, là où les roches atteignent de hautes températures.



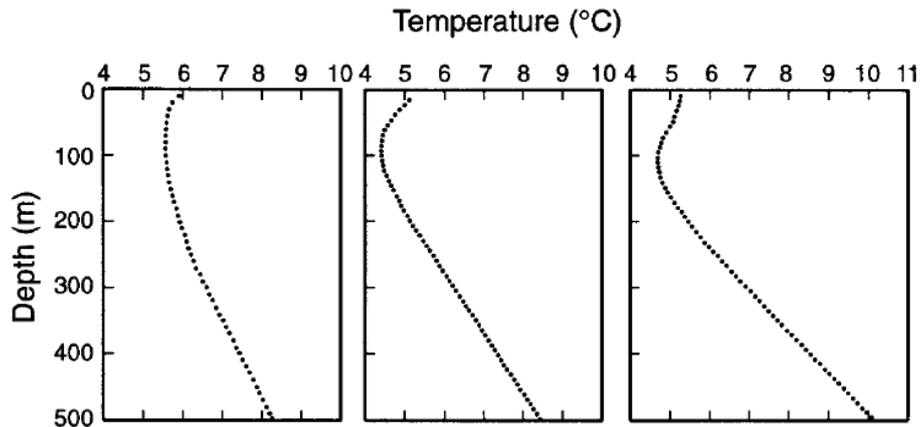
**Fonctionnement de la géothermie de haute énergie à la centrale de Bouillante. D'après BRGM.**

## Conclusion

Ce devoir invitait à présenter à la fois les difficultés à connaître l'évolution de la température à l'intérieur de la Terre, mais également les limites de la représentation symbolique d'un géotherme moyen actuel, en se projetant dans les variations spatiales et temporelles. Il est intéressant de noter qu'appréhender le géotherme et son évolution nécessite de jongler entre **géophysique** (sismologie, mesure du flux de chaleur), **pétrologie expérimentale** (changements de phase de l'olivine ou liquidus du fer à Haute Pression), **géochimie** (signification du MgO dans les komatiites, radioactivité) et **pétrologie** (adakites), tandis que l'exploitation de la chaleur interne du globe a fait appel à la **géologie appliquée** (géothermieS).

Une ouverture possible est d'ordre pétrologique : en effet les **conséquences** de l'augmentation de la température avec la profondeur sont importante à la fois (i) sur les **roches sédimentaires** (enfouissement = augmentation de pression et de température permettant diagénèse ; discussion également possible sur la maturation des hydrocarbures) ; (ii) sur les **roches magmatiques** (l'augmentation de température avec la profondeur est nécessaire à une quelconque fusion) ; et (iii) sur les **roches métamorphiques** ( $dT/dz$  conditionne les faciès et les paragenèses associées).

Une autre ouverture possible est sur des aspects de **géodynamique externe** : on peut imaginer discuter la **prolongation de  $T=f(z)$  dans l'atmosphère** (et discuter découpage des enveloppes externe en tropo/strato/méso/thermo/exo-sphère). On peut aussi imaginer comparer le **bilan énergétique externe versus interne** (la surface de la planète Terre reçoit en permanence 174 000 TW du Soleil à comparer au 42 TW de chaleur interne), ceci en lien avec les besoins de l'humanité (la puissance totale produite et consommée par l'humanité est d'environ 15 TW). Enfin, une autre ouverture pourrait être de discuter l'évolution temporelle de la température de surface ( $T_0$ ), qui marque l'origine du géotherme. Cette température est imposée par celle moyenne de l'atmosphère et peut témoigner de l'**évolution climatique** : un réchauffement infléchi ce géotherme (figure ci-dessous).



**Mesures de la température en fonction de la profondeur dans trois puits de forage du nord du Canada. La courbure dans la partie supérieure des profils est une réponse, au moins en parties, aux changements de températures de surface. L'augmentation quasi linéaire de la température dans la portion inférieure indique par prolongation où la température d'équilibre en surface serait attendue. D'après Pollack et Huang, 2000.**

Une autre ouverture pouvait également être faite sur les liens multiples entre géotherme et tectonique des plaques.

## Références

### Articles scientifiques et ouvrages en anglais :

- Arndt, N., Leshner, M. C., & Barnes, S. J. (2008). Komatiite (p. 487). Cambridge university press.
- Davies, J. H. (2013). Global map of solid Earth surface heat flow. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 14(10), 4608-4622.
- Elkins-Tanton, L. T. (2012). Magma oceans in the inner solar system. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40(1), 113-139.
- Pollack, H. N., & Huang, S. (2000). Climate reconstruction from subsurface temperatures. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28(1), 339-365.
- Fowler, C.M.R., *The Solid Earth*, chap. 7
- Turcotte, D.L. & Schubert, G., *Geodynamics*, chap. 4
- Jaupart, C. & Mareschal, J.C., *Heat generation and transport in the earth*

### Manuels disponibles au concours :

- Nicollet, *Métamorphisme et géodynamique*, Dunod
- Lagabrielle et al., *Mémo Visuel de géologie*
- Laurent Emmanuel et al., *Maxifiches Géologie*
- Peycru et al., *BCPST Tout en 1 - Dunod*

## Sites internet :

- Planet-terre : <https://planet-terre.ens-lyon.fr/>
- BRGM : <https://www.brgm.fr/fr>
- [www.guide-geothermie.org](http://www.guide-geothermie.org)
- <http://www.geologie.ens.fr/~vigny/cours/chp-gphy-1.html>

### 4.3.3 Grille de notation

Introduction (4 % du total des points)	# analyse du sujet qui débouche sur des fils directeurs ancrés dans un sens biologique ou géologique - lien cohérent entre problématique et sujet - et entre problématique et plan # contexte # analyse des termes du sujet annonce du plan = axe directeur en lien avec la problématique	Vaut 90 % des 4 % 0 - 10 % - 40 % - 100 % en fonction du nombre d'items
Contenu notionnel (80% du total des points)		rien 0 %, énoncé 10 %, Mot clé 25 %, bien traité 65 %, complètement traité 100 % Pour chaque item, des niveaux de curseur peuvent être supprimés.
Titre partie	Titre sous partie	Item et description des niveaux
<b>Mise en évidence du géotherme et origine du géotherme</b>		
Géotherme et flux de chaleur en surface		Arguments de terrain (forage/mines/source thermique) et géotherme en surface Loi de Fourier (sans déplacement de matière)
Origine de la chaleur interne du globe		radioactivité / cristallisation graine / chaleur résiduelle / marée terrestre quantification des sources + ordre de grandeur (actuel 42TW)
Structure interne et modes de transmission de la chaleur		Rayonnement (ε) / Conduction / convection Nombre de Rayleigh Ra = (alpha delta T d3 g) / (nu kappa)
Points des notions		
<b>Méthodes de Construction du géotherme actuel</b>		
Les points d'ancrage		construction pt d'ancrage essentiel 1) croûte/manteau (Lithos/Asthen Boundary, couplage méthodes)
		construction pt d'ancrage essentiel 2) manteau sup/inf (410 km y compris, couplage méthodes)
		construction pt d'ancrage essentiel 3) noyau int/ext (5100 km), couplage méthodes
		détail méthodo Enclumes diamants (phases de l'olivine) ou fusion de fer (HP dans noyau)
		détail méthodo, PREM
Les gradients		hypothèse gradient adiabatique convectif manteau/noyau (+ cas de la D")
Le géotherme moyen (SCHEMA)		Structure interne / axes gradué / pentes adaptées (diffusif/convectif) / points d'ancrage
Points des notions		
<b>Variations spatiales et temporelles du géotherme</b>		
Variations spatiales en surface (cf. flux de chaleur)		Carte/schéma des hétérogénéités spatiales du flux de chaleur (LO dorsale Rapide/Lente) ou LO vs LC Explication f(H LO) dT/dz (loi de Fourier) ou sur CC (H CC, craton jeune/Vieux radioactivité) dFlux théor/q/mesuré, refroidissement dorsale par advection (hydrothermalisme) Obs pétro (construire le lien entre paragenèse métamorphique et un géotherme)
Variations spatiales en profondeur		un modèle thermique (ex subduction) : modèle geodynamique et anomalie du géotherme
		diversité des géothermes en fonction des contextes geodynamiques (subduction, extension, collision)
		Diagenèse basse température (maturation MO, fenêtre huile/gaz = (t <sub>ps</sub> /profondeur)) un exemple de magmatisme (obs)
		diversité des magmatismes en fonction du géotherme Principe tomographie sismique (anomalie vit -> anomalie T) Un exemple contextualisé (subduction ou point chaud)
Variations temporelles (Terre ancienne)		Océan magmatique Komatiites (VS OIB) illustrent le refroidissement séculaire (100°C/1Ga) TTG témoins de fusion de C.O. hydraté (pétro expérimentale) en contexte chaud (calco-alkalin)
Conséquences (temporelles ou spatiales) pour la tectonique des plaques		en fonction du géotherme, variation de la rhéologie (Byrlee) et mode de déformation (t <sub>ps</sub> ) un exemple possible (tectonique des plaquettes, faible relief, sagduction, ...)
Points des notions		
<b>Les ressources liées au géotherme</b>		
Géothermie de très basse énergie		Principe et fonctionnement diversité des géothermies (basse ou haute énergie)
hydrothermalisme et ressources		exemple continental / océanique (mise en mouvements de fluides et solubilité élevée elts)
Points des notions		
Total points des notions		

# 5. Les épreuves pratiques

Les sujets présents dans ce rapport peuvent présenter une mise en page un peu différente de celle utilisée lors des épreuves car ils contiennent des éléments de réponse aux questions.

## 5.1 Épreuve de travaux pratiques de spécialité du secteur A : Sujet et commentaires

Le sujet d'option proposé pour le secteur A de la session 2025 comportait deux parties indépendantes, portant sur l'étude des fonctions embryonnaires des enzymes du métabolisme des purines et sur la caractérisation de la SDH mitochondriale.

Ce sujet faisait appel à la mise en œuvre de compétences théoriques et pratiques en embryologie, en biologie cellulaire, en biologie moléculaire et en biochimie. Les capacités d'analyse et de réflexion des candidats ont également été évaluées grâce à l'analyse de données expérimentales issues d'articles de recherche. Certaines parties du sujet nécessitant une bonne maîtrise de Libmol, de tableurs et de Mesurim ont permis d'évaluer les aptitudes des candidats à utiliser les outils informatiques, indispensables pour le métier d'enseignant de SV-STU.

Dans la première partie, les questions de biologie moléculaire ont été généralement bien réussies par la majorité des candidats, à l'exception de la mesure d'absorbance permettant de déterminer la concentration et la pureté de la solution d'ADN. Le jury déplore que certaines notions d'embryologie et de biologie animale, comme les notions relatives au plan d'organisation d'un vertébré et à la capacité des candidats à observer et décrire précisément des embryons ne soient pas davantage maîtrisées. L'utilisation de la cellule de comptage de Malassez, dont le principe était rappelé, et les conversions d'unité ont étonnement posé problème à la plupart des candidats.

La deuxième partie du sujet s'est révélée être particulièrement discriminante pour les candidats ayant réussi à effectuer les manipulations et à les analyser, contrairement à ceux qui n'ont traité que de façon superficielle les documents. Le jury tient à rappeler que les manipulations sont valorisées lors de l'épreuve de travaux pratiques.

Le jury déplore que les concepts d'énergétique et de biochimie de base ne soient pas maîtrisés par la plupart des candidats d'option A tout comme les calculs de dilution et de concentration qui sont trop souvent erronés et sans esprit critique lors de l'analyse de résultats incohérents. Par exemple, certains candidats ne trouvent pas anormal d'obtenir des valeurs d'absorbance supérieures à 2.

De façon globale, la majorité des candidats a montré de bonnes qualités manipulatoires et l'utilisation du matériel de laboratoire de base est plutôt bien maîtrisée (micropipettes, frottis, colorimètre, ...). Le jury tient cependant à souligner quelques points importants :

- L'observation microscopique d'éléments de l'ordre du micromètre nécessite un objectif recourant à de l'huile à immersion et un réglage précis du contraste et de la luminosité. Trop de candidats ignorent l'existence d'un diaphragme. Une observation réalisée avec un objectif X40 n'était pas pertinente pour distinguer des mitochondries.
- Une bonne manipulation implique une bonne organisation de la paillasse. De nombreux candidats laissent des cônes sales et du matériel usagé sur la paillasse. Rappelons que l'organisation de l'espace

de travail et le respect des règles élémentaires de bonnes pratiques sont également évalués en salle par les examinateurs.

- Les enzymes et les fractions cellulaires doivent être conservées sur glace. Une absence de conservation sur glace impacte le résultat des expériences mais aussi la notation en salle : la capacité à intégrer toutes les précisions indiquées dans les protocoles fait partie de l'évaluation. Par exemple, certains candidats n'ont pu observer dans le frottis de la question QII.A.4 qu'un bouillon de culture bactérien après l'avoir conservé à température ambiante plusieurs heures.
- Les règles d'hygiène et sécurité associées aux expérimentations sont parfois négligées par les candidats. Trop de candidats conservent leurs gants après manipulation et se touchent le visage, tapent à l'ordinateur ou boivent à leur gourde avec leurs gants.

# AGRÉGATION DE SCIENCES DE LA VIE - SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – Session 2025

## TRAVAUX PRATIQUES DE SPECIALITÉ DU SECTEUR A Durée totale : 6 heures

### CARACTÉRISATION DE VOIES MÉTABOLIQUES

Le sujet est composé de 2 parties indépendantes :

- **Partie I : Étude des fonctions embryonnaires des enzymes du métabolisme des purines**  
*Durée conseillée : 3h - barème indicatif : 50 points sur 100*
- **Partie II : Caractérisation de la SDH mitochondriale**  
*Durée conseillée : 3h - barème indicatif : 50 points sur 100*

L'utilisation d'une calculatrice non programmable est autorisée. Celle-ci est fournie au candidat.

Les réponses aux questions figureront uniquement dans les cadres réservés à cet effet.

N'oubliez pas d'appeler les examinateurs lorsque cela est demandé.

N'oubliez pas de sauvegarder vos fichiers informatiques sur la clef USB à votre disposition.

Une lecture du sujet dans son intégralité est fortement conseillée afin de répartir au mieux son temps de travail entre les différentes parties et les manipulations qui nécessitent parfois des temps d'attente.

## **PRÉAMBULE :**

### **Indications sur l'organisation de l'épreuve et rappels utiles aux manipulations :**

- L'épreuve comprend plusieurs temps d'attente incompressibles qui sont rappelés ci-après :
  - La partie I.B comporte une restriction enzymatique (1h) suivie d'une électrophorèse (1h) ;
  - La partie I.C comporte une coloration  $\beta$ -galactosidase (1h à 2h) ;
  - La partie II comporte une étude enzymatique nécessitant 10 min d'incubation.
- Pour l'électrophorèse, un seul gel vous sera fourni. Les dépôts devront se faire au minimum 1h avant la fin de l'épreuve sous la supervision du jury qui photographiera le gel après migration.
- Partie I.C : Les embryons vont seront donnés 2h après le début de l'épreuve ; la coloration devra alors être effectuée immédiatement.
- Tout le matériel nécessaire aux manipulations est disposé sur la paillasse de chaque candidat. Il ne sera pas délivré de matériel ou d'échantillon supplémentaire.
- Toutes les solutions de biologie moléculaire utilisant des enzymes doivent être conservées dans la glace.
- La propreté de la paillasse et le respect des règles d'hygiène et de sécurité seront contrôlées et évaluées tout au long de l'épreuve.  
Certaines manipulations nécessitent de porter des gants ; c'est au candidat de décider quand en porter. Le port des gants sera contrôlé par les membres du jury.
- Au cours de l'épreuve, certains résultats nécessitent d'être contrôlés par les membres du jury en salle. L'énoncé mentionnant cette obligation, vous appellerez un membre du jury qui examinera votre résultat.

## Partie I : Étude des fonctions embryonnaires des enzymes du métabolisme des purines

Dans cette partie, on s'intéresse aux fonctions embryonnaires des enzymes impliquées dans le métabolisme des purines. Pour ce faire, des expériences fonctionnelles sont réalisées afin de moduler l'expression des gènes codant pour ces enzymes par micro-injection dans l'embryon de xénope. L'ARNm *LacZ* est également injecté afin de confirmer la qualité des injections et identifier le côté de l'embryon qui a subi l'injection.

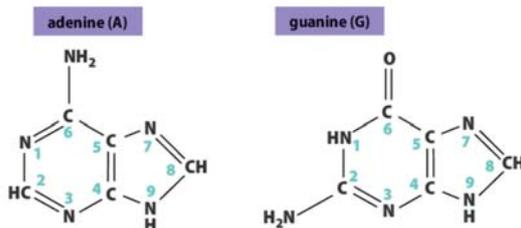
### Partie A : Caractérisation des enzymes du métabolisme des purines

On cherche à démontrer la conservation des enzymes impliquées dans la voie de synthèse *de novo* ou de recyclage des purines au cours de l'évolution. Une représentation schématique de ces voies est donnée dans l'[Annexe 1](#).

QI.A.1 : Définir une purine.

#### Réponse à la question QI.A.1

Une purine est une molécule azotée hétérocyclique constituée d'un cycle pyrimidine fusionné à un cycle imidazole.



QI.A.2 : Citer deux rôles cellulaires des purines, autres que l'énergétique cellulaire, en précisant la purine impliquée dans ces fonctions.

#### Réponse à la question QI.A.2

##### Plusieurs réponses étaient possibles

- Synthèse dans acides nucléiques des ADN et ARN : adénine et guanine
- Signalisation cellulaire : AMPc ou GMPc en tant que second messenger ; Le GTP essentiel pour la signalisation par les protéines G, en étant converti en GDP
- Neuromodulateur : ATP /Adénosine
- acide urique : produit final du métabolisme des purines et est majoritairement éliminé par les reins et excrété dans les urines.

La protéine ADSL (pour adénylosuccinate lyase ou adénylosuccinase) est une enzyme impliquée dans la voie de biosynthèse des purines, à la fois dans la voie de synthèse *de novo* et celle de recyclage des purines.

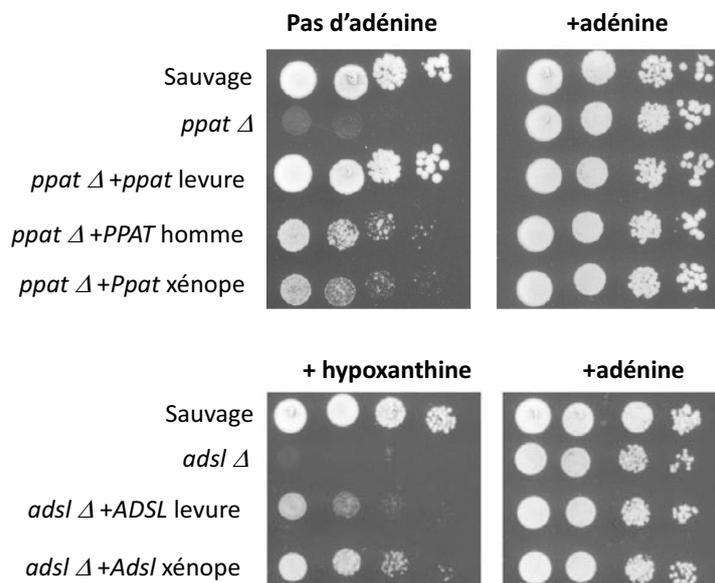
**QI.A.3** : Une lyase est une enzyme qui catalyse une réaction de décomposition dans laquelle une liaison C-C, C-O, C-N est rompue sans hydrolyse ni oxydation. Parmi les réactions enzymatiques suivantes du métabolisme des purines, identifier celle qui est réalisée par une lyase et indiquer le numéro de cette réaction dans le cadre ci-dessous. Vous pouvez vous aider de l'Annexe 2 pour répondre à cette question.

1. Xanthine + H<sub>2</sub>O + O<sub>2</sub> → acide urique + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>
2. Adénosine + H<sub>2</sub>O → Inosine + NH<sub>3</sub>
3. ATP → AMP<sub>c</sub> + PPi
4. GMP + 2H<sup>+</sup> + NADPH → IMP + NADP + NH<sub>4</sub><sup>+</sup>
5. Adénosine + ATP → AMP + ADP

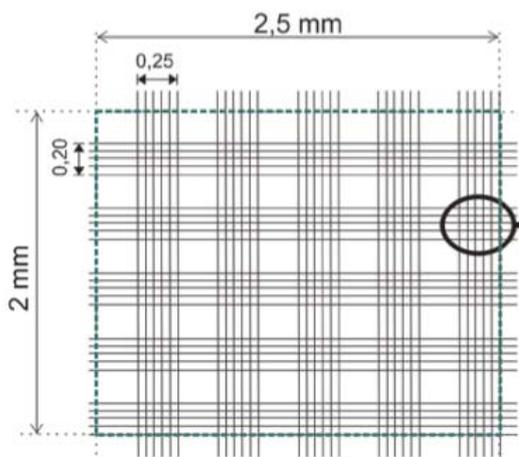
Réponse à la question QI.A.2

La réaction catalysée par la lyase est la réaction 3

Des levures mutantes pour les différentes enzymes de ce métabolisme purique sont disponibles dans les laboratoires. Il est possible de transformer ces souches mutantes afin de sur-exprimer des gènes d'intérêt. Les capacités des différentes souches à se développer sur différents milieux peuvent être testées par le test appelé « test de goutte ». Des dilutions en série des solutions-mères des différentes souches de levures (même concentration cellulaire pour toutes les souches) sont réalisées et 1 goutte de 5 µL de chaque dilution est déposée sur des boîtes de milieu de culture supplémenté, ou non, en adénine ou hypoxanthine comme seule source de purine. Après plusieurs jours de culture, les boîtes sont prises en photographie et analysées. La figure ci-dessous représente les photographies obtenues avec des levures mutantes pour le gène *ppat* (*ppat Δ*) ou *adsl* (*adsl Δ*) transformées pour sur-exprimer les gènes *ppat* ou *adsl* de levure, de l'homme ou de l'amphibien xénope.



Afin de réaliser ce test de goutte, la concentration cellulaire de la solution-mère des souches de levures est déterminée avec l'hématimètre de Malassez. Les levures de chaque souche ont été comptées dans 5 rectangles de comptage.



L'hématimètre contient 100 rectangles de comptage au total, dont 25 quadrillés qui sont subdivisés en 20 petits carrés.

1 des 25 rectangles de comptage est entouré.

Profondeur hématimètre : 0,2 mm

Les résultats de comptage des 5 rectangles de la souche mutante *ppat*  $\Delta$  sont les suivants : 24, 17, 22, 15, et 20 cellules.

**QI.A.4** : Sachant que la solution-mère a été diluée 1000 fois, calculer la concentration cellulaire en cellules/mL. Expliquer votre calcul.

Réponse à la question QI.A.4

La formule à appliquer est la suivante  $N = (n / (a \cdot v)) \times Fd$

Avec  $n$  = nombre de levures comptées

$a$  : nombre de rectangles comptés

$v$  = volume d'un rectangle

$Fd$  : facteur de dilution

Volume rectangle :  $v = 0,2 \times 0,25 \times 0,2 = 0,01 \text{ mm}^3 = 0,01 \mu\text{L}$

Nombre de levures comptées  $n = 24 + 17 + 22 + 15 + 20 = 98$  levures

$N = (98 / (5 \times 0,01 \cdot 10^{-3})) \times 1000 = 1,96 \cdot 10^9$  cellules/mL

Trop de candidats ont fait des erreurs de conversion

**Q1.A.5** : D'après cette expérience, comment peut-on qualifier la souche *ppat*  $\Delta$ ? Quel est l'intérêt d'avoir sur-exprimé les gènes *ppat* de levure, *PPAT* de l'Homme et *Ppat* du xénope dans cette souche mutante ? Justifier votre réponse en vous servant de l'Annexe 1.

Réponse à la question Q1.A.5

-Toutes les levures se développent sur le milieu avec de l'adénine : ces levures peuvent synthétiser l'AMP à partir du PRPP.

-Par contre la souche mutante *ppat*  $\Delta$  (*qui ne possède plus le gène ppat*) ne se développe pas sur le milieu ne contenant pas d'adénine. Cette souche est dite **auxotrophe** pour l'adénine.

- La surexpression du gène *PPAT* de levure, Homme et xénope permet à la souche de levure de se développer sur le milieu qui ne contient pas d'adénine. Cette surexpression permet donc **de restaurer le phénotype** de la souche non mutée, sauvage.

**Q1.A.6** : Analyser les résultats présentés pour la souche mutante *ads1*  $\Delta$ . Justifier votre réponse en utilisant l'Annexe 1. Conclure quant à la conservation de ce gène chez les organismes étudiés.

#### Réponse à la question Q1.A.6

Toutes les levures se développent sur le milieu avec de l'adénine. Ces levures peuvent synthétiser l'AMP à partir du PRPP ; cette enzyme est impliquée dans les voies de synthèse et recyclage des purines.

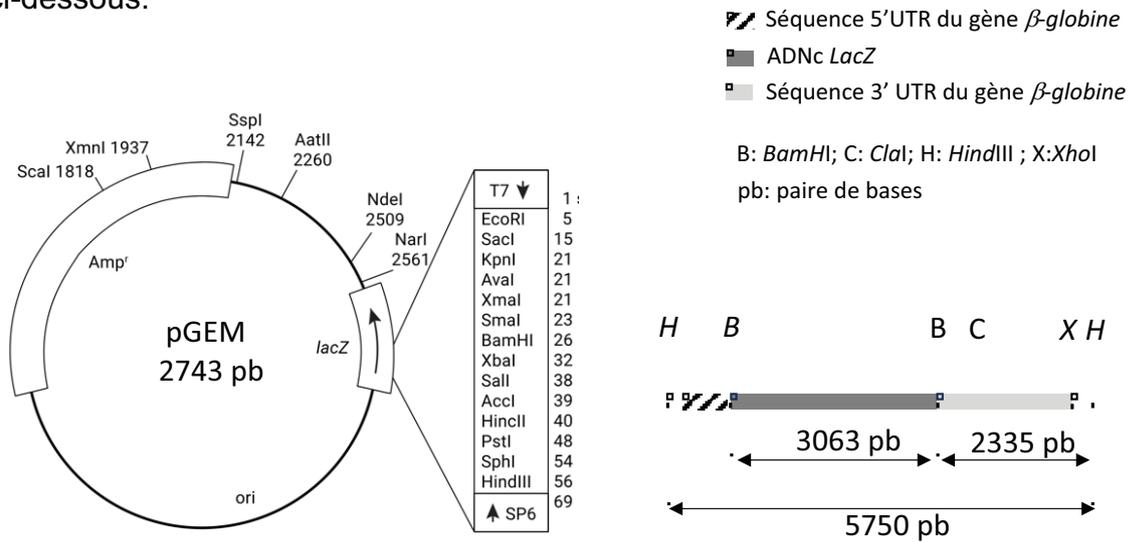
- La souche mutante *ads1*  $\Delta$  ne peut se développer sur le milieu+hypoxanthine. Par contre les souches transformées avec les gènes ADSL de levure ou de Xénope peuvent se développer sur ce milieu+hypoxanthine, même si cette capacité de pousser est moindre que celle de la souche sauvage.

- Ceci montre que la fonction de ces enzymes a été conservée au cours de l'évolution et que les enzymes ADSL de levure, de l'homme et du Xénope ont la même activité enzymatique.

- Il est à noter que la surexpression du gène de levure dans la souche mutée aurait dû sauver le phénotype mais ce sauvetage n'est que partiel.

## Partie B : Obtention et vérification du vecteur pGEM-LacZ en vue des études fonctionnelles

En vue des expériences fonctionnelles, un fragment d'ADN contenant l'ADNc *LacZ* (nommé insert dans la suite du sujet), codant la  $\beta$ -galactosidase, a été cloné dans un vecteur d'expression eucaryote, appelé pGEM-LacZ dans la suite du sujet, afin de produire l'ARNm *LacZ* *in vitro*. La stratégie expérimentale de ce clonage est indiquée ci-dessous.



1: Restriction enzymatique par *Hind*III

2: Traitement avec une phosphatase

3: Ligation (ADN ligase)

4: Etalement sur milieu sélectif

5: Repiquage de 10 colonies

6. Extraction d'ADN plasmidique  
Sélection par restriction enzymatique

Le site de restriction de l'enzyme *Hind*III est le suivant .



**QI.B.1** : Quelle est la particularité de ce site de restriction ? Écrire la séquence des extrémités obtenues après coupure avec cette enzyme. Comment appelle-t-on ce type d'extrémités ?

Réponse à la question I.B.1

C'est une séquence palindromique composée de 6 bases.

Ce sont des extrémités cohésives

5'A	AGCTT 3'
3'TTCGA	A 5'

**QI.B.2** : Concernant l'étape 3 de ce clonage : Expliquer cette réaction enzymatique en précisant ce que doit contenir le milieu réactionnel.

Réponse à la question I.B.2

La ligase permet de réunir les extrémités complémentaires de 2 fragments d'ADN afin de former un plasmide intact circulaire. En utilisant l'**ATP** comme source d'énergie, la ligase catalyse une réaction dans laquelle le groupe phosphate qui se détache de l'extrémité 5' d'un brin d'ADN est lié au groupe hydroxyle qui se détache de l'extrémité 3' de l'autre brin. Cette réaction génère un squelette sucre-phosphate intact.

Le milieu réactionnel doit contenir le vecteur, l'insert, l'enzyme, le tampon de l'enzyme et de l'ATP.

Trop de candidats ont oublié l'ATP dans le mix réactionnel.

**QI.B.3** : Indiquer sur quel milieu sélectif les bactéries transformées avec les produits de ligation ont été étalées. Justifier votre réponse.

Réponse à la question I.B.3

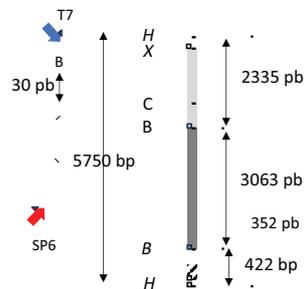
Le vecteur de clonage possède le gène de résistance à l'ampicilline (AmpR). Les bactéries seront étalées sur un milieu LB+Ampicilline.

**Q1.B.4.** Représenter les deux plasmides pouvant être générés à la suite de ce clonage moléculaire après coupure du vecteur et de l'insert contenant l'ADNc *LacZ* par *Hind*III et insertion de cet insert. Positionner les sites des enzymes *Hind*III, *Bam*HI et *Xho*I sur les 2 plasmides. Indiquer le nombre de fragments d'ADN plasmidiques obtenus après restriction enzymatique avec chacune de ces 3 enzymes et calculer leur taille attendue.

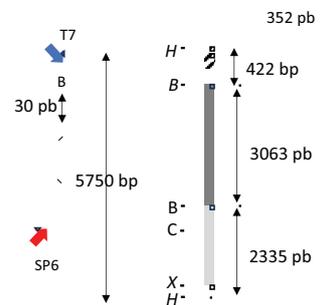
Réponse à la question I.B.4

Les plasmides générées possèdent 1 site *Xho*I, 2 sites *Hind*III et 3 sites *Bam*HI. Les restrictions par *Xho*I et *Hind*III conduisent dans les 2 cas à l'obtention des mêmes fragments d'ADN.

Plasmide 1



Plasmide 2



Taille fragments de restriction: *Xho*I : 8493 pb ; *Hind*III : 2743pb + 5750 pb

*Bam*HI : 3063pb+ 3065pb+ 236pb

*Bam*HI : 3063pb+382pb+5048pb

**Q.I.B.5** : Sachant que l'ARNm *LacZ* est produit par transcription *in vitro* en utilisant l'ARN polymérase SP6, préciser quel plasmide doit être sélectionné à la suite de ce clonage. Justifier votre réponse.

Réponse à la question I.B.5

Il faut produire le brin sens qui est le brin correspondant à l'ARNm afin de produire la protéine  $\beta$ -Gal.

Le plasmide à sélectionner est le plasmide 1.

Pour cette réaction, il est nécessaire de ne garder que les séquences nucléotidiques nécessaires à cette transcription *in vitro* et éliminer toute séquence plasmidique non essentielle. Ceci est effectué par restriction enzymatique du plasmide.

**Q.I.B.6** : En vous reportant à la figure de stratégie de clonage, expliquer pourquoi l'enzyme *XhoI* et non l'enzyme *ClaI* est choisie pour cette restriction enzymatique.

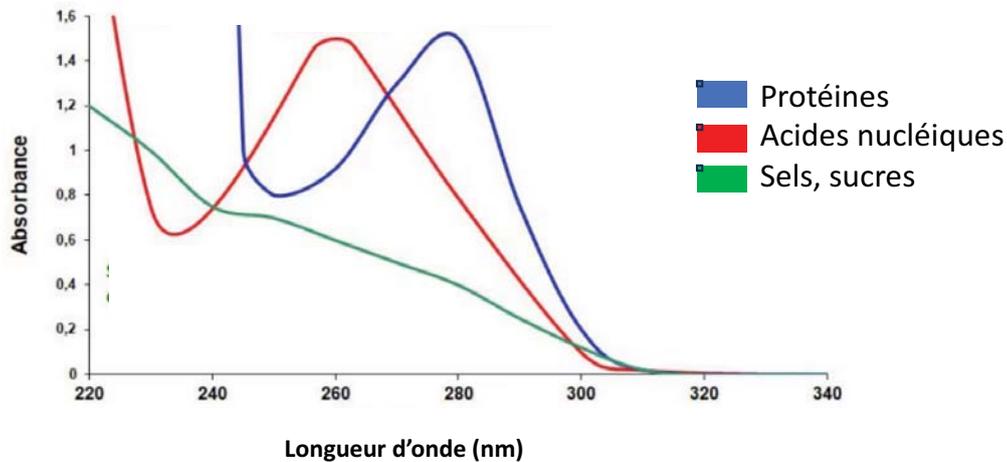
Réponse à la question QI.B.6

Il est nécessaire d'avoir l'intégralité des séquences 3' UTR de la  $\beta$ -globine. En effet ces séquences sont nécessaires à la traduction et la stabilité des ARNm. En particulier cette séquence 3'UTR va contenir la séquence de polyadénylation AAUAAA nécessaire à la synthèse de la queue polyA.

Le plasmide pGEM-LacZ sélectionné a été transformé dans des bactéries *E.coli* chimiocompétentes. Après une culture liquide de 100mL, l'ADN plasmidique a été extrait.

Vous disposez d'un aliquote de cette solution plasmidique pGEM-LacZ.

Vous voulez déterminer la concentration en ADN et vérifier la pureté de l'extraction du plasmide. Vous avez à votre disposition un spectrophotomètre. La figure ci-dessous indique les spectres d'absorbance de différentes molécules.



**Q.I.B.7 :** Indiquer à quelle(s) longueur(s) d'onde vous devez faire ces mesures. Justifier votre réponse.

#### Réponse à la question I.B.7

Mesure du blanc à 260 nm en utilisant de l'eau sans ADN.

Mesure de l'absorbance de l'échantillon d'ADN à 260 nm (A260).

Mesure de l'absorbance de l'échantillon d'ADN 280 nm (A280) pour mesurer les protéines

Mesure de l'absorbance de l'échantillon d'ADN 230 nm (A230) pour mesurer les contaminants

#### **Effectuer les mesures**

- **Prélever 1 µL d'ADN auquel vous ajoutez 99 µL d'eau.**
- **Placer cette solution dans la cuve de spectrophotométrie et procéder aux mesures d'absorbance.**

A la longueur d'onde optimale, la concentration des acides nucléiques peut être déterminée avec les valeurs suivantes.

- 1 unité Absorbance = ~50 µg/mL d'ADN double brin  
= ~33 µg/mL d'ADN simple brin  
= ~40 µg/mL d'ARN simple brin

**Q.I.B.8** : Quel est le degré de pureté et la concentration de l'ADN plasmidique ? Interpréter et conclure sur ces résultats.

Réponse à la question I.B.8

Pureté :

Contamination protéique : Elle est déterminée par le rapport A260/A280, la valeur idéale de pureté est environ 1,8-2,0

Contamination par des composés organiques et salins chaotropiques : elle est déterminée par le ration A260/A230, valeur idéale >1,5.

Concentration : Elle est déterminée par le calcul suivant :

$$A_{260} \times 100 \times 50 \text{ } \mu\text{g/mL} \times \text{facteur de dilution (ici 100)}$$

La solution avait été préparée par le jury à 1  $\mu\text{g/mL}$ .

Trop de candidats ont fait des erreurs de manipulation et/ou de calcul.

La conformité de ce plasmide pGEM-LacZ est vérifiée par une carte de restriction enzymatique avec les enzymes *Bam*HI, *Hind*III et *Xho*I.

Pour effectuer les 3 réactions enzymatiques vous disposez des réactifs suivants :

	Concentration dans la solution stock	Concentration finale dans le tube (1 enzyme par tube)
Tampon de réaction	10X	1X
ADN plasmidique	A déterminer	1 $\mu\text{g}$
Enzyme de restriction <i>Bam</i> HI, <i>Hind</i> III ou <i>Xho</i> I (sur demande)	10 U/ $\mu\text{L}$	10U
H <sub>2</sub> O		Compléter pour 20 $\mu\text{L}$

**Q.I.B.9** : Indiquer les volumes de chacun des réactifs pour réaliser chacune de ces 3 restrictions enzymatiques.

### Réponse à la question I.B.9

ADN : 1  $\mu$ L  
Tampon : 2  $\mu$ L  
Enzyme : 1  $\mu$ L  
H<sub>2</sub>O : 16  $\mu$ L

**Q.I.B.10** : Quel tube contrôle faut-il effectuer pour cette expérience ? Justifier votre réponse.

### Réponse à la question I.B.10

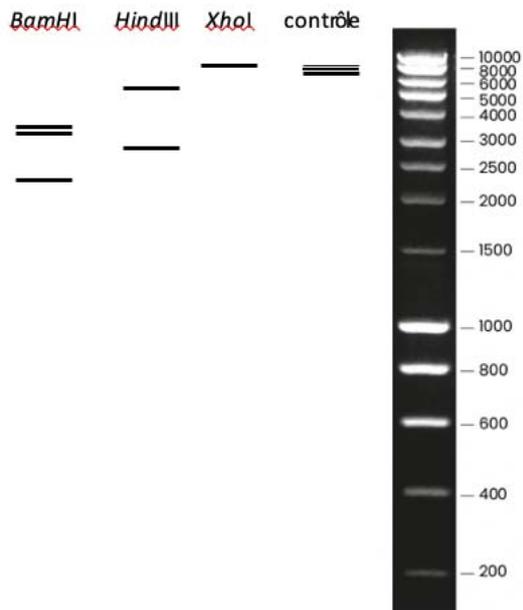
La restriction avec l'enzyme *XhoI* linéarise le plasmide.

il est nécessaire d'effectuer un tube sans enzyme de restriction. Ceci conduira à un plasmide non digéré permettant de vérifier la linéarisation par *XhoI*

- Réaliser vos mélanges réactionnels (**demander les enzymes de restriction au jury**). Le tampon de digestion de couleur verte contient le tampon de charge pour les dépôts sur gel.
- Placer les tubes à 37°C pendant 1 heure.
- Appeler un membre du jury pour déposer les échantillons (15  $\mu$ L) dans un gel d'agarose imprégné de SYBR Safe ainsi que 10 $\mu$ L du marqueur de taille.
- **Vous devez déposer les échantillons selon l'ordre suivant :  
Marqueur de taille ; Tube *BamHI* ; Tube *HindIII* ; Tube *XhoI* ; Contrôle**

**Q.I.B.11** : Coller et analyser le schéma du gel qui vous a été donné après la mise en route de votre gel.

Réponse à la question I.B.11



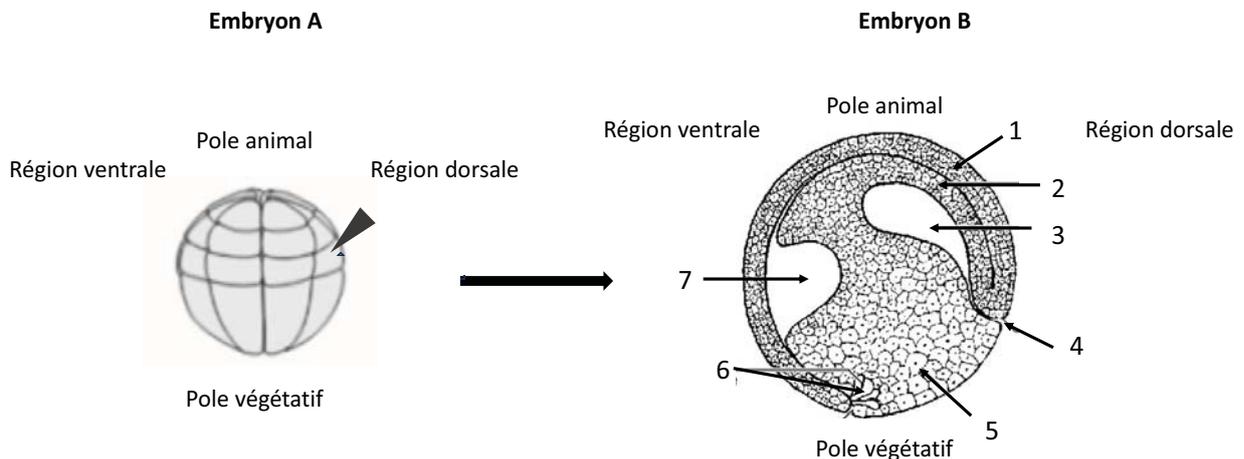
Cette restriction permet d'obtenir les fragments dont la taille correspond aux tailles calculées dans la question I.B.4. La piste contrôle montre les 3 conformations de l'ADN, circulaire, super-enroulée et linéaire.

**Partie C : Étude fonctionnelle de la protéine ADSL au cours du développement embryonnaire d'un vertébré, le xénope**

**Les observations des embryons doivent s'effectuer en utilisant la loupe binoculaire.**

L'ARNm *LacZ* est couramment utilisé comme traceur cellulaire. Il peut être micro-injecté dans les cellules d'embryon de xénope au stade 2, 4 ou 8 cellules. Sa traduction est mise en évidence par la révélation de l'activité enzymatique de la protéine, la  $\beta$ -galactosidase.

**Q.1.C.1 :** Légender les structures/feuilletts embryonnaires indiqués par les 7 flèches de l'embryon B et indiquer dans quelle phase du développement se trouvent les 2 embryons. Indiquer, sur le schéma de l'embryon B (dans le cadre ci-dessous), dans quelle région se trouveront les ARNm *LacZ* à la suite de leur micro-injection effectuée dans l'embryon A (illustrée par le triangle).



Réponse à la question Q1.C.1

1 : ectoderme

2 : mésoderme

3 : blastocœle

4 : lèvre dorsale du blastopore

5 : On se propose de tester l'ARNm *LacZ* dans la partie I.B, par coloration de l'embryon

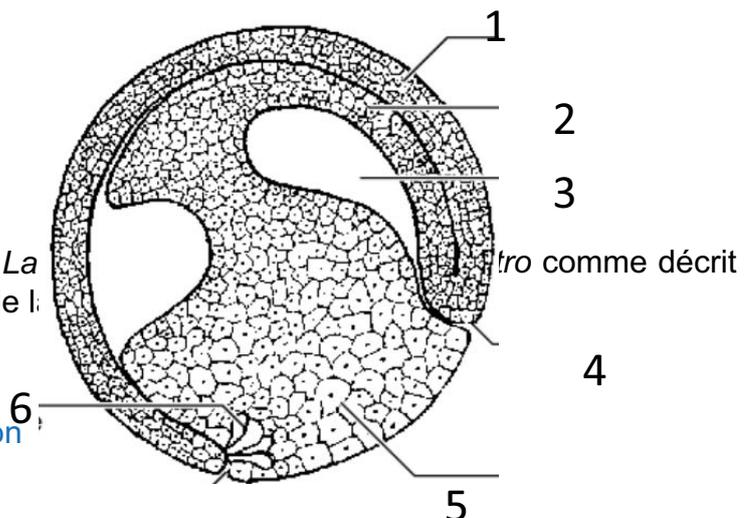
6 : cellules en bouteilles

7 : archentéron

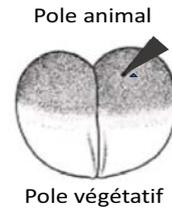
Embryon 1 : phase de segmentation

Embryon 2 : phase de gastrulation

Les ARNm *LacZ* vont se retrouver dans le mésoderme dorsal (numéroté en 2), qui est entré dans l'embryon par le mouvement d'involution.



L'ARNm *LacZ* a été injecté dans une cellule au niveau du pôle animal d'un embryon au stade 2 cellules, comme indiqué par le triangle sur le schéma.



Après quelques jours de culture ces embryons ont été placés dans une solution contenant un fixateur, le formaldéhyde, pendant 30 minutes avant d'être rincés dans une solution de PBS1X-MgCl<sub>2</sub> 2mM.

Sur l'étiquette de la bouteille de ce fixateur figurent 3 pictogrammes.



**Q.I.C.2 :** Donner la signification des 3 pictogrammes figurant sur cette étiquette. Expliquer les précautions d'utilisation de ce fixateur.

Réponse à la question I.C 2

Symbole 1 Toxique/Mortel

Symbole 2 Toxique/nuisible pour la santé

Symbole 3 Corrosif

Précautions à prendre

Maintenir le récipient fermé de manière étanche

Ne pas respirer les fumées : Travail sous sorbonne / hotte

Éviter tout contact avec yeux et peau : Porter des gants de protection, des lunettes, et une blouse fermée

**Q.I.C.3 :** La  $\beta$ -galactosidase hydrolyse le lactose en galactose et glucose. En vous aidant de l'Annexe 3, indiquer le substrat chromogène permettant de détecter l'activité de cette enzyme dans les embryons injectés.

Réponse à la question I.C 3

Le X-Gal

Pour préparer la solution de coloration vous disposez des réactifs suivants :

	Concentration dans la solution stock	Concentration finale dans le tube réactionnel
Solution $K_4Fe(CN)_3$	50mM	20mM
Solution $K_3Fe(CN)_6$	50mM	20mM
$MgCl_2$	0,1M	2mM
PBS	1X	0,155X
Substrat de la $\beta$ -galactosidase (à demander au jury)	40mg/mL	1mg/mL

**Q.I.C.4:** Indiquer les volumes de chacun des réactifs nécessaires pour réaliser 250  $\mu$ L de la solution de coloration.

Réponse à la question I.C 4

Solution $K_4Fe(CN)_3$	100 $\mu$ L
Solution $K_3Fe(CN)_6$	100 $\mu$ L
$MgCl_2$	5 $\mu$ L
PBS	38,75 $\mu$ L
Substrat de la $\beta$ -galactosidase	6,25 $\mu$ L

**Effectuer la coloration :**

***Il n'est pas nécessaire d'avoir répondu aux questions de la partie B pour réaliser cette coloration.***

***Le substrat de l'enzyme doit être ajouté en dernier.***

***La solution de coloration, à laquelle le substrat a été ajouté, doit être préchauffée à 37°C pendant 15 minutes avant son utilisation.***

- A l'aide de la pipette en plastique, enlever la solution PBS1X-MgCl<sub>2</sub> du tube contenant les embryons (attention à ne pas éliminer les embryons).
- Ajouter 1mL de solution PBS1X-MgCl<sub>2</sub> et placer le tube sous agitation pendant 5 minutes.
- Renouveler 2 fois le lavage.
- Enlever la solution PBS1X-MgCl<sub>2</sub>.
- Recouvrir les embryons de la solution de coloration.
- Placer le tube à l'obscurité en l'entourant d'aluminium à 37°C pendant 1 heure.
- Vérifier que la coloration bleue est suffisante pour une bonne qualité d'observation. Remettre le tube à 37°C si la coloration ne l'est pas. Il ne faut pas laisser le tube à 37°C au-delà de 2 heures.
- A l'aide de la pipette en plastique, enlever la solution de coloration et la placer dans un tube Eppendorf.
- Ajouter 1 mL de PBS1X et placer le tube sous agitation pendant 5 minutes.
- Effectuer 2 fois ce lavage avec du PBS1X.
- Placer les embryons dans une boîte de pétri contenant du PBS 1X dont le fonds est recouvert d'agarose 1%.
- Observer les embryons colorés.

**Q.1.C.5** : A l'aide du document fourni en Annexe 4, identifier le stade embryonnaire des embryons. Justifier votre réponse.

Réponse à la question Q1.C.5

Pour identifier le stade, il est nécessaire d'observer

la morphologie de l'embryon et celle de la nageoire caudale

la pigmentation de l'œil en formation et de l'embryon (présence de mélanocytes)

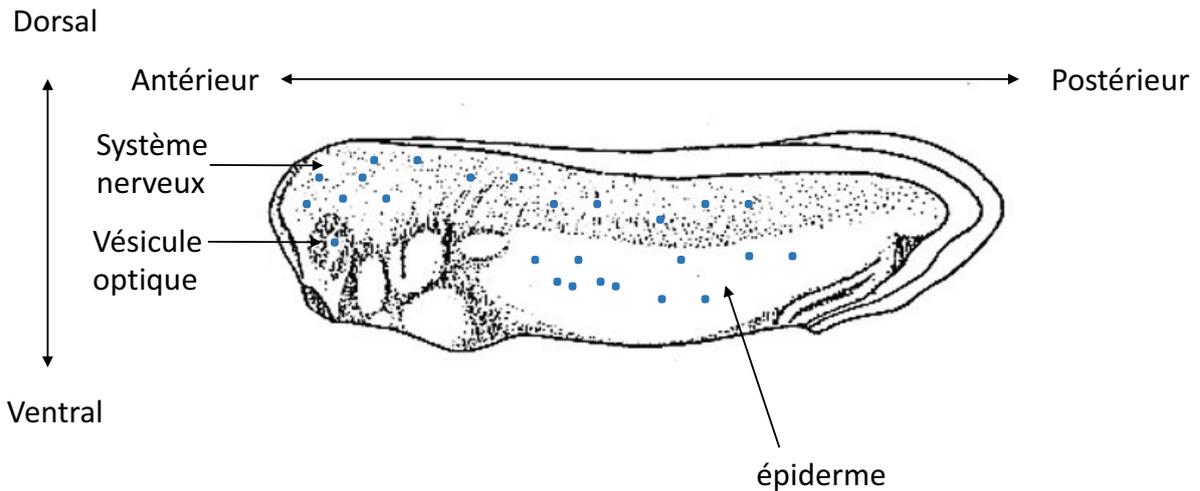
la morphologie de l'endoderme au niveau caudal de l'embryon

**Appeler un examinateur afin qu'il évalue votre datation. Présenter au jury un embryon, placé sous la loupe binoculaire, le plus représentatif du stade déterminé**

**Q.1.C.6** : Décrire vos observations en précisant dans quelle région /quel tissu/ quel organe se trouve la coloration en réalisant une représentation schématique légendée indiquant les axes des embryons. Conclure sur ces résultats en discutant le devenir cellulaire du pôle animal de l'embryon au stade 2 cellules.

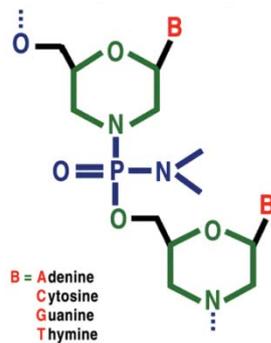
Réponse à la question Q1.C.6

Les embryons ont été injectés au pôle animal, qui va être à l'origine de l'ectoderme. La coloration se trouve au niveau de l'épiderme ainsi qu'au niveau du système nerveux. La localisation au sein de ces tissus était embryon-dépendante.



Trop de candidats n'ont pas suivi les consignes données (schéma sans axes, légendes) et n'ont pas donné le devenir de la région de l'embryon injectée.

Le knock-down d'un gène (= expression génique diminuée) s'effectue par une technologie anti-sens en micro-injectant dans l'embryon de xénope des molécules appelées morpholino-oligonucléotides (MO dans la suite du sujet). Les MO se fixent aux séquences complémentaires d'ARN par appariement de bases. Ce sont des molécules simple brin synthétiques d'une longueur de 25 bases. La structure chimique d'une molécule de MO est donnée ci-dessous.



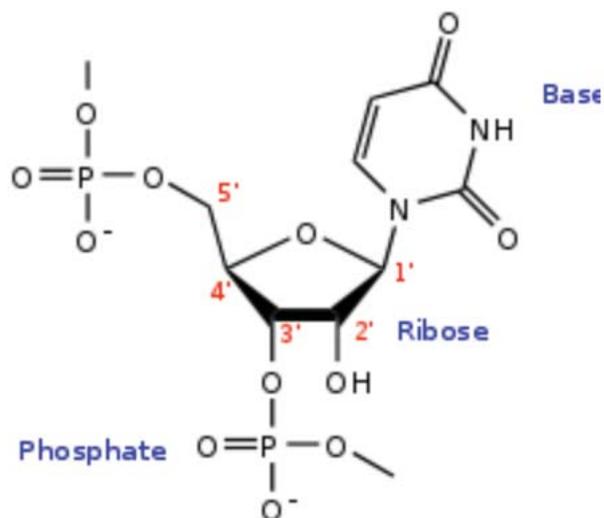
En vert : Cycle morpholine

En bleu : groupements phosphorodiamidate

Les bases retrouvées dans un MO sont indiquées sur la figure.

**QI.C.7 :** Représenter et annoter la structure chimique d'une molécule d'ARN. Comparer cette structure à la structure d'un MO.

Réponse à la question QI.C.7



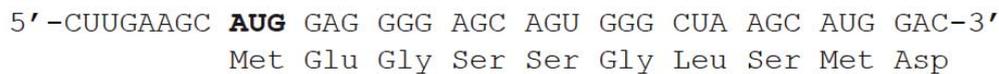
Les MOs diffèrent de l'ARN par le fait qu'ils possèdent des bases azotées fixées sur des cycles morpholines (et non ribose) qui sont reliés entre eux par des groupements phosphorodiamidate (et non des groupes phosphate). Ce groupement dérive d'un phosphate par substitution de groupes  $-OR$  par des groupes  $-NR_2$ .

Un MO a été généré pour le gène *Adsl* du xénope. La figure ci-dessous indique le positionnement de ce MO sur cet alignement de séquence des ARNm *Adsl* du xénope et *ADSL* humain. En rouge sont indiquées les bases qui diffèrent entre ces deux séquences d'ARNm.



**QI.C. 8 :** En vous servant du code génétique fourni dans l'Annexe 5, écrire la séquence protéique correspondant à la séquence de l'ARNm *Adsl* de xénope donnée dans la figure ci-dessus.

Réponse à la question QI.C.8



Trop de candidats ont commencé la séquence protéique en amont de l'ATG

**QI.C. 9 :** Écrire, dans le sens 5'-3', la séquence du MO *Adsl*.

Réponse à la question QI.C.9

*Adsl* MO 5'- TGCTTAGCCCACTGCTCCCCCTCCAT -3'

Certains candidats ont donné la séquence de ce MO dans l'orientation 3'-5'.

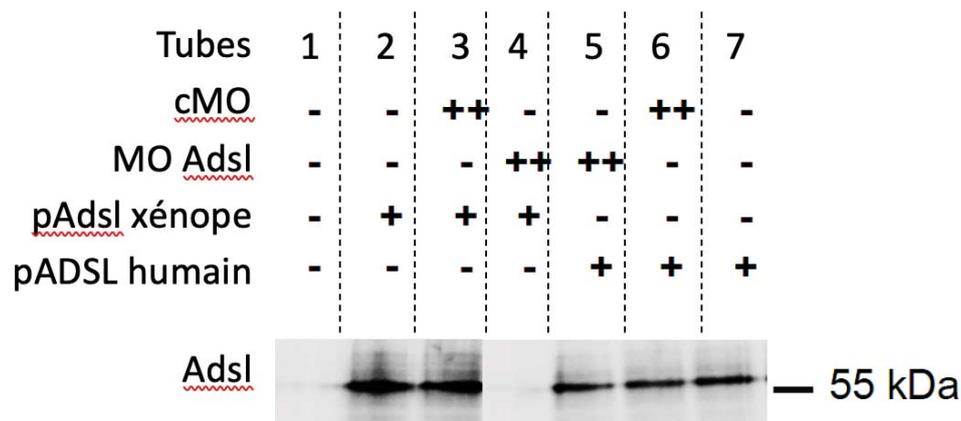
**QI.C.10 :** Sachant que la fixation du MO sur le brin d'ARNm n'entraîne pas la dégradation de l'ARNm *Adsl*, quelle hypothèse peut-on faire pour expliquer que cette technologie peut conduire au knock-down du gène *Adsl* ?

Réponse à la question QI.C.10

La fixation du MO au niveau de la séquence du code initiateur de la traduction va interférer avec la progression du complexe ribosomique et empêcher la traduction de l'ARNm.

On dispose des plasmides d'expression eucaryote pAdsl xénope et pADSL humain qui permettent de générer par traduction *in vitro* les protéines Adsl de xénope et ADSL humaine. La séquence de la partie 5' de l'ARNm ADSL humain est donnée dans la figure précédente.

Des micro-injections de plasmides ou de MO ont été réalisées dans des ovocytes prélevés dans les ovaires : les plasmides ont été micro-injectés dans le noyau et les MO dans le cytoplasme de chaque ovocyte. Après deux jours de culture, les protéines ont été extraites et un western-blot a été réalisé à partir de ces extraits protéiques avec un anticorps qui reconnaît la protéine Adsl. Le cMO est un MO qui ne reconnaît aucune séquence nucléotidique amphibienne.



**QI.C.11** : Expliquer pourquoi il est nécessaire d'injecter les plasmides dans le noyau.

Réponse Question I.C.11

Les ADNc présents dans les plasmides doivent être transcrits en ARNm.

La transcription s'effectue dans le noyau.

**QI.C.12** : Que peut-on conclure des résultats de la condition 1 ?

Réponse Question I.C.12

Cette condition correspond à des ovocytes n'ayant pas été injectés.

Ceci montre que le gène *Adsl* n'est pas exprimé dans les ovocytes non injectés.

**QI.C.13** : Quelle est l'utilité de la micro-injection du cMO ?

Réponse Question I.C.13

Le cMO ne reconnaît aucune séquence nucléotidique d'amphibien. De ce fait il ne se fixe sur aucun ARNm, dont l'ARNm *Adsl*.

On observe une bande dans les tubes 3 et 6, ce qui est le résultat attendu. L'injection de ce cMO n'inhibe pas la traduction de l'ARN

Cette micro-injection sert de contrôle d'injection.

**QI.C.14** : Conclure sur les résultats des conditions 2 et 4.

Réponse Question I.C.14

On observe une bande dans la condition 2 et aucune bande dans la condition 4.

La protéine *Adsl* de xénope a bien été produite à partir du plasmide p*Adsl* dans les ovocytes et l'injection du MO *adsl* inhibe cette traduction.

Le MO est efficace pour inhiber la traduction d'*Adsl* in vivo et peut être utilisé pour les expériences de perte de fonction.

**QI.C.15** : Expliquer sur les résultats des conditions 5 et 7. Quel est l'intérêt d'avoir réalisé ces conditions ?

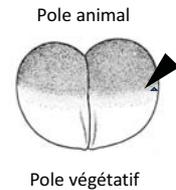
Réponse Question I.C.15

On observe une bande dans le tube 5 et 7.

La protéine ADSL Humaine a bien été produite à partir du plasmide pADSL dans les ovocytes mais le MO *Adsl* n'inhibe pas la traduction de cet ARNm puisque la séquence humaine est différente de celle d'*Adsl* de xénope (11 bases différentes). Ces changements de bases ne permettent pas la fixation des MOs sur l'ARNm ADSL.

Ces conditions sont un contrôle. Elles permettent de tester la spécificité de fixation du MO *Adsl*.

Des injections du MO Adsl ou cMO ont été effectuées dans l'embryon de xénope au stade 2 cellules au niveau de la zone marginale comme indiqué par le triangle sur le schéma. Les MO ont été co-injectés avec l'ARNm *LacZ* dans chaque embryon.



Les potentiels phénotypes ont été analysés par immunohistochimie indirecte avec un anticorps monoclonal qui reconnaît spécifiquement une protéine, appelée X dans la suite du sujet, exprimée dans les cellules musculaires différenciées.

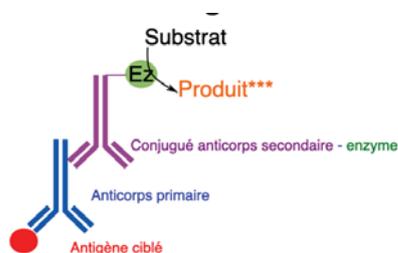
Les embryons obtenus à la suite de cette expérience se trouvent dans les boîtes de Pétri notées A et B. Ces embryons sont dans du PBS1X.

Voici une liste d'anticorps pouvant être utilisés pour réaliser cette immunohistochimie indirecte.

1	Anticorps monoclonal de souris anti-X couplé à la phosphatase alcaline (avec son substrat)
2	Anticorps monoclonal de souris anti-X de xénope couplé à l'Alexia 405
3	Anticorps polyclonal de chèvre anti-X de xénope
4	Anticorps polyclonal d'âne anti-IgG de souris
5	Anticorps monoclonal de souris anti-X de xénope
6	Anticorps monoclonal de chèvre anti-IgG de souris couplé à l'Alexa 405
7	Anticorps polyclonal de chèvre anti-IgG de xénope couplé à la phosphatase alcaline (avec son substrat)
8	Anticorps monoclonal de chèvre anti-IgG de souris couplé à la phosphatase alcaline (avec son substrat)
9	Anticorps polyclonal d'âne anti-IgG de souris couplé à la phosphatase alcaline (avec son substrat)

**QI.C.16 :** Faire une représentation schématique de l'échafaudage moléculaire nécessaire à la réalisation de cette immunohistochimie en indiquant le numéro des anticorps de la liste qui doivent être utilisés.

Réponse Question I.C.16



Antigène : protéine du tissu musculaire

Ac primaire : n5

Ac secondaire : n9

**Observer les embryons des boîtes de Pétri notées A et B, en comparant les côtés injectés et non injecté.**

**QI.C.17 :** Décrire les phénotypes observés et calculer le pourcentage de ces phénotypes observés dans chaque condition. Identifier quel tube correspond à l'injection du MO Adsl.

Réponse Question I.C.17

\* L'embryon présent dans le tube A possède une morphologie normale, aucune courbure selon l'axe antéro-postérieur, images du haut. Le marquage se trouve au niveau des somites. Ce marquage est identique sur les 2 côtés de l'embryon, sur le côté non injecté (contrôle) et injecté (identifié avec la révélation de l'activité  $\beta$ -gal). Ce tube correspond à l'injection du cMO.

\* L'embryon présent dans le tube B a une morphologie altérée, associée à une courbure selon l'axe antéro-postérieur, images du bas. Le marquage sur le côté non injecté est normal, montrant des somites en forme de chevrons. Par contre, ce marquage est altéré, les somites ne présentent pas cette morphologie en chevrons,

**QI.C.20 :** Réaliser un dessin d'observation titré et légendé d'un embryon dans chacune des conditions qui illustre au mieux vos observations en indiquant les axes de ces embryons.

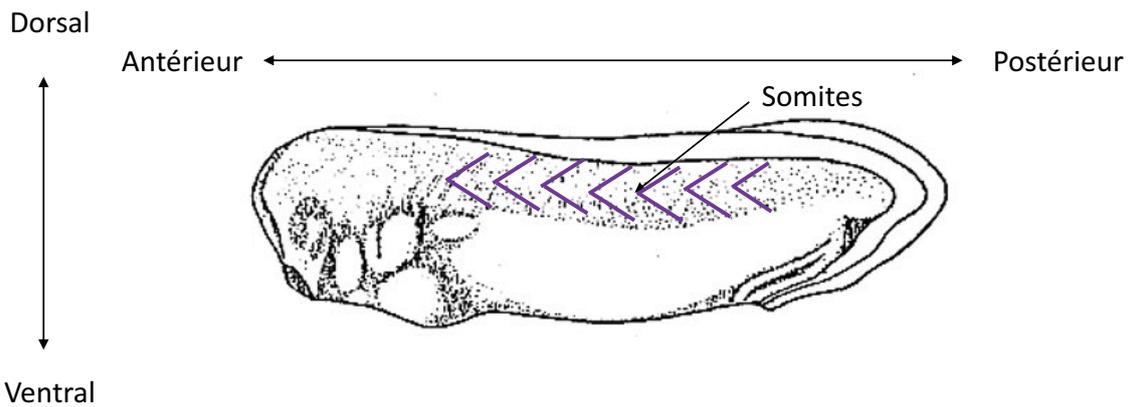
Dans la majorité des copies, la description de ces phénotypes était sommaire et peu détaillée.

**QI.C.18** : Représenter vos observations par un schéma titré et légendé d'un embryon dans chacune des conditions en indiquant les axes de ces embryons.

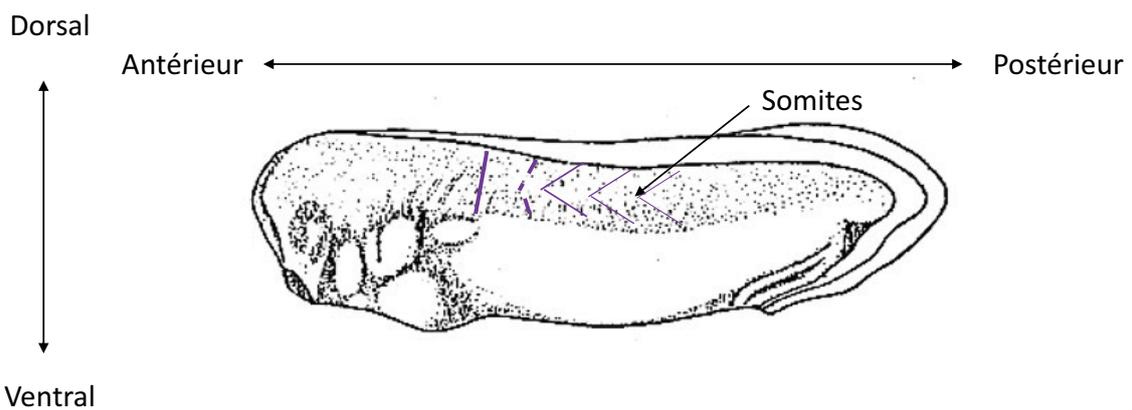
**Appeler un examinateur afin qu'il évalue vos dessins des 2 embryons. Il est nécessaire de présenter dans une boîte de Pétri recouvert de fonds d'agarose les 2 embryons que vous avez dessinés.**

Réponse Question I.C.18

Embryon tube A



Embryon tube B

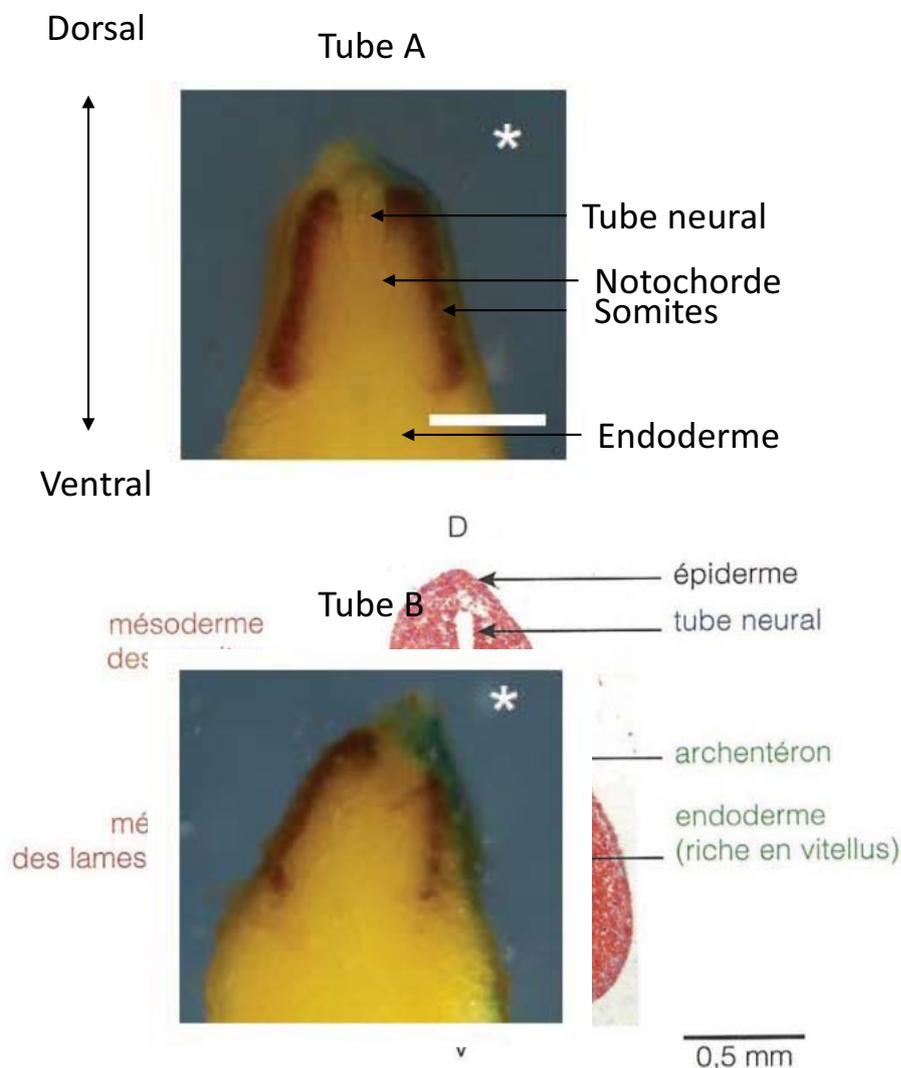


- Placer les embryons dessinés sur le couvercle de chacune des boîtes de Pétri. Enlever le maximum de PBS à l'aide de la pipette et papier absorbant.
- Effectuer une série de deux à trois coupes transversales au niveau du tronc de ces embryons.
- Placer ces coupes dans la boîte de Pétri recouvert de fonds d'agarose correspondant à la condition d'injection A ou B de l'embryon.

**Question I.C.19 :** Réaliser un dessin d'observation titré d'une coupe de ces embryons en légendant les différents organes/tissus présents sur ces coupes et en indiquant les axes des embryons.

**Appeler un examinateur afin qu'il évalue vos dessins des coupes.**

Réponse Question I.C.19



Il est à noter que les altérations étaient embryon-dépendantes.

Ces photographies donnent une indication des phénotypes observés (dans ce cas la révélation de l'immunohistochimie est visible par la coloration marron)

**Question I.C.20 :** Conclure sur ces résultats.

### Réponse Question I.C.20

L'injection du MO Adsl conduit à une altération des somites, désorganisation des chevrons, marquage moins prononcé suggérant un nombre réduit de cellules musculaires différenciées.

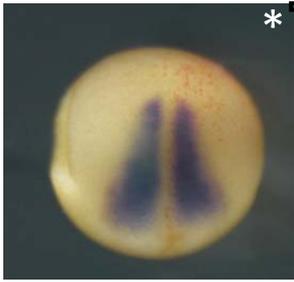
L'inhibition de l'expression de Adsl induit ces altérations. Ceci démontre que la protéine Adsl est impliquée dans la formation des somites chez le xénope.

Des injections supplémentaires ont été réalisées afin d'étudier les fonctions du gène Adsl à des stades plus précoces. Les embryons ont toujours été micro-injectés au stade 2 cellules au niveau de la zone marginale. Différentes combinaisons de MO et d'ARNm ont été co-injectées avec l'ARNm *LacZ* dans chaque embryon.

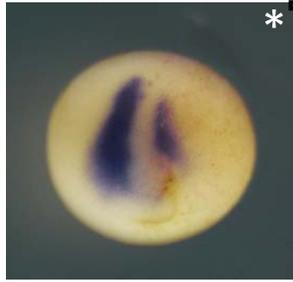
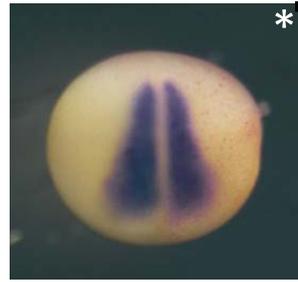
Les phénotypes des embryons ont été analysés par hybridation *in situ* avec une sonde spécifique du gène *Myod*, qui est un gène exprimé dans le mésoderme et impliqué dans la différenciation musculaire.

La figure ci-dessous regroupe des photographies d'embryons représentatifs des phénotypes observés. Le côté injecté est indiqué par l'astérisque. Les embryons sont orientés face postérieure et région dorsale vers le haut. Les résultats d'analyse des embryons est donné dans le tableau ci-dessous. Trois phénotypes ont été observés : Domaine d'expression normal (N) ou Domaine d'expression réduit (Red) ou aucun marquage (Abs) sur le côté injecté. Le tableau recense le phénotype de chaque embryon analysé.

cMO



MO Adsl

MOAdsl +  
*Adsl Human mRNA*

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

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

embryon	MO Adsl+ARN ADSL
1	N
2	Red
3	N
4	Red
5	N
6	N
7	Red
8	N
9	N
10	N
11	N
12	N
13	N
14	N
15	N
16	Red
17	N
18	N
19	N
20	Red
21	N
22	N
23	N
24	N
25	Red
26	N
27	N
28	N
29	N
30	Red
31	N
32	N
33	Red
34	Red
35	N
36	N
37	N
38	N
39	N
40	Red

Il s'agit ici de déterminer si

1. L'injection du MO Adsl induit une perturbation du domaine d'expression de MyoD
2. La co-injection du MO Adsl et ARN *ADSL* humain induit les mêmes altérations phénotypiques que l'injection du MO Adsl.

**L'analyse de ces données nécessite un test statistique.** Les valeurs étant des valeurs nominales, il faut faire un test de Chi-2. Ce test permet de déterminer s'il existe des différences significatives entre les conditions d'injection au seuil choisi de 5% en émettant l'hypothèse suivante :

H0 : Les variables conditions d'injection et phénotypes sont indépendants.

Il est nécessaire de représenter les résultats par un tableau de contingence : Les effectifs réels (observés) sont rassemblés dans un tableau à double entrée, par ligne pour le premier caractère (ici conditions d'injection), et par colonne en fonction du second caractère (phénotype normal ou altéré).

La dernière case du tableau (grisée) correspond au nombre total d'embryons analysés= NZ.

Si l'hypothèse H0 est vraie, un deuxième tableau rassemblant les effectifs prévus est généré avec la formule suivante :  $(NX*NY) / NZ$

**Question I.C.22** : Compléter les tableaux de contingence ci-dessous pour les 2 interrogations. En vous servant d'Excel, générer les tableaux des effectifs prévus si l'hypothèse H0 est vraie et reporter vos résultats dans les tableaux ci-dessous.

Effectuer les tests Chi2 :

**Pour effectuer cette analyse, vous disposez du logiciel Excel.**

- A partir de l'interface des onglets, choisir SIGMA

Avec le menu déroulant : Autres fonctions-STATISTIQUES

Choisir catégories

Avec le menu déroulant : sélectionnez la fonction : TEST.KHIDEUX

- Sélectionnez les plages de données réelles et prévues.

**Renseignez la p-value obtenue.**

**Enregistrer votre réponse sur la clé USB fournie.**

## Réponse Question I.C.22

Interrogation 1				
effectifs réels				
	X :injection /Y :phénotype	Normal	Altéré	NX : total général d'embryons par injection
	cMO	33	6	39
	MO P2X5	12	29	41
	NY : total général d'embryons par phénoty	45	35	80
Effectifs prévus				
	X :injection /Y :phénotype	Normal	Altéré	
	cMO	21,9375	17,0625	
	MO P2X5	23,0625	17,9375	
				6,10173E-07
Interrogation 2				
effectifs réels				
	X :injection /Y :phénotype	Normal	Altéré	NX : total général d'embryons par injection
	MO P2X5	12	29	41
	MO P2X5+Homme	30	10	40
	NY : total général d'embryons par phénoty	42	39	81
Effectifs prévus				
	X :injection /Y :phénotype	Normal	Altéré	
	cMO	21,25925926	19,74074074	
	MO P2X5	20,74074074	19,25925926	
				3,81569E-05

**Question I.C.23** : Analyser les résultats et conclure sur ces résultats.

### Réponse Question I.C.23

L'injection du CMO n'induit aucun phénotype (marquage MyoD normal) sur le côté injecté chez plus de 85% des embryons.

L'injection du MO Adsl entraine une altération du domaine d'expression de MyoD : le domaine d'expression est réduit ou absent chez 75% des embryons. Les différences phénotypiques entre le cMO et MO adsl sont statistiquement significatives.

Plus de 75% des embryons co-injectés avec le MO Adsl et l'ARNm ADSL présentent un domaine d'expression normal sur le côté injecté. Ceci montre que l'injection de l'ARNm sur lequel le MO ne peut se fixer sauve le phénotype du MO Adsl, le domaine d'expression de MyoD est normal.

La protéine Adsl régule l'expression du gène MyoD. Ces phénotypes observés lors de la différenciation musculaire à un stade précoce de développement expliquent les phénotypes tardifs (QI.C.11-13)

## Partie II : Caractérisation de la succinate déshydrogénase (SDH) mitochondriale

### Partie A : Étude de l'enrichissement d'une fraction cellulaire en mitochondries

La partie B vise à caractériser l'enzyme SDH que l'on trouve dans les mitochondries. Pour cela, on a réalisé un enrichissement de fractions cellulaires en mitochondries en recourant à plusieurs centrifugations à partir d'un foie de veau.

**QII.A.1** : En quoi le foie de veau est-il un modèle d'étude pertinent pour réaliser cette étude préliminaire ?

Réponse à la question QII.A.1

Les hépatocytes sont particulièrement riches en mitochondries, environ 20% de leur volume cellulaire ; cet organe présente peu de tissu conjonctif par rapport au muscle par exemple donc l'extraction des mitochondries est assez aisée. De plus c'est un matériel biologique peu onéreux et facile à se procurer.

Un foie de veau a été sectionné en fins morceaux et broyé dans du tampon TEA. Le broyat noté B a été centrifugé dans des tubes de 10 mL à 500 g pendant 10 minutes. Le culot a été resuspendu dans 2 mL de tampon TEA, formant ainsi la fraction C1 tandis que le surnageant a été centrifugé à 10 000 g pendant 10 minutes. Le nouveau culot obtenu a été resuspendu dans 2 mL de tampon TEA, formant ainsi la fraction C2 tandis que le surnageant constitue la fraction S. Vous disposez d'un aliquote du broyat (B), des fractions C1 et C2, ainsi que du surnageant (S).

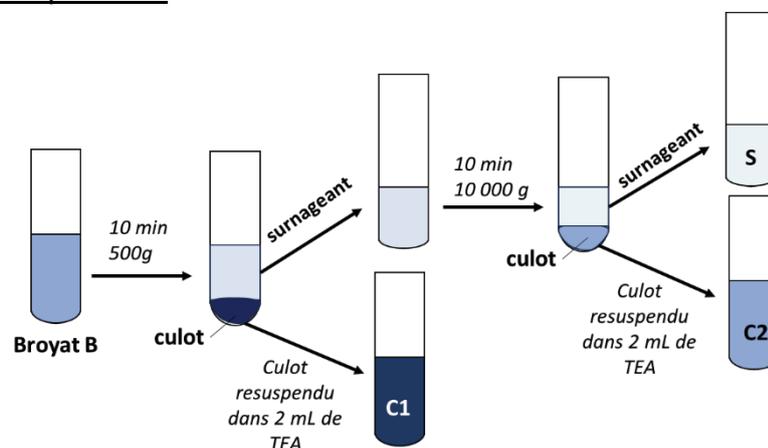
**QII.A.2** : Rappeler le principe et l'intérêt de la centrifugation différentielle.

Réponse à la question QII.A.2

Cette méthode permet de séparer les composants cellulaires en suspension en fonction de leur densité en soumettant l'échantillon à une succession de cycles de centrifugation avec une valeur croissante de g.

**QII.A.3** : Schématiser le protocole expérimental afin d'identifier les différentes fractions.

Réponse à la question QII.A.3



- Réaliser un frottis pour chacune des fractions B, C1 et C2 sur une lame de verre.

- **Après avoir laissé sécher quelques minutes, recouvrir chaque lame avec quelques gouttes d'éthanol 100% et laisser agir 2 minutes.**
- **Éliminer le surplus d'éthanol et laisser sécher à l'air libre.**
- **Lorsque le frottis est sec, recouvrir de quelques gouttes du mélange suivant pendant 5 minutes : 100 µL de colorant de Giemsa, colorant basique qui colore en particulier les acides nucléiques en violet, dilué dans 2 mL d'eau neutre.**
- **Rincer délicatement avec de l'eau neutre.**
- **Observer au microscope au grossissement approprié.**

**QII.A.4 :** Rendre compte de l'observation microscopique des trois frottis dans un tableau en identifiant le maximum d'éléments de façon raisonnée.

#### Réponse à la question QII.A.4

B	C1	C2
- Groupements de cellules jointives avec noyaux colorés en violet	- Quelques cellules isolées avec noyau coloré en violet	- Plusieurs dizaines de structures ovoïdes d'environ 1µm avec coloration violet clair : mitochondries
- Quelques cellules isolées avec noyau coloré en violet	- Éléments sphériques d'environ isolés avec coloration violette : noyaux	- Petites structures sphériques parfois agglomérées, de petite taille (<1µm) faiblement colorées : peroxysomes, lysosome
- Éléments fibreux enchevêtrés, plus ou moins opaques, légèrement colorés en rose : matrice extracellulaire et débris tissulaires	- Éléments fibreux isolés, peu opaques, légèrement colorés en rose : débris cellulaire	

**QII.A.5 :** Rendre compte de l'observation microscopique du frottis de votre choix permettant l'observation de mitochondries, par un dessin d'observation légendé. **Appeler un examinateur pour vérification de l'adéquation entre le champ d'observation microscopique et le dessin sur lequel sera précisé la fraction observée.**

#### Réponse à la question QII.A.5

Qualité de la coloration, du frottis et de l'observation microscopique				Qualité du dessin d'observation	
Grossissement adéquat avec huile à immersion	Contraste et luminosité	Épaisseur du frottis permettant l'observation d'éléments dissociés	Coloration réussie avec des éléments rose clair et d'autres violets	Adéquation avec le champ d'observation	Légende cohérente avec l'observation

Le jury a apprécié et valorisé l'honnêteté et la rigueur des candidats qui ont décrit l'observation de bactéries ou ont indiqué ne pas observer de mitochondrie lorsque elles n'étaient effectivement pas visibles.

**QII.A.6 :** Préciser en le justifiant si les résultats des frottis permettent de déterminer quelle fraction est enrichie en mitochondries.

Réponse à la question QII.A.6

L'observation microscopique seule ne permet pas de conclure : bien que la fraction C2 contienne des structures d'environ 1µm colorées au Giemsa étant vraisemblablement des mitochondries, il pourrait également s'agir de bactéries initialement présentes dans l'échantillon ou encore de fragments nucléaires.

**QII.A.7 :** Rappeler l'origine évolutive des mitochondries en citant trois arguments moléculaires.

Réponse à la question QII.A.7

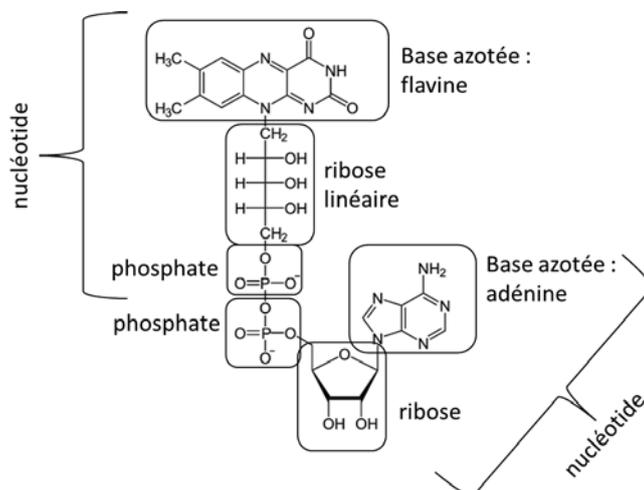
- D'après la théorie endosymbiotique, les mitochondries proviennent de l'endosymbiose d'une protéobactérie au métabolisme aérobie. Arguments :
- génome mitochondrial a une structure proche d'un génome bactérien (peu d'introns, circulaire etc.)
  - double membrane dont une membrane interne à composition proche d'une membrane bactérienne.
  - composition en ARNr des ribosomes (16s)
  - modalités de division etc.

Afin de confirmer l'enrichissement d'une des fractions précédentes en mitochondries, on cherche à réaliser un dosage de l'activité enzymatique de la SDH, la succinate déshydrogénase, appelée aussi succinate-coenzyme Q réductase. La SDH est localisée au niveau de la membrane interne mitochondriale. Elle catalyse dans le cycle de Krebs une réaction mettant en jeu les molécules du couple (FAD/FADH<sub>2</sub>) et du couple (fumarate/succinate). La SDH permet également la formation d'ubiquinone QH<sub>2</sub> dans la chaîne respiratoire.

**QII.A.8 :** Après avoir rappelé la signification de l'acronyme FAD, légènder sa formule ci-dessous pour déterminer les groupes d'atomes caractéristiques de cette molécule.

Réponse à la question QII.A.8

Flavine adénine dinucléotide



Le jury déplore que cette question n'ait pas été traitée par la majorité des candidats ou alors de façon très superficielle alors que la reconnaissance des nucléotides, des riboses et des groupements phosphates semblent être une base fondamentale et indispensable à l'étude de mécanismes biochimiques.

Les formules du fumarate et du succinate sont rappelées ci-dessous.



**QII.A.9** : Déterminer le nombre d'oxydation du carbone 2 indiqué par une flèche pour chacune de ces molécules. Préciser la formule brute de ces deux molécules et la demi-équation d'oxydoréduction qui permet le passage de l'une à l'autre.

Réponse à la question QII.A.9

Pour le fumarate ; n.o. = -1 (carbone plus oxydé) ;  $C_4H_2O_4$

Pour le succinate ; n.o. = -2 (carbone plus réduit) ;  $C_4H_4O_4$

Succinate = Fumarate +  $2H^+$  +  $2e^-$

$C_4H_4O_4^{2-}$       $C_4H_2O_4^{2-}$

Seules quelques rares candidats ont été capables de déterminer le nombre d'oxydation. Trop de candidats n'ont pas été capable de fournir une formule brute et d'équilibrer la demi-équation pourtant simple.

**QII.A.10** : Rappeler la relation permettant de déterminer la variation d'enthalpie libre en conditions standards au cours d'une réaction d'oxydoréduction à partir des potentiels standards de transfert d'électrons.

Réponse à la question QII.A.10

$\Delta rG^{0'} = -n.F.(E^{0'} \text{ accepteur d'électrons} - E^{0'} \text{ donneur d'électrons}) = -n.F.\Delta E^{0'}$   
avec n le nombre d'électrons échangés et F le nombre de Faraday.

Vous disposez des potentiels standards de transfert d'électrons de quelques couples d'oxydoréduction.

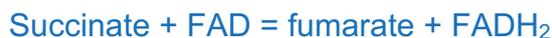
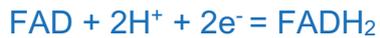
Couple d'oxydoréduction	$E^{0'}$ (V)
(Cétoglutarate / Citrate)	-0,38
( $NAD^+$ / $NADH, H^+$ )	-0,32
( $NADP^+$ / $NADPH, H^+$ )	-0,32
(FAD / $FADH_2$ )	-0,22
(Pyruvate / Lactate)	-0,18
(Oxaloacétate / Malate)	-0,16
(Fumarate / Succinate)	0,031
(Q / $QH_2$ )	0,045
( $NO_3^-$ / $NO_2^-$ )	0,42
( $O_2$ / $H_2O$ )	0,81

**QII.A.11** : Déterminer la variation d'enthalpie libre associée à la réaction catalysée par la SDH dans le cycle de Krebs permettant la production de fumarate et de FADH<sub>2</sub> dans des conditions standards. Cette réaction est-elle endergonique ou exergonique ? Est-ce attendu ?

*Données complémentaires : nombre de Faraday  $F \approx 96485 \text{ C.mol}^{-1}$  ; R constante des gaz parfait  $R = 8,314 \text{ J.mol}^{-1}$  ; température standard  $T = 298 \text{ K}$*

Réponse à la question QII.A.11

Les deux demi-équations d'oxydoréduction sont :



$$\begin{aligned}\Delta_r G^0 &= -n.F.(E^0 \text{ accepteur d'électrons} - E^0 \text{ donneur d'électrons}) \\ &= -2 \times 96485 \times (-0,22 - 0,031) \\ &= +48,4 \text{ KJ/mol} > 0\end{aligned}$$

La réaction est endergonique ; cela est surprenant car cette réaction s'effectue de dans le cycle de Krebs.

Le FADH<sub>2</sub> produit à l'issue de cette réaction n'est pas libre dans le cytosol mais se trouve lié à la SDH sous la forme d'un groupement prosthétique. Il est oxydé par des centres Fer-Soufre ce qui aboutit à la formation de QH<sub>2</sub> dans la chaîne respiratoire. On rappelle que la formule permettant de déterminer la variation d'enthalpie libre, dans des conditions non standards, associée à une réaction d'oxydoréduction est la suivante :

$$\Delta_r G = \Delta_r G^0 + RT \cdot \ln \frac{[\text{Produit1}] \cdot [\text{Produit2}]}{[\text{Réactif1}] \cdot [\text{Réactif2}]}$$

**QII.A.12** : En considérant les concentrations apparentes à proximité de la SDH suivantes :

[Succinate] = 158 mM ; [Fumarate] = 0.048 mM ; [FAD] = 280 mM ; [FADH<sub>2</sub>] = 0,0022 mM ; déterminer la variation d'enthalpie libre associée à la réaction catalysée par la SDH dans le cycle de Krebs permettant la production de fumarate et de FADH<sub>2</sub> dans des conditions cellulaires à T = 298 K. Confronter ces résultats avec ceux de la question QII.A.11.

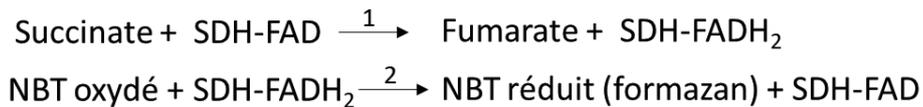
Réponse à la question QII.A.12

$$\Delta rG = 48400 + RT \cdot \ln \frac{[\text{fumarate}] \cdot [\text{FADH}_2]}{[\text{Succinate}] \cdot [\text{FAD}]}$$

$$\begin{aligned}\Delta rG &= 48400 + 8,314 \times 298 \ln [(0,048 \times 0,0022) / (158 \times 280)] \\ &= 48400 - 49200 \\ &= -0,8 \text{ KJ/mol} < 0\end{aligned}$$

En conditions cellulaires, la variation d'enthalpie est négative, la réaction est exergonique et peut se dérouler de façon spontanée ; ce qui n'est pas le cas en conditions standards lorsque réactifs et produits sont à une concentration de 1M.

On cherche à estimer l'activité enzymatique de la SDH dans les échantillons C1, C2, S et B (réaction 1 ci-dessous). Pour cela, on recourt au nitro bleu de tétrazolium (NBT) dont la couleur dépend de son état d'oxydation. La forme oxydée du NBT réagit avec le FADH<sub>2</sub> lié à la SDH comme groupement prosthétique noté SDH-FADH<sub>2</sub> (réaction 2 ci-dessous).

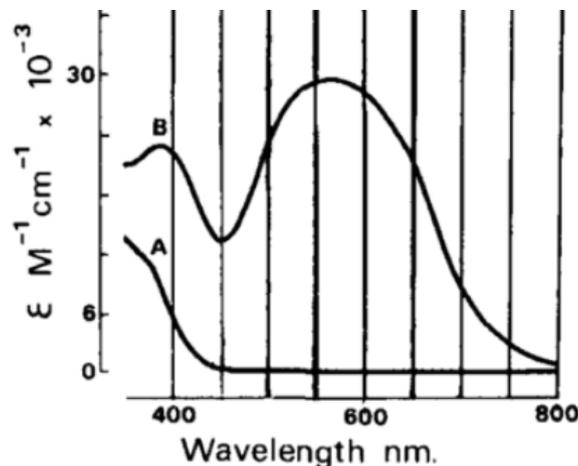


**QII.A.13 :** Quelles conditions doit remplir la réaction 2 pour que l'activité enzymatique de la SDH puisse être estimée par dosage colorimétrique ?

Réponse à la question QII.A.13

La réaction 2 doit être rapide, totale et sans interférence avec la réaction 1.

**QII.A.14 :** À partir du graphique ci-dessous présentant l'évolution de coefficient d'absorption molaire du NBT oxydé (A) et du formazan (B) en fonction de la longueur d'onde, est-il plus pertinent d'étudier la disparition de NBT oxydé ou l'apparition de formazan ?



Réponse à la question QII.A.14

Il est plus pertinent d'étudier la formation du formazan pour lequel le coefficient d'absorption molaire est maximal aux alentours de 550nm tandis que celui du NBT à cette longueur d'onde est nul. Ainsi la valeur d'absorbance déterminée à 550nm ne sera due qu'à la participation du formazan ; une valeur d'absorbance déterminée à 400nm ne permettrait pas de discriminer les participations relatives des deux espèces et donc leurs concentrations.

**QII.A.15 :** En déduire parmi la liste ci-dessous, la longueur d'onde à sélectionner sur le spectrophotomètre pour étudier la réaction 2 dans les différentes fractions.

Longueurs d'onde disponibles sur le spectrophotomètre :

405 nm      450 nm      490 nm      550 nm      650 nm      720 nm

Réponse à la question QII.A.15

550nm

**QII.A.16 :** Quelles hypothèses doit-on faire pour qu'un lien puisse être établi entre quantité de formazan formée, ou quantité de NBT oxydé consommé, et quantité de mitochondries dans les fractions ?

Réponse à la question QII.A.16

Il faut faire l'hypothèse que les réactions 1 et 2 ne peuvent être effectuées que par la SDH et par aucune autre enzyme ; il faut également faire l'hypothèse que la SDH n'est présente que dans les mitochondries et dans des proportions équivalentes dans toutes les mitochondries.

- **Préparer les 10 tubes à hémolyse sur glace en suivant les indications du tableau de la question QII.A.17.**
- **Une fois les mélanges constitués, homogénéiser les tubes par retournement et les incuber 10 minutes au bain marie à 37°C.**
- **Après les 10 minutes, placer les tubes à nouveau dans la glace.**
- **Transférer le contenu des tubes dans les cuves de spectrophotométrie et mesurer l'absorbance à la longueur d'onde précédemment déterminée.**

**QII.A.17** : Compléter le tableau ci-dessous avec les valeurs d'absorbance mesurées.

Réponse à la question QII.A.17

TUBE	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Tampon TEA (μL)	800	900	700	900	700	900	700	900	700	600
Solution de malonate 1M (μL)										100
Solution de succinate 100 mM (μL)	100		100		100		100		100	100
Solution de NBT 0,5% (μL)	100		100		100		100		100	100
Fraction C1 diluée 5 fois dans du TEA		100	100							
Fraction C2 diluée 5 fois dans du TEA				100	100					
Fraction S diluée 5 fois dans du TEA						100	100			
Fraction B diluée 5 fois dans du TEA								100	100	100
Absorbance	0,09	0,18	0,35	0,17	0,52	0,11	0,16	0,1	0,49	0,33

Certains candidats ont obtenu des valeurs d'absorbance supérieures à 1,8 ce qui rendait compte d'une erreur de dilution et ne permettait pas d'établir une relation linéaire entre la concentration de NBT et l'absorbance.

**Appeler un examinateur pour vérification de l'adéquation entre les mesures d'absorbance et l'aspect des cuves.**

**QII.A.18** : Une solution de NBT à 0,5 % correspond à une solution de 100 mL contenant 0,5 g de NBT. Le NBT a une masse molaire de 817 g.mol<sup>-1</sup>. Quelle masse de NBT a-t-on dû peser pour préparer 900 μl de solution de NBT à 0,5 % ? Quelle est la concentration molaire de cette solution ?

Réponse à la question QII.A.18

Pour préparer 900 μl de solution de NBT à 0,5 %, on a pesé  $m = 0,9 \times 0,5 / 100$  mL =  $4,5 \cdot 10^{-3}$  g = 4,5 mg

$C = n/V = m/M \times (1/V) = 0,5 / 817 \times (1/0,1) = 6,12 \cdot 10^{-3}$  mol.L<sup>-1</sup>

**QII.A.19** : Sachant que la masse molaire du succinate est de 118,09 g.mol<sup>-1</sup>, quelle masse de succinate a-t-on dû peser pour préparer 900 μl de solution de succinate à 100 mM ?

Réponse à la question QII.A.19

900 μl de solution de succinate à 100 mM contient

$N = C \times V = 100 \cdot 10^{-3} \times 900 \cdot 10^{-6} = 9 \times 10^{-5}$  mol.

Pour obtenir cette quantité de matière il faut peser

$m = n \times M = 9 \times 10^{-5} \times 118,09 = 10,6$  mg

**QII.A.20** : Quelle est l'utilité du tube 0 ?

Réponse à la question QII.A.20

Il permet de faire le blanc en attribuant une absorbance nulle pour le mélange tampon TEA + réactifs (succinate + NBT) sans réaction enzymatique.

**QII.A.21** : Quelle est l'utilité des tubes 1, 3, 5 et 7 ?

Réponse à la question QII.A.21

Ils permettent déterminer l'absorbance des fractions B, C1, C2 et S en absence de réactifs et de réaction enzymatique.

**QII.A.22** : Pourquoi les étapes 1 et 3 du protocole se déroulent sur la glace ?

Réponse à la question QII.A.22

À l'étape 1, la glace permet de maintenir une température suffisamment basse pour inhiber la réaction enzymatique. On s'assure ainsi que la réaction ne débute pas immédiatement dans chaque tube lors de la préparation des mélanges réactionnels. À l'étape 5, la glace permet de stopper la réaction enzymatique en vue de la détermination de l'absorbance.

**QII.A.23** : Le malonate est un inhibiteur compétitif spécifique de la SDH. En comparant les valeurs d'absorbance pour les tubes 8 et 9, conclure quant à la spécificité du dosage enzymatique réalisé.

Réponse à la question QII.A.23

En présence de malonate, l'absorbance est diminuée d'environ 30%. Cela signifie que la réaction de dosage n'est pas totalement spécifique à la SDH ou que l'inhibition par le malonate n'est que partielle.

**QII.A.24** : Calculer la variation d'absorbance par minute et par mL de fraction pour les échantillons C1, C2, B et S en utilisant judicieusement les valeurs d'absorbances mesurées pour les tube 1, 3, 5 et 7.

Réponse à la question QII.A.24

Il faut soustraire à toute valeur d'absorbance mesurée, la valeur du tube 0 faisant office de blanc ainsi que la valeur du tube ne contenant que la fraction à tester (1, 3, 5 et 7). Il faut ensuite diviser cette valeur par 10, l'expérience durant 10 minutes, puis la multiplier par 50 pour rendre compte de la dilution de la fraction (100µL dilué 5 fois placé dans 1mL)

FRACTION		C1		C2		S		B	
TUBE	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Absorbance	0,09	0,18	0,35	0,17	0,52	0,11	0,16	0,1	0,49
Absorbance corrigée du blanc	0	0,09	0,26	0,08	0,43	0,02	0,07	0,01	0,40
Variation d'absorbance tube			0,17		0,35		0,05		0,39
Variation d'absorbance fraction (min <sup>-1</sup> .mL <sup>-1</sup> de fraction)			0,85		1,75		0,25		1,95

**QII.A.25 :** En admettant que le dosage réalisé ne rende compte que de l'activité de la SDH, calculer l'activité enzymatique de chaque échantillon en mol.L<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup> par mL de fraction. Donnée : longueur du trajet optique du colorimètre = 1 cm et  $\epsilon = 65 \text{ L.mol}^{-1}.\text{cm}^{-1}$

Réponse à la question QII.A.25

D'après la loi de Beer-Lambert,  $A = \epsilon \times l \times [\text{formazan}]$ . Les valeurs s'obtiennent facilement en divisant les résultats de la question précédente par  $\epsilon.l$ .

FRACTION	C1	C2	S	B
TUBE	2	4	6	8
activité enzymatique (mol.L <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> par mL de fraction)	$1,3 \times 10^{-2}$	$2,7 \times 10^{-2}$	$0,38 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2}$

**QII.A.26 :** Conclure quant à l'efficacité de l'enrichissement des fractions en mitochondries par la centrifugation différentielle. Quelles autres techniques permettraient d'améliorer cet enrichissement ?

Réponse à la question QII.A.26

Toutes les fractions présentent une activité de la SDH, la séparation des constituants et l'enrichissement en mitochondrie peuvent encore être améliorés en recourant par exemple à une centrifugation différentielle avec gradient de densité ou à une immunoprécipitation utilisant des anticorps reconnaissant des protéines spécifiques de la mitochondrie comme TOM.

La fraction S présente une activité enzymatique dix fois plus faible que la fraction C2, la majorité des mitochondries ont été extraites dans les fractions précédentes.

L'activité enzymatique de la fraction C2 est légèrement plus faible que la fraction initiale B. En prenant en compte la suspension du culot de 100 $\mu$ l dans un volume de 2mL, cette fraction est bien enrichie en mitochondries par rapport à B.

L'activité enzymatique de la fraction C1 est comparable à celle des fractions B et C2. Cela peut s'expliquer par la présence de cellules intactes et donc contenant des mitochondries, observées lors du frottis.

Toute analyse argumentée et cohérente avec les résultats expérimentaux a été valorisée.

## Partie B : Étude moléculaire de la SDH et de maladies associées à son dysfonctionnement

La SDH est un complexe enzymatique formé de plusieurs chaînes peptidiques. On se propose d'étudier les conséquences de mutations de gènes codant la SDH. Elles sont notamment à l'origine de prédispositions à certains cancers caractérisés par des tumeurs particulières comme des paragangliomes et des phéochromocytomes.

**Vous disposez du fichier SDH.pdb qui permet de visualiser la structure 3D de la SDH à partir du logiciel Libmol.** N.B. Les premiers acides aminés des chaînes peptidiques n'ont pas pu être déterminés avec certitude lors de la cristallographie. Ils sont donc absents du fichier de visualisation 3D de la protéine.

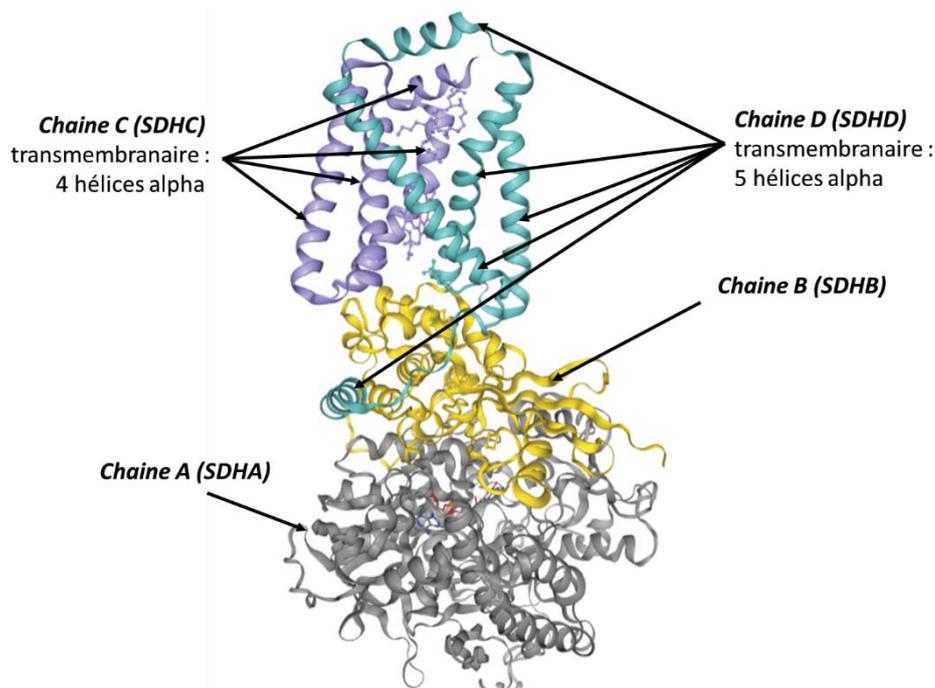
**QII.B.1 :** Après observation de la structure 3D de la SDH avec le logiciel Libmol, déterminer le nombre total de chaînes peptidiques qui la constituent ainsi que le nombre et le nom des chaînes peptidiques transmembranaires de la membrane interne qui sont celles constituées de 4 ou 5 hélices alpha.

Réponse à la question QII. B.1

La SDH est constituée de 4 chaînes peptidiques distinctes : SDHA ; SDHB ; SDHC ; SDHD. Les chaînes transmembranaires sont :

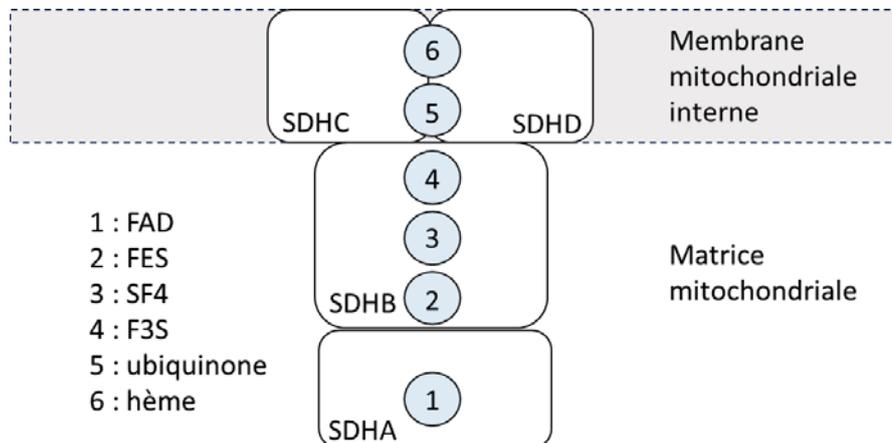
- SDHC constituée de 4 hélices alpha
- SDHD constituée de 5 hélices alpha

**QII.B.2 :** Rendre compte de l'organisation spatiale de ces chaînes peptidiques en effectuant **une capture d'écran de la structure 3D la plus pertinente et en la légendant**. Le document ainsi produit sera enregistré dans le document « power point » présent sur le bureau dans le dossier « TP A ». **Enregistrer votre réponse.**



**QII.B.3 :** Après observation de la structure 3D de la SDH avec le logiciel Libmol, en considérant les liaisons entre les chaînes peptidiques et le FAD, les 3 centres Fer-Soufre (FES, SF4 et F3S), l'ubiquinone et l'hème, réaliser un schéma rendant compte de la structure 3D de la SDH en utilisant la base ci-dessous.

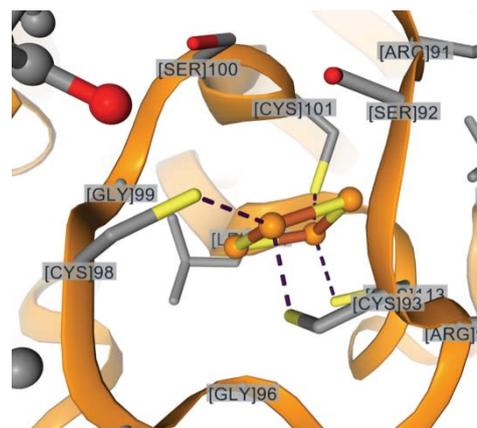
Réponse à la question QII. B.3



**QII.B.4 :** Après observation de la structure 3D de la SDH avec le logiciel Libmol, identifier la nature des acides aminés 93 et 98 de la chaîne B. En quoi peuvent-ils être importants pour la fonction de la SDH ?

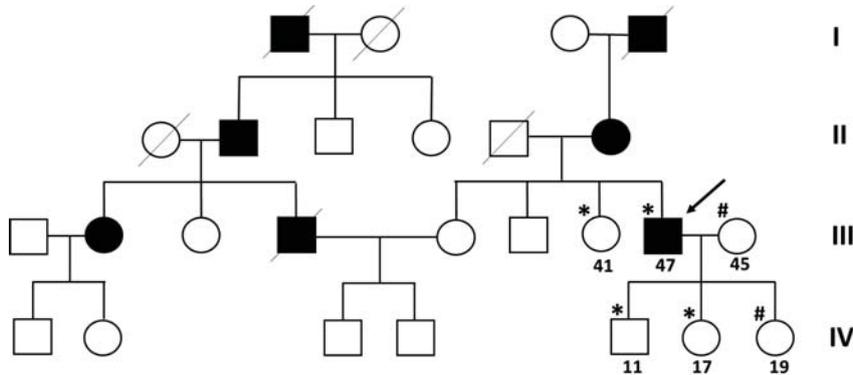
Réponse à la question QII. B.4

Il s'agit de 2 cystéines qui établissent une liaison de coordination avec le centre Fer-Soufre FES. Leur substitution diminuerait vraisemblablement l'activité enzymatique, la SDH ne pouvant plus fixer le centre Fer-Soufre impliqué dans le transfert d'électrons.



Trop de candidats ayant identifié la présence de cystéines, expliquent sans argument que l'interaction avec le centre Fer-Soufre s'effectue par des ponts disulfures.

La figure ci-dessous présente un pedigree d'une famille développant des phéochromocytomes causés par une mutation du gène codant la sous unité B de la SDH notamment au niveau de l'exon 3 du gène. Un symbole barré indique que la personne est décédée.



**QII.B.5 :** Rappeler la signification des cercles, des carrés, de la couleur blanche et de la couleur noire.

Réponse à la question QII. B.5

Les cercles correspondent à des femmes, les carrés à des hommes ; la couleur noir indique la présence de la pathologie étudiée chez l'individu, la couleur blanche son absence. Trop de candidats associent la couleur noire à la présence d'un allèle muté. Dans ce cas, l'étude de l'arbre ne présenterait que peu d'intérêt.

**QII.B.6 :** En ne considérant que les générations I, II et III, analyser l'arbre pour identifier de façon argumentée la ou les modalités de transmission de cette maladie génétique.

Réponse à la question QII. B.6

Les hommes et femmes sont touchés par la maladie : le gène n'est pas porté par le chromosome Y.

On trouve des personnes malades à chaque génération : 2 personnes malades sur 5 à la génération II et 3 personnes malades sur 7 à la génération III ; Toutes les personnes malades ont au moins un enfant malade. Cela indiquerait un mode de transmission dominant.

À la génération II, un homme malade a une fille qui n'est pas malade. Si la transmission s'effectue selon un mode dominant, le gène n'est pas porté par le chromosome X.

La maladie se transmet donc selon un mode autosomique dominant.

**QII.B.7** : Ce mode de transmission est-il cohérent avec une maladie causée par une mutation touchant une protéine mitochondriale ? Pourquoi ?

Réponse à la question QII. B.7

Oui, car une partie des protéines de la mitochondrie est codée dans le génome nucléaire, ce qui est le cas de la SDH. La transmission n'est donc pas forcément maternelle comme cela peut être le cas dans certaines pathologies ayant pour origine des mutations touchant l'ADN mitochondrial.

Un seul candidat a donné une réponse satisfaisante à cette question.

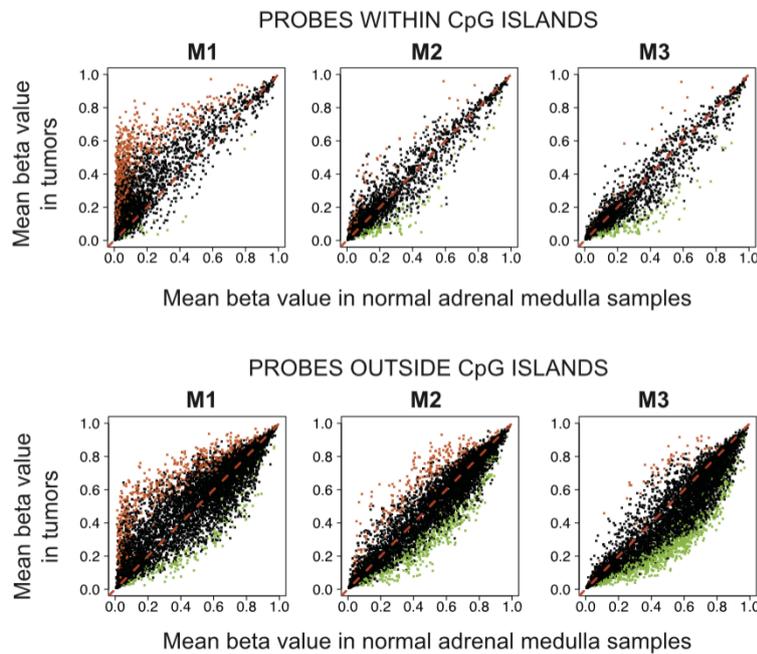
À la génération III, l'individu pointé par une flèche a participé à une étude génétique visant à caractériser la mutation responsable de phéochromocytomes familiaux. Le symbole \* indique que l'individu est porteur de la mutation tandis que le symbole # indique que l'individu n'est pas porteur. Les chiffres à côté des symboles correspondent aux âges des individus lors de l'étude génétique.

**QII.B.8** : Quelle information apporte cette étude génétique sur le lien entre mutation et maladie ?

Réponse à la question QII. B.8

Cette mutation a une pénétrance incomplète : certains individus porteurs ne sont pas atteints. La dernière génération est composée d'individus assez jeunes, les phéochromocytomes se développent chez les personnes âgées de plus de 30 ans.

Des études ont été réalisées afin de caractériser les phéochromocytomes, tumeurs des glandes médullosurrénales, provoquées par des mutations du gène codant la sous-unité B de la SDH. 145 de ces tumeurs ont été analysées et classées en 3 groupes M1, M2 et M3 d'après des critères biochimiques et génétiques. La méthylation de 27 000 régions du génome des tumeurs a été comparée à celle de cellules de glandes médullosurrénales sans tumeur dans des puces à ADN. Les résultats sont présentés sur la figure 1 ci-dessous.



**Figure 1.** Degré de méthylation (beta value) de 27 000 sites localisés dans des îlots CpG (haut) ou hors des îlots CpG (bas) déterminée chez les tumeurs des groupes M1, M2 et M3 (ordonnées) et chez les cellules de glandes médullosurrénales (abscisses). Pour la clarté de la représentation, les sites ont été ordonnés dans le sens d'une méthylation croissante déterminée chez les cellules de glandes médullosurrénales. Les points colorés indiquent des valeurs significativement différentes entre les tumeurs et les cellules de glandes médullosurrénales.

**QII.B.9 :** Qu'est-ce qu'un îlot CpG ? En quoi est-il pertinent d'estimer leur degré de méthylation ?

Réponse à la question QII. B.9

Un îlot CpG est une région du génome riche en dinucléotides C-G. Ces îlots sont fréquents dans les promoteurs (environ 70% des promoteurs en possèdent) et sont les lieux préférentiels de la méthylation de l'ADN sur les C des deux brins. Cette méthylation inhibe généralement la transcription à long terme.

Trop de candidats énoncent de façon imprécise que le degré de méthylation est une estimation de la transcription d'un gène. L'absence de méthylation n'est en aucun cas suffisante pour conclure quant au niveau de transcription d'un gène.

**QII.B.10 :** D'après l'analyse de la figure 1, caractériser le méthylome de chaque groupe de tumeur en précisant ce que sont les points verts et des points oranges.

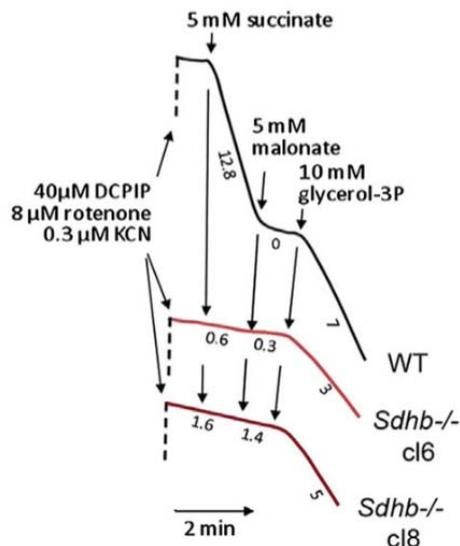
Réponse à la question QII. B.10

Les points rouges représentent des sites hyperméthylés chez les tumeurs, les points verts à des sites hypométhylés, par rapport aux cellules de glandes médullosurrénales.

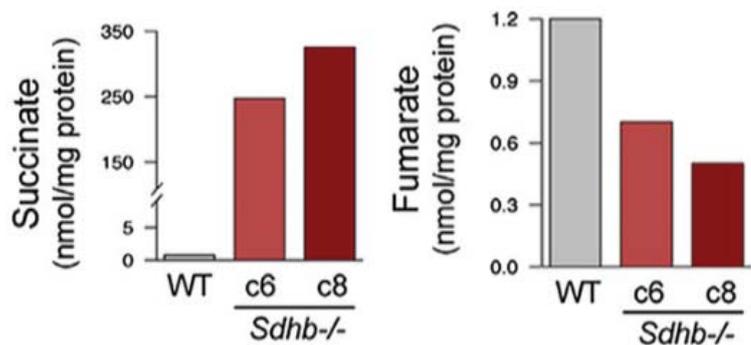
Les tumeurs M1 présentent une hyperméthylation des îlots CpG et dans une moindre mesure des sites hors îlots CpG. Les tumeurs M2 et M3 présentent quelques hyperméthylations hors des îlots CpG mais surtout des hypométhylations hors des îlots CpG. Les trois types de tumeurs présentent donc une altération de leur méthylome.

Afin de comprendre le lien entre les mutations des gènes codants la sous-unité SDH-B et la modification de la méthylation du génome, des souris exprimant une forme tronquée de la sous-unité SDH-B ont été générées par génie génétique, les autres

sous-unités n'étant pas altérées. Des cellules de glandes médullosurrénales de 2 mutants (c6 et c8) ont été immortalisées et mises en cultures. La concentration cellulaire en succinate et en fumarate a été déterminée par spectrométrie de masse après chromatographie en phase gazeuse comme présenté sur la **figure 2A** et l'activité enzymatique de la SDH a été mesurée après ajout de succinate et de malonate, inhibiteur compétitif de la SDH comme présenté sur la **figure 2B**.



**Figure 2A.** Suivi de l'activité enzymatique de la SDH dans des cellules de glandes médullosurrénales de souris sauvages (WT) ou de souris présentant une sous-unité SDH-B tronquée (*Sdhb*<sup>-/-</sup> c6 et c8), exprimée en mol.min<sup>-1</sup> par mg de protéines



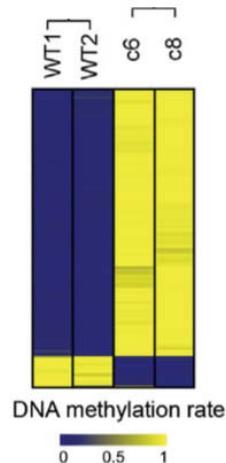
**Figure 2B.** Concentration intracellulaire de succinate et de fumarate dans des cellules de glandes médullosurrénales de souris sauvages (WT) ou de souris présentant une sous-unité SDH-B tronquée (*Sdhb*<sup>-/-</sup> c6 et c8).

**QII.B.11 :** Analyser les figures 2A et 2B pour caractériser l'activité enzymatique de la SDH des cellules de glandes médullosurrénales des souris *Sdhb*<sup>-/-</sup>

Réponse à la question QII. B.11

L'activité enzymatique de la SDH est fortement diminuée dans les deux lignées de cellules *Sdhb*<sup>-/-</sup> en présence de succinate (environ divisée par 10). Les enzymes de ces lignées sont moins sensibles à l'inhibition du malonate car elles conservent une activité enzymatique contrairement à la lignée WT. Ces résultats sont cohérents avec la figure 2B qui indique une accumulation de succinate, substrat de l'enzyme, et une diminution de la concentration de fumarate, produit de l'enzyme dans les cellules *Sdhb*<sup>-/-</sup>

Le degré de méthylation des 500 sites les plus dissemblables entre deux lignées de cellules WT (WT1 et WT2) et deux lignées de cellules présentant une sous-unité SDH-B tronquée (*Sdhb* -/- c6 et c8) localisées dans des îlots CpG sont représentés sur la **figure 3**.



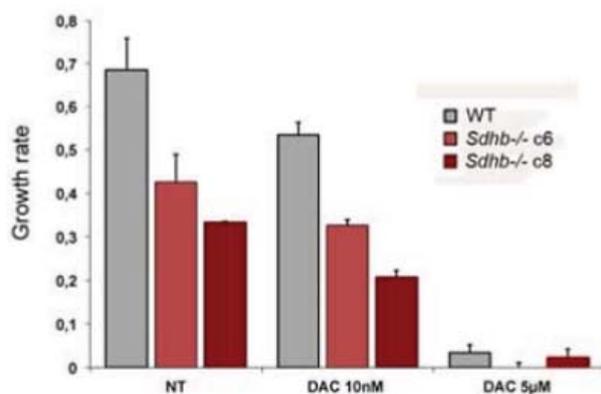
**Figure 3.** Profil de méthylation de 500 sites les plus dissemblables du génome de 2 lignées de cellules de glandes médullosurrénales de souris WT (WT1 et WT2) ou de souris *Sdhb* -/- (c6 et c8).

**QII.B.12 :** Analyser la figure 3. D'après les résultats de la figure 1, à quelle catégorie de cellule appartiendraient les lignées c6 et c8 ?

Réponse à la question QII. B.12

Sur les 500 sites, environ 90% ont des taux de méthylation proche de 1 chez les lignées *Sdhb* -/- qui ne le sont pas chez les WT et inversement, 10% des sites avec un fort taux de méthylation chez les WT ne le sont pas chez les *Sdhb* -/-. Ainsi, la mutation de la SDH-B a un effet hyperméthylateur. D'après la figure 1, les lignées c6 et c8 appartiendraient à la catégorie M1.

Le taux de division des cellules des lignées WT ou des deux lignées de cellules présentant une sous-unité SDH-B tronquée (*Sdhb* -/- c6 et c8) est déterminé par cytométrie en flux en présence ou en absence de decitabine. La decitabine est un médicament utilisé comme anticancéreux pour lutter contre certaines leucémies. Elle possède notamment une action inhibitrice des méthyltransférases. Les résultats sont présentés sur la **figure 4**.



**Figure 4.** Taux de division des cellules de glandes médullosurrénales de souris sauvages (WT) ou de souris présentant une sous-unité SDH-B tronquée (*Sdhb* -/- c6 et c8), en absence (NT) ou en présence de decitabine (DAC). Growth rate = nombre de division par cellule et par jour.

**QII.B.13 :** Analyser la figures 4 pour caractériser le phénotype cellulaire des lignées mutantes et l'effet de la decitabine.

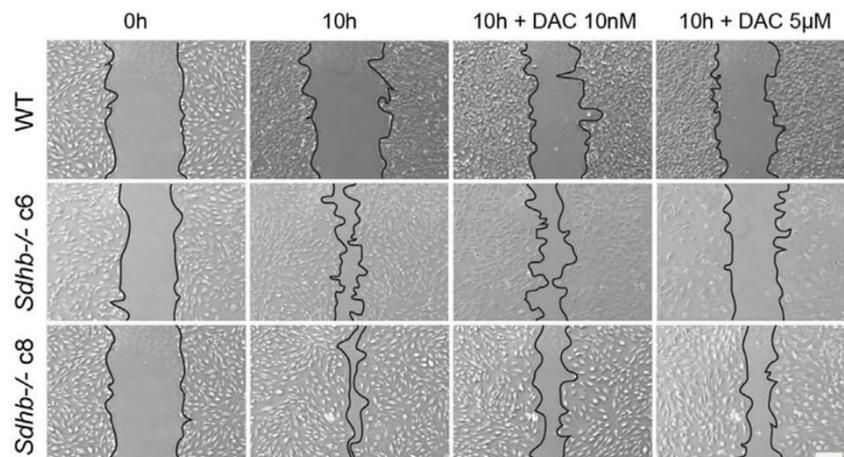
Réponse à la question QII. B.13

En absence de DAC, les cellules des lignées *Sdhb* <sup>-/-</sup> ont un taux de division environ 2 fois plus faible que celles de la lignée WT.

Le DAC à 10nM inhibe les divisions cellulaires chez les 3 lignées, d'environ 10%.

Le DAC à 5µM inhibe presque totalement les divisions cellulaires chez les 3 lignées.

Les cellules de glandes médullosurrénales de souris sauvages (WT) ou de souris présentant une sous-unité SDH-B tronquée (*Sdhb* <sup>-/-</sup> c6 et c8) sont mises en culture pendant 72h jusqu'à ce qu'elles forment un tapis cellulaire homogène. Les cellules sont mécaniquement retirées de la zone centrale de la boîte puis la culture est laissée pendant 10h avec un milieu standard ou avec ajout de decitabine. **Vous disposez de cette photographie représentative des résultats sur le bureau dans le dossier « TP A ». Barre d'échelle 100 µm.**



**QII.B.14 :** En utilisant le logiciel Mesurim, déterminer dans chaque condition la surface inoccupée par les cellules puis en utilisant un tableur, déterminer l'indice de fermeture pour chaque condition en utilisant la formule suivante. **Enregistrer votre réponse dans le tableur.**

$$\text{Indice de fermeture} = 100 \times \frac{(\text{surface sans cellule à } t=0) - (\text{surface sans cellule à } t=10\text{h})}{(\text{surface sans cellule à } t=0)}$$

	surface inoccupée par les cellules (µm <sup>2</sup> )			
	0h	10h	10h + DAC 10nM	10h + DAC 5µM
WT	130600	125600	95540	104700
c6	97230	36760	54800	90740
c8	127000	22180	47830	51210

	indice de fermeture (%)		
	non traité	DAC 10nM	DAC 5µM
WT	3,8	26,8	19,8
c6	62,2	43,6	6,7
c8	82,5	62,3	59,7

**QII.B.15** : En considérant les valeurs de taux de division présentées à la figure 4, quel processus cellulaire est étudié dans cette expérience ?

Réponse à la question QII. B.15

D'après la figure 4 les lignées Sdhb -/- se divisent en moyenne une fois tous les deux jours et les cellules WT se divisent en moyenne 0,7 fois par jour. En 10h d'expérience, le processus étudié est donc principalement la migration cellulaire.

**QII.B.16** : Analyser les résultats de l'index de fermeture pour caractériser le phénotype cellulaire des lignées mutantes et l'effet de la decitabine. On considèrera les écarts de plus de 5% comme statistiquement significatif.

Réponse à la question QII. B.16

En absence de DAC, les cellules des WT n'ont quasiment pas colonisé la zone centrale contrairement aux lignées Sdhb -/- qui ont colonisées plus de deux tiers de la zone vide. La mutation de la SDH confère donc aux cellules un important phénotype migratoire.

La DAC augmente d'environ 20% l'indice de fermeture chez les WT, tandis qu'elle le diminue de façon drastique et dose dépendant chez la lignée c6. La diminution de l'indice de fermeture par la DAC est moins importante pour la lignée c8 et ne montre pas d'effet dose dépendant.

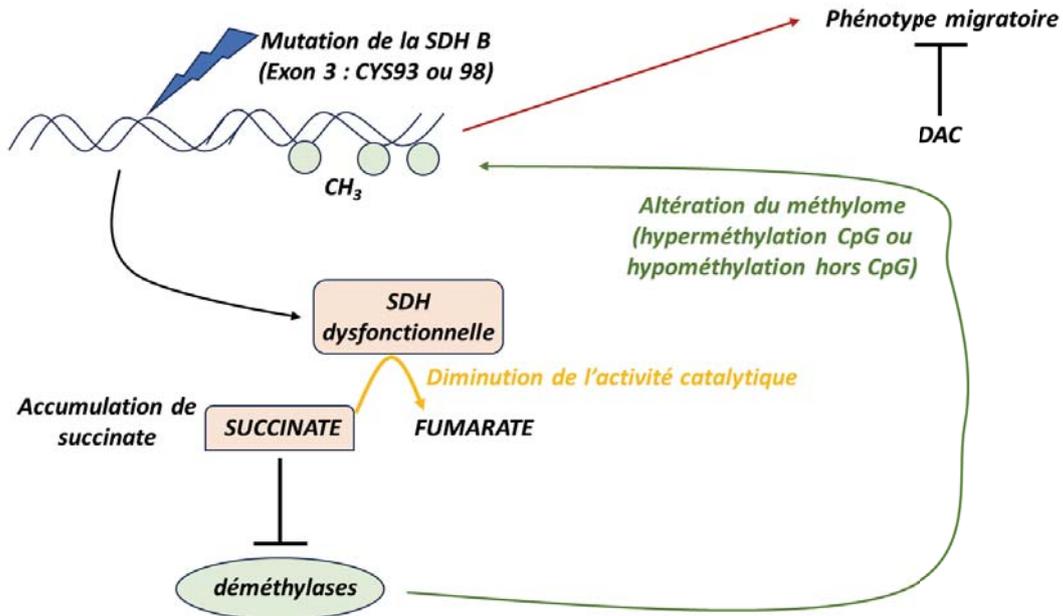
**QII.B.17** : En déduire pourquoi les tumeurs des phéochromocytomes sont considérées comme particulièrement invasives, pouvant être à l'origine de nombreuses métastases.

Réponse à la question QII. B.17

Ces tumeurs sont particulièrement invasives car leurs cellules ont une forte capacité de migration, propriété essentielle dans le processus de formation des métastases.

**QII.B.18** : En considérant que le succinate est un inhibiteur compétitif des enzymes de la famille des TET, des déméthylases de l'ADN, résumer les informations extraites de l'analyse des documents 1, 2, 3 et 4 dans un schéma bilan rendant compte des caractéristiques des cellules de phéochromocytomes et des liens entre les processus étudiés.

Réponse à la question QII. B.18



## 5.2 Epreuve de travaux pratiques de spécialité du secteur B : Sujet et commentaires

Les sujets de travaux pratiques étaient présentés sous la forme d'un livret qui était, pour partie à compléter. Des feuilles annexes supplémentaires ayant permis l'examen direct en salle, par les membres du jury, des travaux réalisés étaient à restituer avec la copie.

Le sujet de cette année : « Dégradation de litières forestières », permettait d'aborder différents aspects de la biologie du secteur B de l'agrégation externe SV-STU. La plupart des exercices faisaient appel à des techniques et des notions classiques dans les programmes du premier cycle de l'enseignement supérieur, ou des classes préparatoires.

La mise en pratique comme l'évaluation ont fait appel à différentes compétences :

- La qualité **des gestes techniques** permettant d'extraire, présenter ou colorer des échantillons à différentes échelles. Par exemple : coupes et coloration d'organes végétaux selon un protocole fourni ; extraction d'organes spécifiques chez un cloporte...

- Les qualités d'**initiative** associée au choix pertinent de la **présentation des résultats** lors de questions plus ouvertes comme l'exploitation de la « petite carotte de sol ».

Nous avons maintenu encore cette année la volonté de **valoriser les compétences pratiques intégrées à une démarche scientifique indispensable à l'enseignement en SVT**. Celles-ci peuvent être déclinées en :

- La mobilisation de connaissances naturalistes (reconnaissance et présentation des « fruits » et cônes collectés dans la litière, reconnaissances d'organismes de la microfaune à partir de vidéos)

- L'utilisation de clef de détermination (détermination des organismes de la faune du sol)

- L'application d'un protocole, la mise en forme de données brutes et l'analyse critique des résultats (mesure de résistance des feuilles)

- La capacité à mettre en lien des éléments biologiques avec des paramètres écologiques pouvant expliquer, en partie, leur présence dans un écosystème (Etude cartographique d'une station forestière)

- L'analyse des données expérimentales à l'aide d'un logiciel utilisé en recherche (analyse du comportement de cloporte en enceintes climatiques afin de mettre en évidence l'effet du changement climatique)

- La capacité à mener un raisonnement scientifique en mobilisant des connaissances du programme pour analyser des documents scientifiques (par exemple la construction d'un réseau trophique à partir de données isotopiques)

**L'ensemble témoignant de la capacité à rendre compte d'un mécanisme écologique** (la dégradation d'une litière forestière) **par une étude intégrant différentes échelles** : de l'échelle moléculaire (activités enzymatiques) à celle d'écosystème (estimation du temps de résidence du C dans une litière forestière).

Le jury regrette le grand nombre de questions non, peu ou mal traitées dans cette épreuve témoignant d'une difficulté à s'organiser et à gérer le temps pour un certain nombre de candidats. Une compréhension globale du sujet et des compétences à mettre en œuvre pour répondre aux différentes questions devrait permettre de mieux répartir le temps passé sur les différentes parties. Heureusement, des préparations, présentations et expérimentations de très bonne qualité ont été observées : elles ont alors fait l'objet d'une forte valorisation par le jury, de même que des raisonnements aboutis sur les documents plus théoriques proposés.

Le jury encourage les candidats à bien préparer cette épreuve souvent discriminante, il rappelle que la somme des coefficients des deux épreuves pratiques (5) est égale au coefficient de la leçon d'option.

Des éléments de corrections non exhaustifs (**en bleu**) ainsi que des remarques sur les productions des candidats (**en violet**) sont donnés dans le sujet ci-dessous.

Remarque : pour des raisons de pagination le sujet présenté ci-après qui inclue des éléments de correction ou des productions de candidats a été repaginé.

NOM : ..... PRENOM : .....

AGRÉGATION DE SCIENCES DE LA VIE - SCIENCES DE LA TERRE ET DE  
L'UNIVERS CONCOURS EXTERNE - ÉPREUVES D'ADMISSION - session 2025  
TRAVAUX PRATIQUES DE SPECIALITÉ DU SECTEUR B  
Durée totale : 6 heures

## « Dégradation de litières forestières »

Les forêts sont les biomes terrestres les plus répandus, couvrant environ 30% de la surface des continents. Environ 10% de la production primaire forestière est utilisée par les herbivores, alors que les 90% de la production restante participent à la formation de la litière, constituée majoritairement d'éléments d'origine végétale. La production de feuilles de litière dans les forêts peut représenter de 100 à 1400 g (poids sec) /m<sup>2</sup>/an. L'ensemble des transformations subies par cette abondante nécromasse constitue un processus fondamental, non seulement dans le fonctionnement des sols forestiers, mais aussi dans celui des écosystèmes forestiers dans leur globalité. Ce dossier comporte 41 pages : chaque grande partie est indépendante.

**Les réponses aux questions figureront dans les cadres ou espaces réservés à cet effet.**

**Plusieurs questions des parties I à III nécessitent des manipulations** et doivent, pour certaines, **être évaluées par un examinateur pendant l'épreuve** : prévoyez donc votre organisation en conséquence. **Dans le cadre de ces évaluations en cours d'épreuve, il ne vous sera pas possible de communiquer oralement avec l'examinateur.** Vous devez donc **présenter par écrit**, sur des feuilles mises à votre disposition, vos productions **puis appeler un examinateur**.

**Vous pouvez utiliser des feuilles de brouillon pour présenter ou compléter une présentation qui est évaluée pendant l'épreuve (dessin d'observation, tableau de légende de dissection...).** Les **annexes** sur lesquelles des présentations sont demandées doivent être rendues avec votre copie.

### Table des matières

Partie I – Etude d'éléments collectés en automne dans des litières forestières.....	3
I – Identification et interprétation biologique d'éléments collectés en automne dans différentes litières forestières .....	3
Partie II – Dégradation d'une litière monospécifique .....	6
II.A – A l'échelle de l'échantillon.....	6
II.B – A l'échelle de l'organe.....	8
II.C – A l'échelle des tissus .....	10
Partie III – Etude d'une station forestière.....	12
III.A – Caractérisation pédologique .....	13
III.B – Caractérisation écologique .....	15
Partie IV – Influence de la gestion forestière sur la dégradation microbienne de litières forestières .....	20
Partie V – Biodiversité des êtres vivants des litières forestières.....	24
V.A – Biodiversité microbienne .....	25
V.B – Biodiversité morphologique d'êtres vivants de litières forestières .....	27
V.C – Biodiversité de la mésofaune et de la macrofaune .....	28
V.D – Caractérisation d'un organisme de la macrofaune.....	30
Partie VI – Comparaison de deux types d'humus.....	34

VI.A – Identification de deux types d’humus .....	34
VI.B – Comparaison des communautés .....	35
VI.C–Comparaison des réseaux trophiques.....	38
VI.D–Comparaison de la dégradation de la litière.....	43

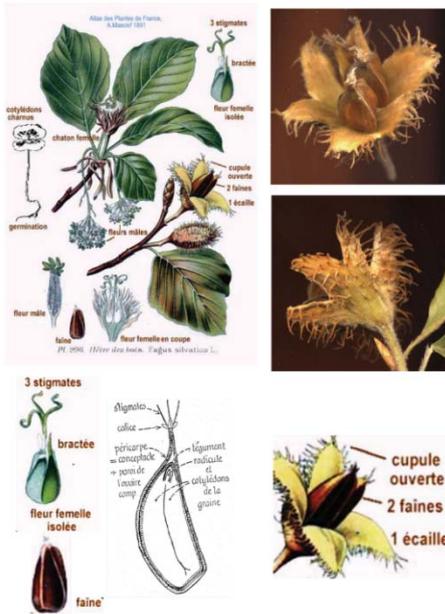
**AVANT DE REMETTRE VOTRE DOSSIER, VÉRIFIEZ QUE VOUS AVEZ BIEN INDIQUÉ VOS NOM, PRÉNOM ET NUMÉRO DE SALLE EN TÊTE DU DOCUMENT**  
**Vous devez rendre la totalité des feuilles du dossier ainsi que la totalité des annexes**

## **Partie I – Etude d’éléments collectés en automne dans des litières forestières**

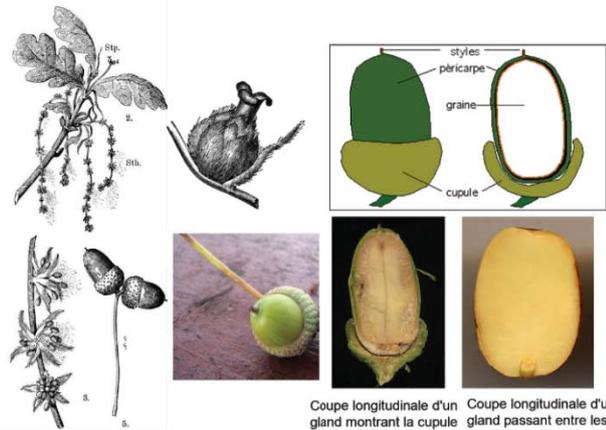
### **I – Identification et interprétation biologique d’éléments collectés en automne dans différentes litières forestières**

**I.1** Vous avez à disposition 5 échantillons, notés A, B, C, D et E, d’éléments récoltés dans différentes litières forestières. **Réaliser une analyse morpho-anatomique** la plus complète possible des échantillons et nommer les différentes structures identifiées. **Présenter et annoter votre travail sur votre paillasse et appeler un examinateur.**

La cupule résulte de la transformation de l'involucre (collerette d'écaïlles ou de bractées libres et compactes ou soudées ensemble à la base d'une inflorescence). Le rôle de la cupule est de tenir et protéger le fruit (akène) lors de sa période de croissance jusqu'à son arrivée à maturité. Les 3 espèces présentées présentant ces structures (cupulifères) sont des Fagacées.

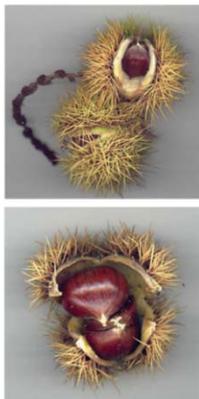
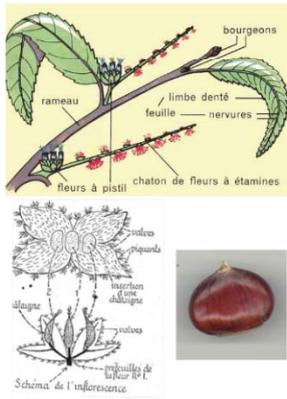


**Hêtre:**  
Cupule issue de la transformation de l'involucre recouvert de piquant s'ouvrant par 4 fentes et libérant généralement 2 akènes (les faines)



**Chêne pédonculé**

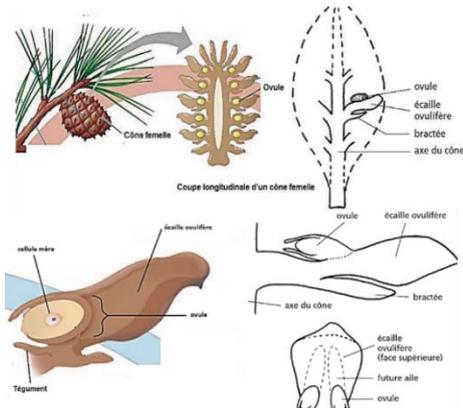
Les fleurs femelles portant 3 stigmates rouges et visqueux sont groupées par 1 à 4 fleurs à l'extrémité d'un long pédoncule de 3 à 10 cm, dressé vers le haut (caractéristique de l'espèce). Les glands sont souvent groupés par 3 (avec la présence possible de cupule avortée) sur un long pédoncule glabre. La cupule subhémisphérique, peu profonde, couvre de 1/4 à la moitié du gland, est munie d'écaïlles imbriquées triangulaires, espacées, peu nombreuses, très longuement soudées à la paroi de la cupule. Les glands, akènes ovoïdes de 1,5-4 cm sur 8-16 m), tronqués à la base sont glabres à apex légèrement déprimé et portant le reste des styles.



**Châtaignier**

-Les fleurs unisexuées mâles, très nombreuses, sont portées par des chatons dressés. Elles contiennent 8 à 15 étamines.

-Les fleurs unisexuées femelles, discrètes, sont groupées en inflorescences à la base de certains chatons mâles du haut des branches. Chaque inflorescence comporte 3 fleurs serrées dans un involucre. Chaque fleur est surmontée de (3) 6 styles indiquant que le pistil est composé de (3) 6 carpelles soudés contenant chacun 2 ovules. Une fois fécondées, les fleurs gonflent et se transforment en fruits secs indéhiscents (akènes) : les châtaignes. Chaque châtaigne reste coiffée des 6 styles disposés en plumet. La cupule grandit et forme de petites épines vertes et molles qui jaunissent se dessèchent et durcissent. La cupule forme une bogue qui se fend en 4 valves libérant généralement 3 châtaignes correspondant aux 3 fleurs de départ. Chaque châtaigne contient plusieurs graines recouvertes d'un tégument laineux, le tan, cloisonnant plus ou moins le fruit.



**Pin sylvestre**

Les cônes femelles sont de forme ovoïde à conique et font de 3 à 7 cm de long pour 2-3 cm de large. D'abord d'un vert intense, ils deviennent ensuite brun-rouge. Chaque écaïlle du cône porte 2 ovules à sa base. Une fois le cône mûr, les écaïlles s'écartent les unes des autres et libèrent des graines ovoïdes de 3 à 5 mm de longueur, chacune étant dotée d'une aile qui fait trois fois sa taille. Les cônes finissent par tomber.



**Epicéa commun**

Les cônes femelles initialement rouges et dressés deviennent pendants après la fécondation. Ils deviennent alors bruns et grandissent jusqu'à atteindre entre 10 et 18 cm de longueur en septembre ou octobre. Les écaïlles sont losangiques, peu épaisses mais coriaces, et la forme de leur extrémité varie selon les races (arrondies ou en double-pointe). À maturité, les écaïlles s'écartent pour laisser tomber les graines, mais ne se désarticulent pas. Le cône finit par tomber en hiver.

**I.2 Indiquer**, dans le tableau ci-après, **la position systématique** des organismes ayant produit ces échantillons.

Echantillon		Position systématique
		<p style="text-align: center;"> <span style="background-color: yellow;">Eucaryotes</span>  <span style="background-color: yellow;">Bicontes</span>  <span style="background-color: yellow;">Lignée verte</span>            Metabiontes            Chlorobiontes            Streptophytes            Phragmodesmophytes            Plasmodesmophytes  <span style="background-color: yellow;">Embryophytes</span>            Stomatophytes            Hemitracheophytes  <span style="background-color: yellow;">Tracheophytes</span>            Euphyllophytes  <span style="background-color: yellow;">Spermatophytes</span> </p>
<b>A</b>		<span style="background-color: yellow;">Fagus sylvatica</span> <i>Hêtre</i>
<b>B</b>	<span style="background-color: yellow;">Angiospermes</span> <span style="background-color: yellow;">Eudicotyledones</span> Rosidees Fabidees Fagales <span style="background-color: yellow;">Fagaceae</span>	<span style="background-color: yellow;">Castanea sativa</span> <i>Châtaignier</i>
<b>C</b>		<span style="background-color: yellow;">Quercus robur</span> <i>Chêne pédonculé</i>
<b>D</b>	<span style="background-color: yellow;">Gymnospermes</span> <span style="background-color: yellow;">Pinophytes</span>	<span style="background-color: yellow;">Pinus (sylvestris)</span> <i>Pin</i>
<b>E</b>	Pinales Pinaceae	<span style="background-color: yellow;">Picea abies</span> <i>Epicea</i>

Seuls les termes surlignés en jaunes étaient attendus. La citation pertinente d'autres taxon a été valorisée par l'attribution de points bonus. Des échantillons très communs, tels qu'une châtaigne, n'ont pas été reconnus pas un nombre non négligeable de candidats. L'emboîtement des taxons n'est pas maîtrisé par un trop grand nombre de candidats.

**La partie I a été partiellement ou totalement traitée par 87% des candidats présents.**

## Partie II – Dégradation d'une litière monospécifique

### II.A – A l'échelle de l'échantillon

Les photographies ci-dessous représentent une litière monospécifique observable *in situ* (en haut) et différents stades d'évolution des feuilles (en bas).



Feuille fraîche



Stade 1



Stade 2



Stade 3

D'après Montemagno, A., Hissler, C., Bense, V., Teuling, A. J., Ziebel, J., & Pfister, L. (2022). *Biogeosciences*, 19(13), 3111-3129.

#### **Document II - 1** : Changements temporels d'une litière monospécifique

**II.A.1 Expliquer le changement de coloration** observable entre les feuilles fraîches et le stade 1. **Proposer un protocole expérimental** permettant de le mettre en évidence et indiquer les résultats attendus.

**Changement de coloration des feuilles** À partir de septembre, les journées sont raccourcies, à tel point que les arbres ne reçoivent plus autant de lumière que précédemment. Ils ralentissent alors leur métabolisme et effectuent de moins en moins la photosynthèse. Progressivement, la chlorophylle qui colorait leurs feuilles est détruite, et laisse voir la couleur des carotènes (oranges) et des xanthophylles (jaunâtres). De plus, ils accumulent des tannins protégeant la feuille des excès de lumière (dont la chlorophylle ne les protège plus !) et des stress du froid automnal : les anthocyanes (rouges) et/ou les flavonoïdes (jaunes). Ces familles de pigments donnent aux arbres leurs couleurs chaudes ! À la mort de la feuille, les tannins s'oxydent et donnent la couleur brune des feuilles mortes (<https://www.mnhn.fr/fr/pourquoi-la-couleur-des-feuilles-change-t-elle-a-l-automne>)

Si la majorité des candidats cite la disparition de la chlorophylle, les autres pigments ne sont quasiment pas évoqués.

### **Protocole expérimental et résultat attendu**

Une chromatographie sur papier ou sur couche mince peut être réalisée sur des extraits pigmentaires de feuilles présentant différentes colorations (verte et brune au minimum).

La chromatographie permet une séparation des pigments en fonction de leurs propriétés : selon leur affinité relative pour un solvant mobile (l'éluant) et pour un support poreux, les molécules migrent avec l'éluant à des vitesses différentes. A l'issue de la migration, elles occupent différentes positions sur le support.

Sur l'exemple ci-dessous (Couche mince) on observe pour la feuille verte 1 au-dessus du dépôt initial deux tâches vertes correspondant à la chlorophylle b (vert jaune) et la chlorophylle a (vert bleu), une tâche jaune correspondant aux xanthophylles et en haut de la plaque une tache orangée correspondant aux carotènes.

Pour les feuilles de couleur jaune à brune on observe une disparition des chlorophylles et une persistance des pigments jaunes et orangés (xanthophylles et carotènes). L'intensité des tâches jaunes diminue lorsque les feuilles passent du jaune au brun.

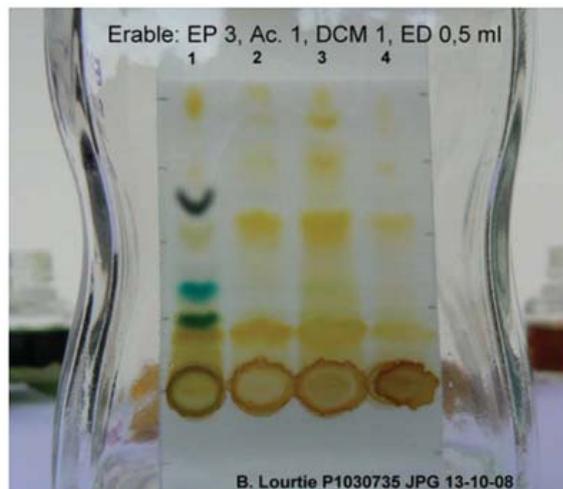


Photo 6. Chromatographie de 4 extraits de feuille d'automne

<https://le-changement-de-couleur-des-feuilles-en-automne-18.webself.net/developpement>

Quelques propositions fantaisistes (Berlèse, barcoding, etc.) et lorsque la chromatographie est évoquée son principe n'est pas clairement explicité par un grand nombre de candidats qui ne mentionne pas la nature du solvant et son rôle.

### **II.A.2 Caractériser les différents stades (stades 1, 2 et 3) d'évolution d'une litière monospécifique**

Stade 1 : les feuilles sont entières (non fragmentée) et de couleur brun clair. Ces feuilles forment la litière fraîche ou nouvelle (feuilles de l'année)

Stade 2 : les feuilles sont légèrement altérées, blanchies et ramollies, décolorées ou de couleur brun foncé. Ces feuilles forment la litière vieillie.

Stade 3 : les feuilles sont fragmentées partiellement décomposées et de couleur gris-noir). Elles forment la litière fragmentée

La réponse à cette question devait s'appuyer sur l'exploitation des documents et non sur une restitution plus ou moins pertinente de connaissances. Le jury rappelle qu'une lecture attentive des questions devrait permettre d'éviter ce type d'erreur.

## II.B – A l'échelle de l'organe

**II.B.1 Réaliser plusieurs coupes** transversales (partielles ou totales) de feuille fraîche de hêtre (échantillon 1 disponible sur votre paillasse) et les répartir en deux lots. Une ou plusieurs coupes du lot 1 seront montées entre lame et lamelle sans coloration (cf partie II.B.5), une ou plusieurs coupes du lot 2 seront colorées (cf. II.B.2)

**II.B.2 Réaliser une coloration** au carmino-vert d'une ou plusieurs coupes transversales du lot 2

### Protocole de coloration d'une coupe fine au carmino-vert d'iode

- Placer les coupes pendant 20 minutes dans l'hypochlorite de sodium (eau de Javel).
- Réaliser 2 bains dans de l'eau pendant 2 à 3 minutes.
- Placer les coupes 2 minutes dans l'acide acétique dilué.
- Colorer les coupes pendant 5 minutes dans le carmino-vert d'iode.
- Monter la coloration dans de l'eau entre lame et lamelle.



De nombreux candidats ont réalisé des préparations de très bonne qualité (exemple ci-dessus).

### II.B.3 Préciser l'intérêt d'une telle coloration

Cette coloration consiste en une coloration de la cellulose et de la lignine par le carmin vert d'iode : la cellulose est colorée en rouge et la lignine en vert.

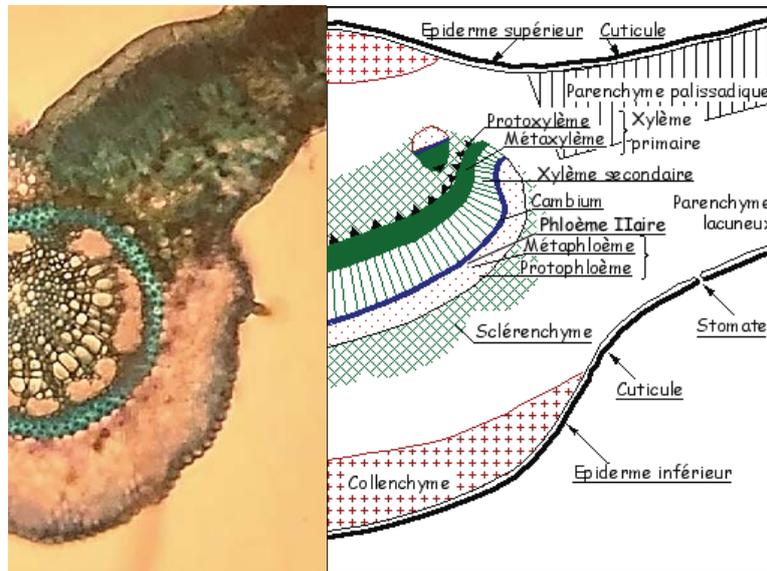
La coloration carmin-vert d'iode n'est pas une coloration spécifique de la lignine et de la cellulose, ces colorants ont seulement une affinité plus prononcée vis-à-vis de ces composés chimiques. Ainsi, en présence de seul carmin aluné tout est coloré en rouge, et réciproquement tout est coloré en vert par le vert d'iode : c'est l'association des deux colorants qui aboutit à une coloration différentielle des parois. Cette dernière constitue un caractère important pour l'identification des tissus.

*Fiche technique Protocole : Coloration au Carmin-Vert d'iode V. Garlatti - T. Bertin Université de Toulon*

La notion de coloration différentielle n'a pas été citée de même que son intérêt dans la diagnose histologique. Là encore, une lecture attentive de la question permettait d'élaborer une réponse pertinente.

**II.B.4 Schématiser (sur l'Annexe I)** une des coupes du lot 2 de votre choix en utilisant les figurés conventionnels.

Appeler un examinateur pour vérifier l'adéquation entre votre schéma et la préparation présentée



**Document II-2** : Coupe transversale de feuille de hêtre sénescence.  
BP : pigments bruns de nature polyphénolique

**II.B.5 Comparer l'une de vos coupes transversales de feuille fraîche (non colorée) et la coupe transversale de feuille sénescence** présentée dans le document II-2.

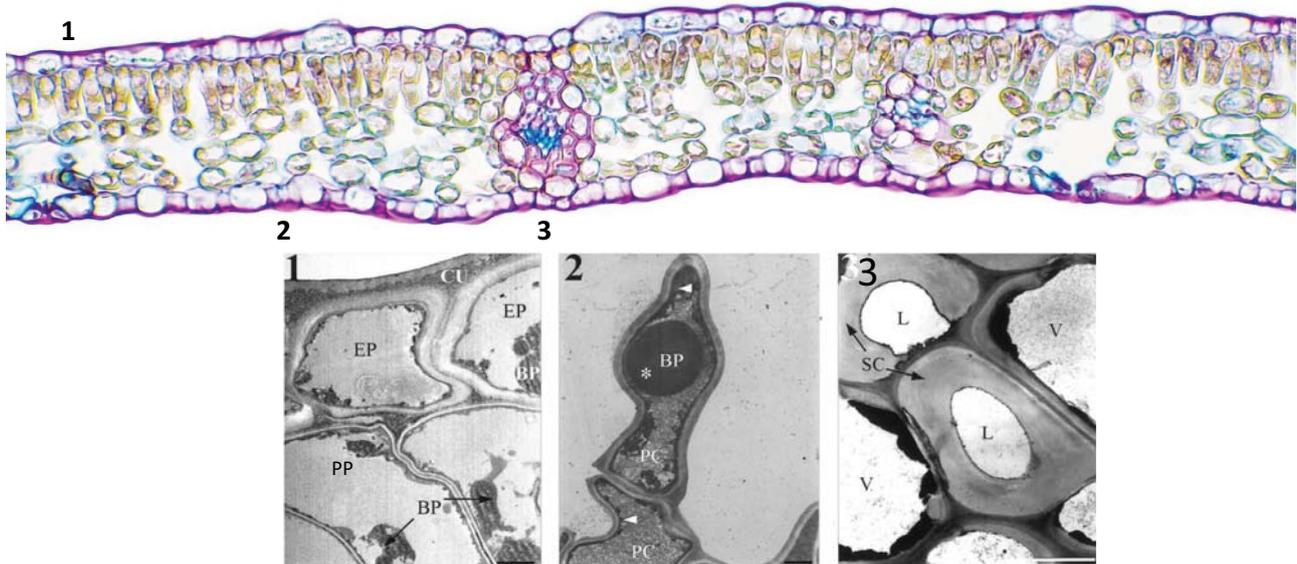
La morphologie foliaire est identique.

Dans la feuille sénescence on observe une dégradation tissulaire caractérisée par:

- la décoloration des tissus photosynthétiques par disparition de la chlorophylle. La coupe est globalement colorée par des pigments bruns (bien visible dans les parenchymes)
- l'accumulation de pigments bruns (BP) de nature polyphénoliques

Les candidats se sont surtout attachés à montrer les différences en omettant les points communs. Une présentation synthétique sous forme de tableau été valorisée.

## II.C – A l'échelle des tissus



**Document II-3** : Localisation de différents tissus (1,2,3) sur une coupe de feuille fraîche (haut) et MET de ces tissus dans des feuilles de hêtre sénescentes non dégradées stérilisées (bas).  
 V : vaisseau. Les pointes de flèches montrent la localisation des BP. Barre : 2 µm. D'après <http://www.nirgal.net> et Rihani, M. et al. (2001). *Eur J. Soil Biol*, 37, 75-84.

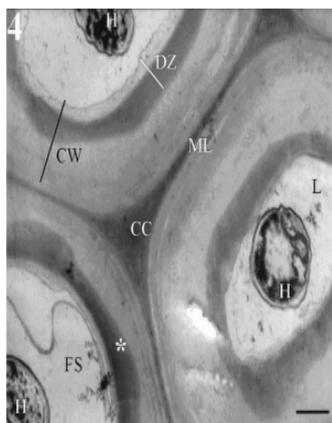
### II.C.1 Compléter les légendes

CU: Cuticule	PC: Parenchyme lacuneux
EP: Epiderme	SC: Sclérenchyme
PP: Parenchyme palissadique	L : Lumen ou lumière

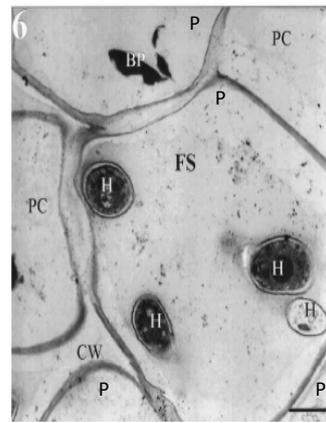
La question a été globalement bien réussie mais les copies reflètent une difficulté à mettre en relation les éléments localisés sur la coupe totale et les images en MET des tissus concernés.

Les documents suivants (Rihani, M. et al. (2001). *Eur J. Soil Biol*, 37, 75-84) permettent de caractériser l'activité de *Sporotrichum pulverulentum* (champignon de la pourriture blanche) sur différents tissus foliaires.

CW: paroi cellulaire



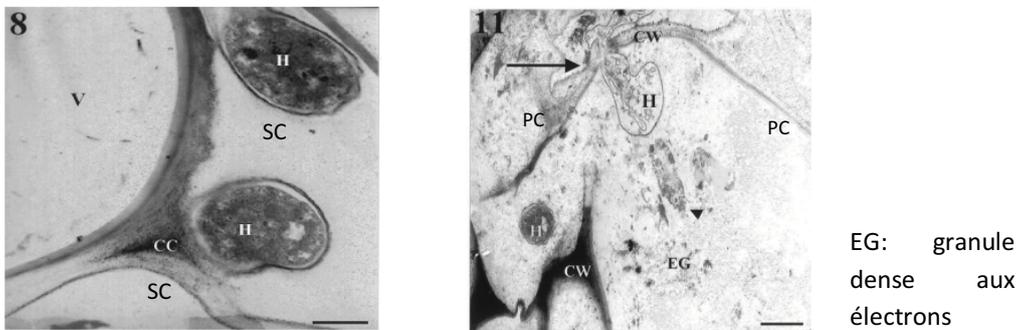
FS: gaine fongique



PC: cellule du

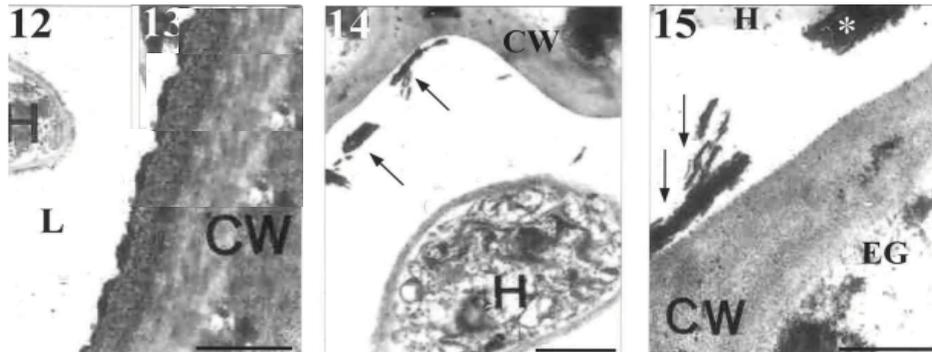
**Document II-4** : MET montrant l'aspect de stades précoces de la dégradation de deux types cellulaires par *Sporotrichum pulverulentum*

4: cellules du SC, \* : zone dégradée (barre 1µm) et 6: cellules du PC (barre 2µm)



**Document II-5** : MET montrant l'aspect de **stades avancés de la dégradation** de deux types cellulaires par *Sporotrichum pulverulentum*

8: cellules du SC entourant un vaisseau (barre 1.5 µm) et 11: cellules du PC (barre 2µm)



**Document II-6** : MET montrant la **localisation cytochimique** (pointe de flèche) du marquage de l'**activité cellulase** dans des feuilles colonisées par *Sporotrichum pulverulentum*

12: SC colonisé mais non dégradé (Barre 0.5 µm) 14 : SC colonisé et dégradé barre 1µm 15: *idem* (barre 0.5µm)

## II.C.2 Caractériser les différentes étapes de dégradation des tissus foliaires par *Sporotrichum pulverulentum* et préciser les modalités d'action de cet agent de la pourriture blanche

### **Stades précoces de la dégradation**

#### Sclérenchyme :

- Colonisation de la lumière des fibres par les hyphes
- Dégradation de la paroi secondaire au niveau de la face luminale

### **Stades avancés de la dégradation**

- Dégradation poussée de la paroi secondaire des cellules du sclérenchyme et des coins cellulaires
- Hyphes plaqués contre les parois secondaires

### **Modalité d'action**

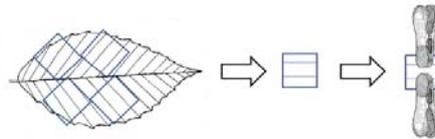
- Pas de marquage autour des hyphes dans le lumen
- Marquage au niveau de la paroi secondaire sur des débris cellulaires
- Marquage associé à une délamination de la paroi
- La distance entre les hyphes et le marquage suggère une diffusion des enzymes
- Les hyphes sécrètent des exoenzymes assurant la dégradation (de la lignine et) de la cellulose

#### Parenchyme lacuneux :

- Colonisation des cellules parenchymateuses par les hyphes
- Elargissement des cellules
- Raréfactons voire disparition des pigments bruns
- Désorganisation cellulaire du parenchyme par dégradation des parois cellulaires
- Colonisation fongique par les zones fragilisées des parois

Les candidats ont eu des difficultés à identifier (ou à expliciter) les différences entre les stades et entre les tissus. La notion d'exo-enzyme a régulièrement été mobilisée mais rarement argumentée à partir de l'analyse du document II-6.

**II.C.3 Comparer la résistance d'une feuille fraîche (échantillon 2), d'une feuille au stade 1 ayant subi un lessivage (échantillon 3) et d'une feuille au stade 2 collectée *in situ* (échantillon 4).** Découper dans chaque échantillon au moins un carré d'environ 1cm de côté en évitant la nervure principale (voir schéma ci-dessous). A l'horaire de passage au poste de mesure, positionner un carré de feuille entre les deux pinces en orientant les nervures parallèlement aux pinces et de manière à exercer, dans la mesure du possible, une traction uniquement sur le limbe des feuilles. Ajouter graduellement du sable dans le récipient jusqu'à la rupture du carré de feuille en deux parties. Déterminer la masse de sable ayant provoqué la rupture. Cette masse est proportionnelle à la résistance de la feuille.



#### **Résultats et interprétation critique**

##### Feuille fraîche :

-moyenne : 301,8  
-écart-type : 148,4  
-effectif : 42

##### Feuille stade 1 :

-moyenne : 287,1  
-écart-type : 206,5  
-effectif : 38

##### Feuille stade 2 :

-moyenne : 257,8  
-écart-type : 201,8  
-effectif : 29

En théorie la masse nécessaire à la rupture de feuilles : fraîche>stade1>stade2 du fait de la fragilisation des parois cellulaires par l'activité microbienne (fongique et bactérienne).

Problème de significativité de mesures ponctuelles qui pourrait être corrigé en multipliant les mesures.

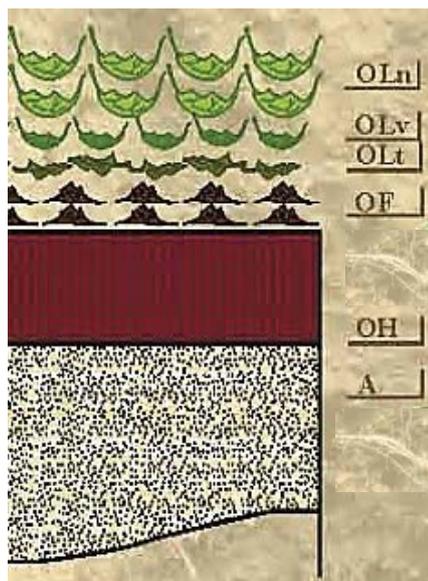
Peu de candidats ont effectué des répliques, les résultats ont rarement été présentés sous forme de tableau. Lorsque les candidats ont constaté un écart par rapport aux résultats attendus (diminution de la résistance en lien avec les observations précédentes sur la dégradation des parois c.f. partie II-C-2), ils ont eu des difficultés à formuler des conclusions critiques (nombre de feuilles testées, origine des feuilles, etc). Les moyennes des valeurs obtenues par l'ensemble des candidats sont rapportées dans le cadre ci-dessus (les écart-types sont très importants et les différences ne sont pas significatives).

**La partie II a été partiellement ou totalement traitée par 100% des candidats présents.**

# Partie III – Etude d’une station forestière

## III.A – Caractérisation pédologique

L’objectif de cet exercice est d’analyser les caractéristiques d’un sol au moyen d’observations et de manipulations réalisées sur l’échantillon 5 correspondant à une « petite carotte » de sol. La description d’un sol étant réalisée par couches horizontales présentant des caractéristiques homogènes appelés horizons **vous veillerez à exploiter de manière optimale cet échantillon.**



OL: (**L: Litière**) débris, essentiellement végétaux, reconnaissables à



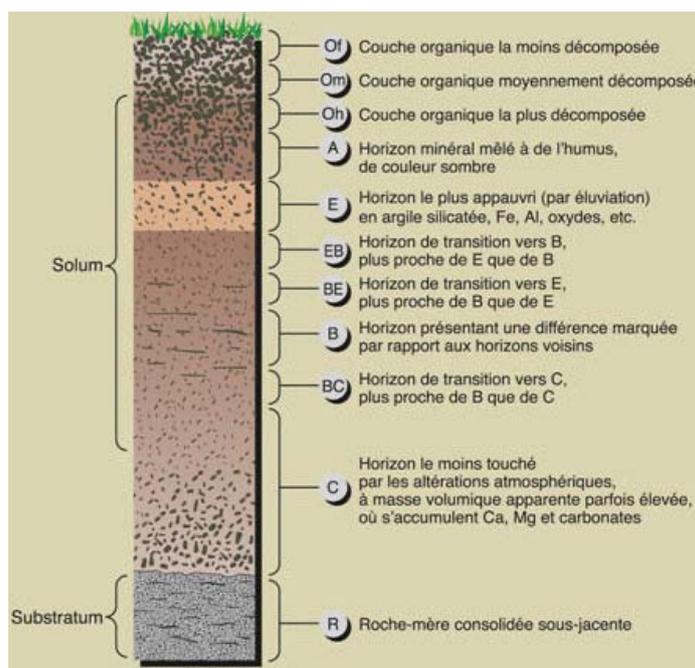
-(OLt): (**t: transition**) Débris fragmentés en petits morceaux libres entre eux

OF: (**F: fragmentation**) résidus végétaux fragmentés (les organes végétaux ne sont plus identifiables) en mélange avec de la matière organique fine (<70%) formant des boulettes millimétriques.

OH: (**H: humique**): horizon contenant plus de 70% de matière organique fine avec souvent beaucoup de petites racines (aspect de terreau, couleur marc de café avec peu d’éléments minéraux)

A: **horizon organo-minéral** dans lequel la matière organique provenant des horizons superficiels se mélange avec la matière minérale des horizons sous-jacents. La matière organique lui donne une coloration généralement plus sombre que ces derniers.

**Document III-1** : Nomenclature des horizons organiques et organo- minéraux constituant l’humus d’après [https://hautsdefrance-normandie.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpfold/434622\\_etude\\_des\\_sols\\_forestiers\\_1\\_1.pdf](https://hautsdefrance-normandie.cnpf.fr/sites/socle/files/cnpfold/434622_etude_des_sols_forestiers_1_1.pdf)



**Document III-2** : nomenclature des horizons d’un sol

d’après [https://unt.univ-cotedazur.fr/uoh/degisol/img/exemple\\_profil\\_podologique.jpg](https://unt.univ-cotedazur.fr/uoh/degisol/img/exemple_profil_podologique.jpg)

### Matériel à disposition

- Matériel optique : loupe et microscope optique
- Bandelette de papier millimétré
- Réactifs chimiques : acide chlorhydrique, eau distillée, bandelettes pH (gamme étalon cf. feuille annexe), bandelettes nitrates (gamme étalon cf. feuille annexe).
- Verrerie : tubes à essai, béchers, verres de montre ou boites de Petri

**III.A-1** À l'aide d'observations et de manipulations appropriées, **déterminer** les **caractéristiques** physiques, chimiques et biologiques de l'échantillon de sol. Expliquer sur **l'annexe II** votre démarche, les protocoles mis en œuvre et dégagez les arguments qui permettent de répondre à cette question. **Appelez un examinateur pour vérifier l'adéquation entre vos observations et les conclusions formulées.**



-OLn: (n: nouvelles) Feuilles ou aiguilles de l'année libres entre elles

-OLv: (v: vieilles) Feuilles de l'année passées, brunies, blanchies, ramollies et/ou en paquets

-(OLt): (t: transition) Débris fortement fragmentés en petits morceaux libres entre eux

**OF: (F: fragmentation)** résidus végétaux fragmentés (les organes végétaux ne sont plus identifiables) en mélange avec de la matière organique fine (<70%) formant des boulettes millimétriques.

**OH: (H: humique):** horizon contenant plus de 70% de matière organique fine avec souvent beaucoup de petites racines (aspect de terreau, couleur marc de café avec peu d'éléments minéraux)

**OA: horizon organo-minéral** dans lequel la matière organique provenant des horizons superficiels se mélange avec la matière minérale provenant des horizons plus sous-jacents. La matière organique lui donne une coloration généralement plus sombre que ces derniers.



OA: formant des boulettes millimétriques  
Suspension de l'horizon OA dans l'eau distillée:pH acide et faible teneur en nitrates

OA: Empreinte non apparente dans une boule d'échantillon humide: peu de limons

OA: Difficulté à former un boudin. Le boudin se rompt avant de pouvoir former un anneau (argiles <20%)

### III.A-2 Synthétiser vos observations sur un schéma de l'échantillon



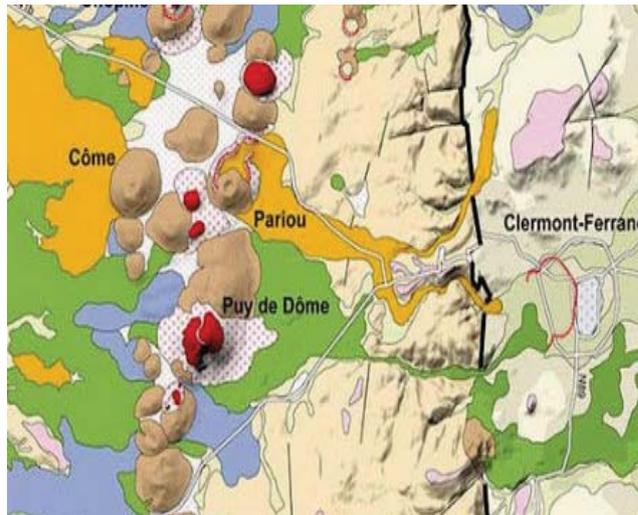
L'échantillon montre des séparations nettes entre les horizons avec **une litière très épaisse** (en particulier Olt et OF) et un **horizon H assez épais**. L'analyse macroscopique montre des traces visibles de débris végétaux indiquant **une litière mal décomposée** et une couleur noire indiquant la **présence importante de matière organique** (confirmé par la faible teneur en nitrates dans OA indiquant une faible minéralisation). Le pH est de l'ordre de 4-5. Il s'agit donc **d'un sol acide et pauvre** (avec un humus de type *mor* ou *moder acide*). L'échantillon a été prélevé sur une station d'altitude moyenne, aux conditions de température assez basses qui favorisent le développement des champignons au détriment de celui des bactéries. *Les champignons contribuent à l'acidité du milieu qui n'est pas tamponné car la roche mère est siliceuse.*

De trop nombreux candidats n'ont pas répondu à la consigne en produisant un texte paraphrasant les légendes des documents III-1 et III-2 alors qu'il était clairement demandé de produire un schéma synthétique. Ce dernier devait comporter un certain nombre de conclusions émises suite aux observations et manipulations réalisées. Les rares schémas réalisés sont restés trop peu informatifs.

### III.B – Caractérisation écologique

La station (photographie de gauche) dans laquelle a été prélevé l'échantillon de sol (Echantillon 5) est localisée (cercle rouge) sur la carte topographique IGN de la chaîne des puys au 1 : 25000. Elle est située à environ 1 Km à l'Est du sommet du Puy de Dôme.

La carte ci-dessous est une carte géologique simplifiée de la Chaîne des Puys (Illustration de A. Portal, d'après Boivin et al., 2017). La distance à vol d'oiseau entre le sommet du Puy de Dôme (altitude 1465m) et le centre du Maar de Clermont-Ferrand (altitude 386m) est d'environ 10 Km.



**III.B-1** Dire en quoi les **caractéristiques géologiques** de la station peuvent contribuer à expliquer l'une des caractéristiques du sol (échantillon 5) mise en évidence dans la partie III.

Les données cartographiques permettent de localiser le site de prélèvement sur une roche mère constituée de brèches trachytiques émises lors de l'éruption du puy de Dôme (Sommet du Puy de Dôme distant d'environ 10km du centre du Marr de Clermont Ferrand et échantillon prélevé à 1km à l'est du sommet)  
*Caractéristiques pétrologiques de la trachyte du Puy de Dôme (<https://www.geoforum.fr>) : Variété de trachyte à phénocristaux feldspathiques, oligoclase potassique + biotite, tridymite et cristobalite. Structure microlitique trachytique. Roche claire, grise, relativement friable. Les brèches constituent des produits meubles formées soit par des brèches d'écroulement ou des brèches de nuée ardente) lors de l'éruption péléenne de caractère cataclysmal.*  
 La roche mère plutôt siliceuse et ne tamponne pas l'acidité du sol résultant de la dégradation de la matière organique et de l'activité des microorganismes assurant sa décomposition.

Cette question a globalement été réussie par les candidats l'ayant traitée.

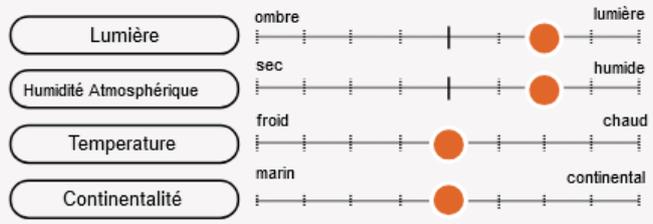
Sur l'extrait de carte de végétation de Clermont-Ferrand au 1 : 200000, (Œuvre collective CNRS) sont localisés la station étudiée (cercle rouge) et le sommet du Puy de Dôme (cercle noir)



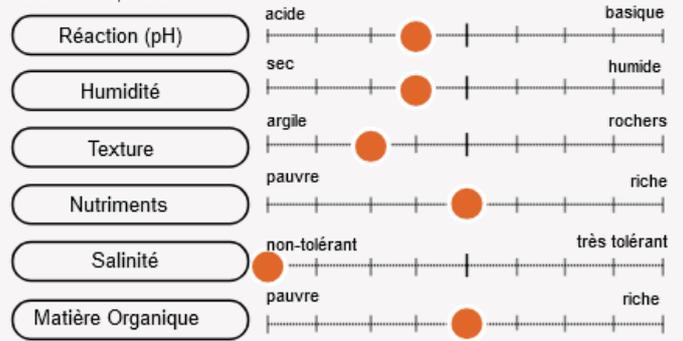
Les données écologiques concernant le Hêtre présentées ci-dessous proviennent de l'encyclopédie botanique collaborative Tela Botanica

**valence optimale du taxon**

caractéristiques climatiques



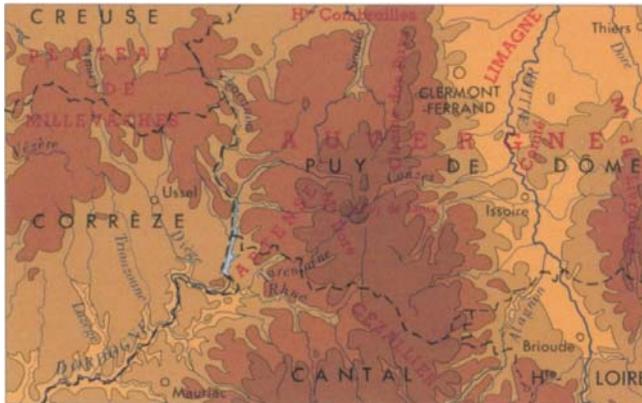
caractéristiques du sol



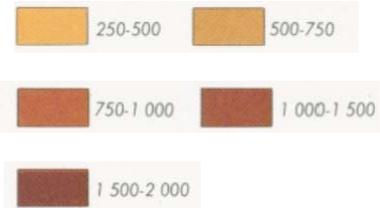
Lumière	1 : hypersciaphiles (10 lux) 2 : persciaphiles (50 lux) 3 : sciaphiles (100 lux) 4 : hémisciaphiles (1000 lux) 5 : hélioclines à sciaclines (5 000 lux) 6 : hémihéliophiles (10 000 lux) 7 : héliophiles (50 000 lux) 8 : perhéliophiles (75 000 lux) 9 : hyperhéliophiles (100 000 lux)
Humidité atmosphérique	1 : aéroxérophiles (10%) 2 : intermédiaires (20%) 3 : aéromésoxérophiles (30%) 4 : intermédiaires (40%) 5 : aéromésohydriques (50%) 6 : intermédiaires (60%) 7 : aéromésohygrophiles (70%) 8 : intermédiaires (80%) 9 : aérohydrophiles (90%)
Température	1 : alpines à nivales, altiméditerranéennes (T≈0°C) 2 : subalpines, oroméditerranéennes (T≈5°C) 3 : montagnardes (T≈7°C) 4 : collinéennes, planitiales psychrophiles (psychro-atlantiques, psychrocentro-européennes) (T≈9°C) 5 : planitiales à montagnardes (T≈7-10°C) 6 : planitiales thermophiles (thermo-atlantiques, thermocentro-européennes) et sub- à supraméditerranéennes (T≈12°C) 7 : euryméditerranéennes, méditerranéo-atlantiques (T≈13°C) 8 : mésoméditerranéennes (T≈15°C) 9 : thermoméditerranéennes à subdésertiques (inframéditerranéennes) (T≈18°C)
Continentalité	1 : marines à maritimes (AT≈8°C) 2 : hyperocéaniques (AT≈10°C) 3 : océaniques (AT≈17°C) 4 : subocéaniques (AT≈19°C) 5 : intermédiaires (AT≈21°C) 6 : précontinentales (AT≈23°C) 7 : subcontinentales (AT≈25°C) 8 : continentales (AT≈30°C) 9 : hypercontinentales (AT≈40°C)

Réaction (pH)	1 : hyperacidophiles (3,0<pH<4,0) 2 : peracidophiles (4,0<pH<4,5) 3 : acidophiles (4,5<pH<5,0) 4 : acidoclines (5,0<pH<5,5) 5 : neutroclines (5,5<pH<6,5) 6 : basoclines (6,5<pH<7,0) 7 : basophiles (7,0<pH<7,5) 8 : perbasophiles (7,5<pH<8,0) 9 : hyperbasophiles (8,0<pH<9,0)
Humidité	1 : hyperxérophiles (sclérophiles, ligneuses microphylls, réviscentes) 2 : perxérophiles (caulocrassulentes subaphylles, coussinets) 3 : xérophiles (velues, aiguillonnées, cuticule épaisse) 4 : mésoxérophiles 5 : mésohydriques (jamais inondé, feuilles malacophylles) 6 : mésohygroclines, mésohygrophiles 7 : hygrophiles (durée d'inondation en quelques semaines) 8 : hydrophiles (durée d'inondation en plusieurs mois) 9 : amphibies ou aquatiques
Texture	1 : argile 2 : intermédiaire 3 : limon 4 : sable fin 5 : sable grossier 6 : graviers 7 : galets, rocaillles 8 : blocs, dalles, replats rocheux 9 : fissures verticales des parois
Nutriments	1 : hyperoligotrophiles (≈100 µg N/l) 2 : peroligotrophiles (≈200 µg N/l) 3 : oligotrophiles (≈300 µg N/l) 4 : méso-oligotrophiles (≈400 µg N/l) 5 : mésotrophiles (≈500 µg N/l) 6 : méso-eutrophiles (≈750 µg N/l) 7 : eutrophiles (≈1000 µg N/l) 8 : pereutrophiles (≈1250 µg N/l) 9 : hypereutrophiles (≈1500 µg N/l)
Salinité	0 : ne supportant pas le sel 1 : hyperoligohalines, [0-0,1% Cl-] 2 : peroligohalines, [0,1-0,3% Cl-] 3 : oligohalines, [0,3-0,5% Cl-] 4 : meso-oligohalines, [0,5-0,7% Cl-] 5 : mesohalines, [0,7-0,9% Cl-] 6 : meso-euhalines, [0,9-1,2% Cl-] 7 : euhalines, [1,2-1,6% Cl-] 8 : polyhalines, [1,6-2,3% Cl-] 9 : hyperhalines, [2,3-3% Cl-]
Matière Organique	1 : lithosol, peyrosol, régosol 2 : mull carbonaté 3 : mull actif 4 : mull acide 5 : moder 6 : mor, hydromor, xéromor 7 : ranker, tangel 8 : anmoor, gyttja 9 : tourbe

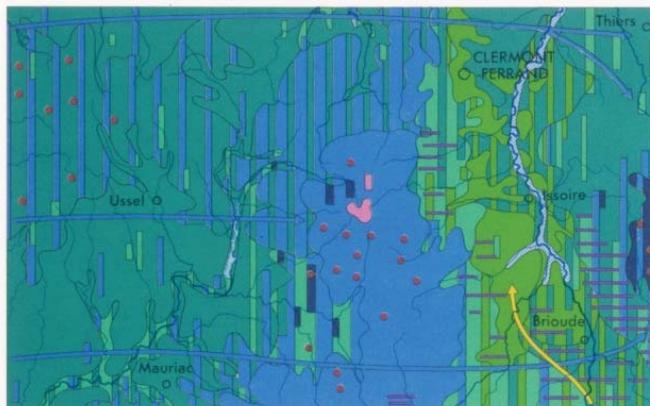
Les cartons suivants, à l'échelle 1 : 1 250 000, sont issus de la carte de végétation de Clermont-Ferrand (CNRS). L'isotherme 5°C à l'ouest de Clermont-Ferrand correspond au Puy de Dôme.



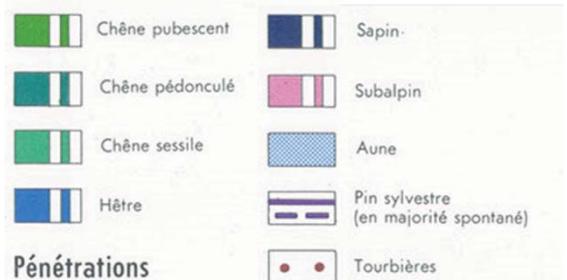
Altitude (m)



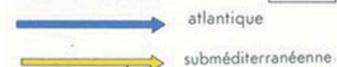
A. CARTON BOTANIQUE



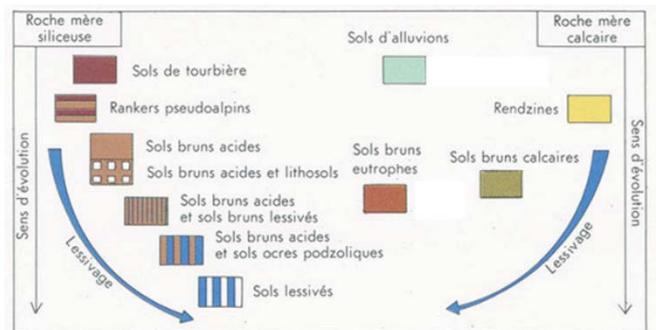
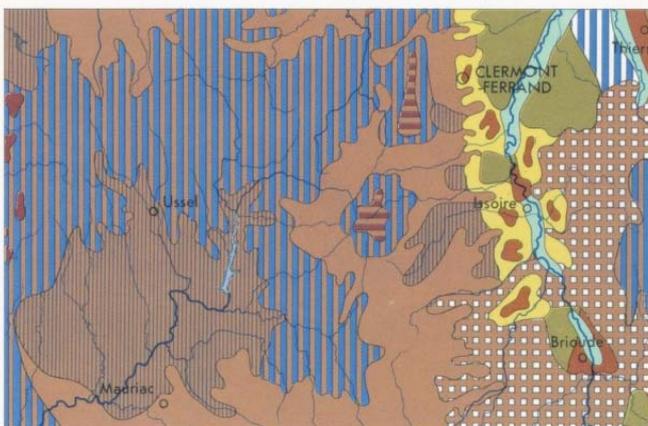
Etages de végétation



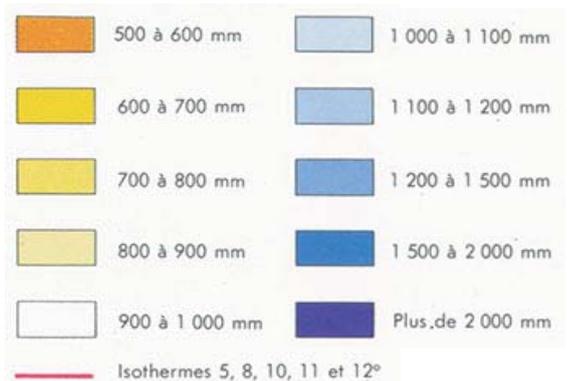
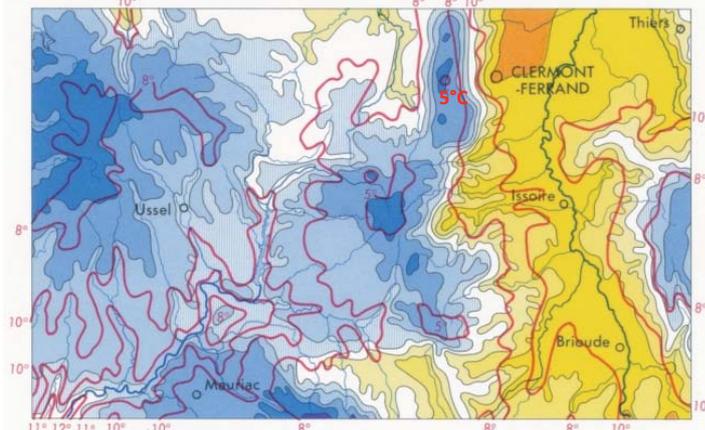
Pénétrations



B. CARTON ÉDAPHOLOGIQUE



E. CARTON PLUVIOTHERMIQUE



**III.B-2** En utilisant l'ensemble documentaire à votre disposition dans la partie III, **expliquer** en quoi les caractéristiques géographiques, géologiques et pédologique de la station peuvent contribuer à expliquer la présence de la hêtraie dans la station étudiée. L'argumentation devra s'appuyer sur une exploitation explicite des documents.

Les données cartographiques permettent de localiser le sommet du Puy de Dôme par l'isotherme 5°C sur le carton pluviométrique et de localiser approximativement le site de prélèvement sur tous les cartons (distance Puy de Dôme-Clermont-Ferrand environ 10km et site de prélèvement à 1km à l'Est du sommet).

On extrait donc les informations suivantes pour les caractéristiques géographiques et pédologiques du site

- altitude de 950m (carte topographique) plus précise de que carton de la carte de végétation sur lequel le site est localisé dans la classe altitudinale de 1000-1500m

- isotherme 8°C (5°C toléré)
- pluviométrie entre 1200 et 1500mm
- sol brun acide

Le carton botanique indique la série du hêtre et des influences atlantiques venues de l'Ouest et l'extrait de carte de végétation confirme la série du hêtre de l'étage montagnard sous forme de bois (hêtraie)

Les données écologiques de Tela botanica indiquent comme valence optimale pour le hêtre :

- 5 pour la température: planitiaires à montagnardes ( $T \approx 7-10^{\circ}\text{C}$ )
- 5 pour la continentalité : intermédiaire ( $AT \approx 21^{\circ}\text{C}$ )
- 4 pour le pH : acidocline ( $5 < \text{pH} < 5.5$ )
- 4 pour l'humidité : mésoxérophile
- 3 pour la texture : limon
- 5 pour les nutriments (mésotrophyle 500 $\mu\text{gN.L}$ )
- 0 pour la salinité : ne supportant pas le sel
- 5 pour l'humus : moder

Le site de prélèvement présente une majorité de caractéristiques écologiques abiotiques correspondant à la valence optimale pour le hêtre. La formation végétale sur le site correspond donc à la formation climacique de l'étage montagnard de la moyenne montagne auvergnate : la hêtraie.

Cette question a globalement été mal traitée par une majorité de candidats qui, au lieu de croiser les données cartographiques **de la station étudiée** avec les exigences écologiques du hêtre, a commenté la distribution de la hêtraie sur l'ensemble de la région couverte par la carte de végétation. Une caractérisation **précise et argumentée** des facteurs abiotiques au niveau de la station été attendue afin de confronter la végétation potentiellement observable à cet endroit avec la végétation effectivement observée. Ces candidats n'ont pas pu montrer qu'ils maîtrisaient les méthodes d'analyse cartographique attendues dans cet exercice alors qu'une plus lecture attentive de la question aurait pu permettre d'éviter ce genre d'erreur.

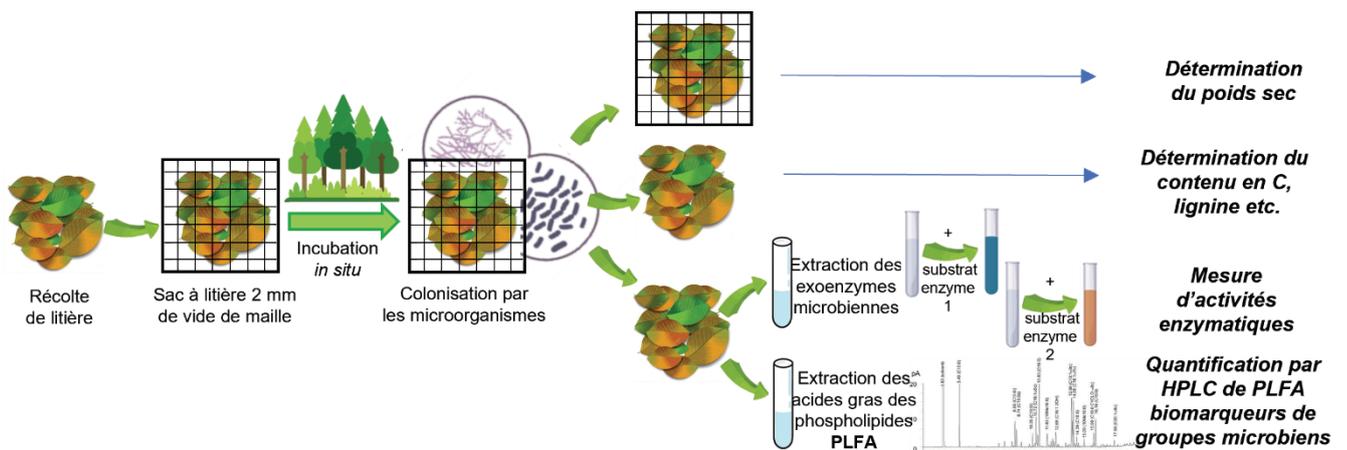
**La partie III a été partiellement ou totalement traitée par 100% des candidats présents.**

# Partie IV – Influence de la gestion forestière sur la dégradation microbienne de litières forestières

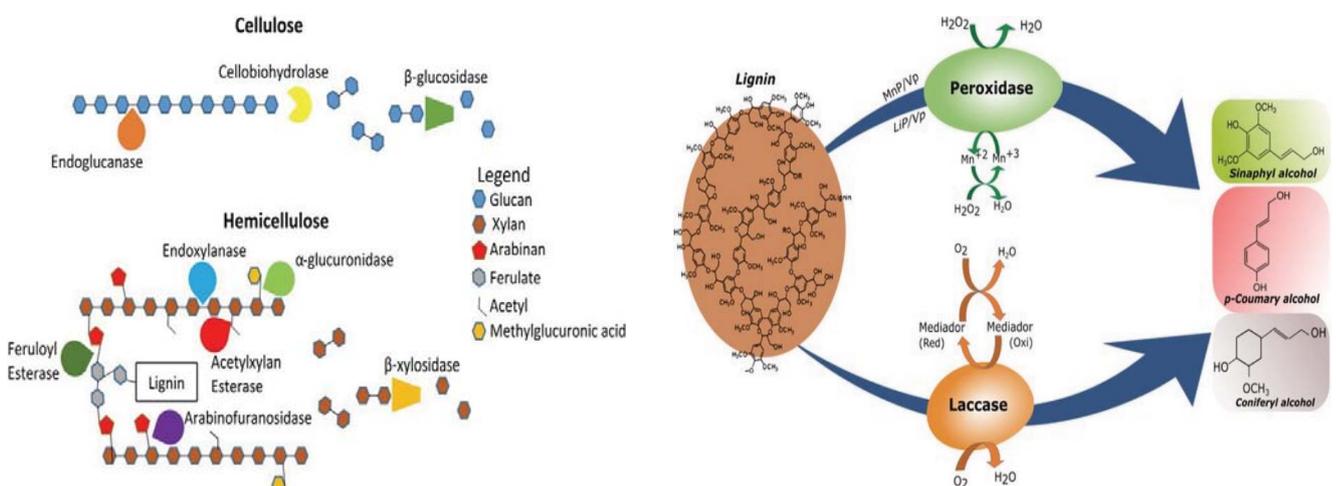
L'étude porte sur la dégradation microbienne de la litière de trois forêts allemandes localisées dans la même région (caractéristiques climatiques et pédologiques homogènes) mais gérées de manière différente (D'après *Purahong, W. et al. (2014) Scientific reports* et *Purahong, W et al. (2014). PloS one*).

- **BA**: une forêt équienne de hêtre européen (forêt semi-naturelle avec régénération naturelle, structure forestière composée d'arbres de même âge i. e. équienne)
- **BS** : une forêt de hêtres européens exploitée sélectivement (gestion forestière avec des coupes d'arbres sélectionnés, régénération naturelle, structure forestière in équienne)
- **BU**: réserve forestière de feuillus non gérée dominée par le hêtre européen (structure forestière in équienne)

Le protocole expérimental a consisté à collecter de la litière dans chacune de ces forêts, à la caractériser et à incuber *in situ*, dans chacune de ces forêts, des sacs à litière dont le vide de maille permet la colonisation des feuilles par des microorganismes. Le poids sec de litière, la qualité de la litière, l'activité de différentes enzymes microbiennes et la biomasse microbienne (estimée à l'aide d'acides gras des phospholipides ou PLFA marqueurs de différents groupes microbiens) ont été mesurés après 0, 89, 180, 284 et 473 jours d'incubation.



**Document IV-1** : Protocole expérimental



**Document IV-2** : Réactions catalysées par les enzymes étudiées

Forest management practice	Litter composition (%)		
	<i>Fagus sylvatica</i>	<i>Acer</i> sp.	<i>Fraxinus</i> sp.
Beech age-class forest (BA)	85	10	5
Beech selection cutting forest (BS)	90	10	0
Beech unmanaged forest (BU)	100	0	0

Nutrient	Age-class beech forest (BA)	Selection cutting beech forest (BS)	Unmanaged beech forest (BU)
Total C (%)	47.61±0.17	47.34±0.16	48.81±0.22
Total N (%)	0.97±0.01	1.04±0.00	0.84±0.03
C/N	48.92±0.20	45.52±0.15	58.38±2.18
Total lignin/N	43.13±0.25	39.74±0.00	56.27±1.90

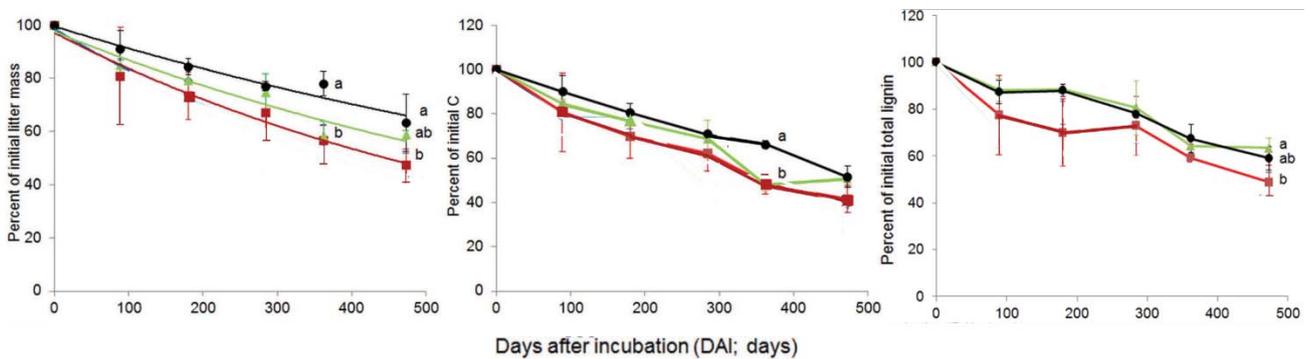
**Document IV-3** : Compositions spécifique et biochimique initiales des litières des forêts étudiées

#### IV-1 Comparer les litières des forêts BA, BS et BU

Le hêtre est très largement dominant dans ces trois litières mais on observe que le % de la litière d'autres espèces arborescentes (Erable et Frêne) est plus élevé dans les forêts gérées que dans la réserve forestière (BU). Les conditions édaphiques et climatiques étant comparable ces différences peuvent être attribuées au mode de gestion forestière.

Le contenu en C des trois litières est comparable mais la teneur en N des litières des forêts gérées (BA et BS) est supérieure à celle de la litière de la réserve forestière: le rapport C/N est donc supérieur dans cette dernière. Le rapport lignine totale/N est également supérieur dans la litière de BU.

Cette question a globalement été bien traitée.

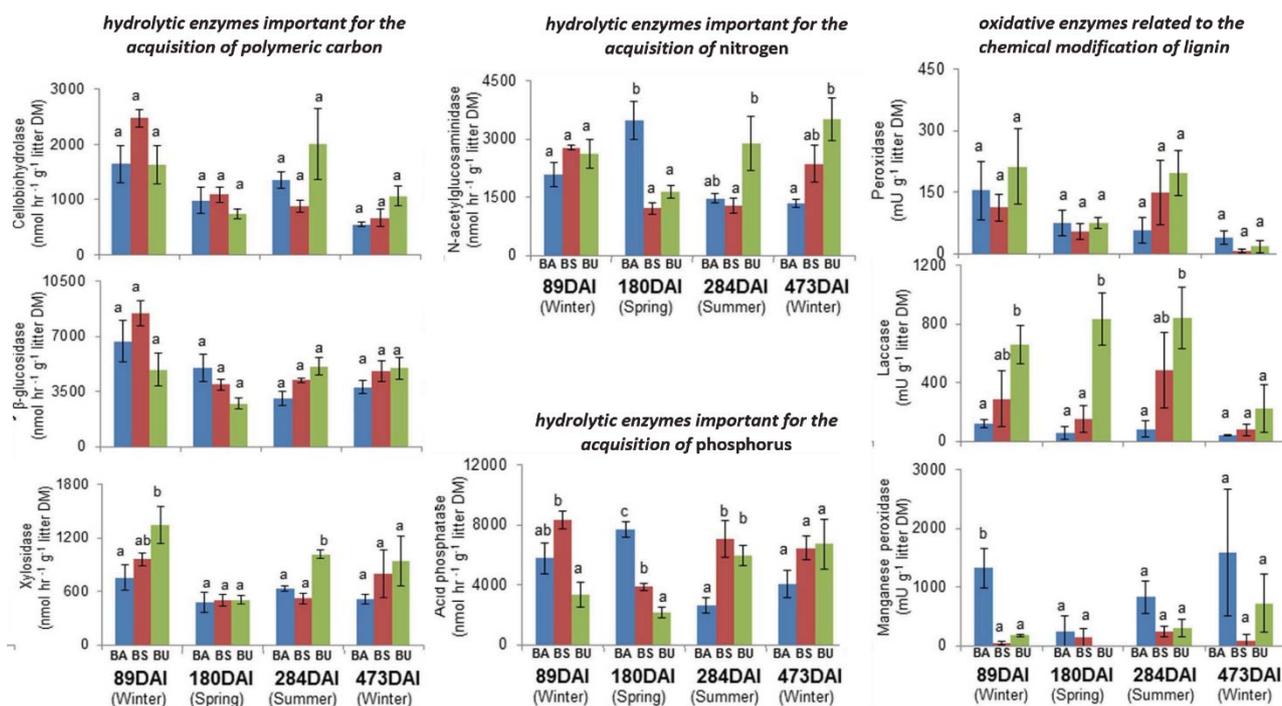


**Document IV-4** : Pourcentage de la masse initiale de litière, du contenu initial en C et en lignine au cours du temps sous différents modes de gestion forestière (rouge: BA, vert: BS et noir BU) . Des lettres différentes indiquent des différences significatives (P<0,05) entre les échantillons.

#### IV-2 Comparer l'évolution temporelle des litières de forêts différant par leur mode de gestion

Au bout de 473 jours, la litière de la forêt BU est moins dégradée (% de masse restante supérieure) que celle de la forêts BA. Si le % restant de C initial est comparable dans les trois forêts le % restant de lignine initial est supérieur dans les forêts dont la gestion est plus limitée (BS et BU) que dans la forêt gérée (BA). La dégradation de la litière est donc globalement plus importante dans la forêt la plus affectée par la gestion que dans les deux autres forêts semi-naturelles. Cela est probablement due à la qualité de la litière composée d'un mélange de feuilles de 3 différentes espèces dans BS et monospécifique riche en lignine dans BU.

La significativité des résultats a rarement été prise en compte et très peu de candidats ont relié la dégradation de la litière avec la qualité de cette dernière (question IV-1).



**Document IV-5 :** Activités enzymatiques (moyenne  $\pm$  SE) dans les échantillons de litière des forêts BA (bleu), BS (rouge) et BU (vert) à quatre dates d'échantillonnage (DAI: jours après le début de l'incubation). Des lettres différentes indiquent des différences significatives ( $P < 0,05$ ) entre les échantillons.

### IV-3 Analyser les résultats obtenus pour les différentes activités enzymatiques

Les activités cellobiohydrolases et  $\beta$ -glucosidases (dégradant la cellulose) et peroxydases ne présentent aucune différence significative au cours du temps pour les différentes forêts.

L'activité xyloxydase (dégradation des hémicellulose) est supérieure pour BU au 89<sup>ème</sup> (hiver 1) et 284<sup>ème</sup> (été) jours d'incubation

L'activité N-acétylglucosaminidase est supérieure pour BA le 180<sup>ème</sup> jour et supérieure pour BU les derniers jours d'incubation (284 :été et 473j : hiver 2)

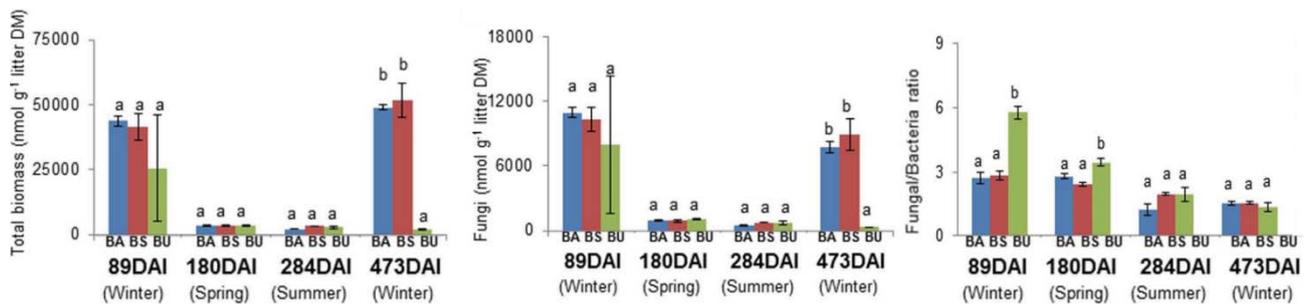
L'activité phosphatase acide est supérieure pour BA le 180<sup>ème</sup> jour (printemps) et pour BS et BU le 284<sup>ème</sup> jour (été)

L'activité laccase (dégradation de la lignine) est supérieure pour BU jusqu'au 284<sup>ème</sup> jour (toute l'année 1)

Activité Mn peroxydase (dégradation de la lignine) est supérieure pour BA le 89<sup>ème</sup> jour d'incubation (hiver)

Les activités enzymatiques ne présentent ni évolution temporelle très marquée ni d'effet très significatif du mode de gestion forestière.

La significativité des résultats ayant rarement été prise en compte, les candidats n'ont pas réussi à regrouper explicitement des activités enzymatiques montrant des distributions comparables (sans différence significative). Les analyses englobant plusieurs activités enzymatiques présentant des variations significatives ont souvent rendu les réponses confuses. Très peu de candidats ont identifié une évolution temporelle peu marquée des activités enzymatiques.



**Document IV-6 :** Biomasse microbienne totale et biomasse fongique estimées par quantification de PFLA biomarqueurs et rapport entre biomasse fongique/ biomasse bactérienne (mean ± SE) dans les forêts BA (bleu), BS (rouge) et BU (vert) Des lettres différentes indiquent des différences significatives (P<0,05) entre les échantillons.

#### IV-4 Comparer l'évolution temporelle des /biomasses microbiennes dans les litières de forêts dont la gestion est différente

Les biomasses microbiennes et fongiques montrent une nette évolution saisonnière dans les trois litières. Ces biomasses sont maximales en hiver et très faibles au printemps et en été. Les biomasses ne sont pas différentes significativement entre les litières à l'exception de celles, très faibles, mesurées dans la forêt non gérée (BU) lors du second hiver (jour 473). Les rapports Fungi/Bacteria diminuent au cours du temps dans les trois litières traduisant un changement des communautés microbiennes entre les étapes précoces (hiver et printemps de la première année) et tardives (été et hiver de la seconde année) de la dégradation de la litière. La litière de la forêt non gérée (BU) a, dans les stades précoces, un rapport fungi/bactérie supérieur à celle des forêts BA et BS (peut être en lien avec la qualité biochimique de cette litière plus riche en lignine que les deux autres).

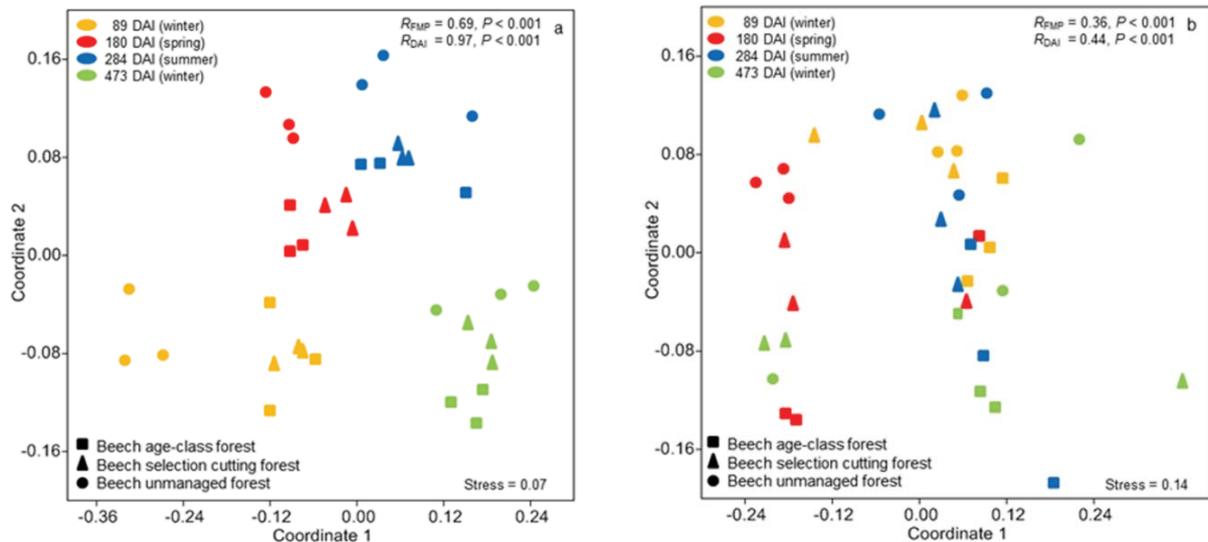
La variation saisonnière des biomasses microbiennes a généralement bien été identifiée. Cependant, peu de candidats ont mis en évidence un changement des communautés microbiennes entre périodes précoces (jours 89 et 180) et tardives (jours 284-473) de dégradation des litières.

#### IV-5 Conclure sur l'influence de la gestion forestière sur la dégradation des litières forestières

La gestion forestière a une influence sur la diversité forestière et la composition qualitative des litières (la forêt équienne (BA) et la forêt gérée de manière sélective (BS) ont une litière mixte contrairement à la réserve forestière monospécifique (BU). Cette dernière à un rapport C/N élevé et est plus riche en lignine (rapport lignine/N) : elle est globalement moins rapidement dégradée que les deux autres litières. La gestion forestière ne semble pas avoir d'impact significatif sur les activités des enzymes responsables de la dégradation des litières mais semble affecter la composition microbienne qui est enrichie en champignon pendant les phases précoces de dégradation de la litière dans la réserve non gérée (BU). La gestion forestière semble augmenter le taux de décomposition de la litière (accélérer le recyclage des éléments).

Les candidats ayant obtenu la meilleure note à cette question sont ceux qui ont utilisé les conclusions formulées aux quatre questions précédentes pour répondre à celle-ci. Certains candidats ont toutefois tiré une conclusion contraire à ce qu'ils avaient démontré dans les questions précédentes. Cela est probablement dû au fait que la conclusion à laquelle il s'attendait (une dégradation plus rapide de la litière forestière dans la forêt la moins impactée par la gestion forestière) est **infirmée** par les résultats expérimentaux.

Un traitement statistique permettant de représenter dans l'espace la similarité entre des objets (NMDS) a été appliqué aux échantillons (les objets similaires étant les plus proches). La qualité de l'ajustement de la distance entre objets dans l'espace est mesurée par la valeur du stress (plus celle-ci est faible plus la représentation est exacte).



**Document IV-7** : NMDS de (a, à gauche) la structure de la communauté microbienne et (b, à droite) des activités de 8 enzymes. La structure de la communauté microbienne est estimée à l'aide des PFLA marqueurs permettant de quantifier les champignons et 4 groupes bactériens : Actinomycètes, bactéries anaérobies, bactéries Gram+ et Gram-. R indique le degré de séparation entre les groupes (R = 0, groupes pas différents ; R = 1, groupes complètement différents). Les indices FMP et DAI indiquent respectivement le type de gestion du système forestier et les jours après le début de l'incubation.

**IV-6 Comparer** les résultats obtenus pour la structure de la communauté microbienne et les activités enzymatiques microbiennes et **formuler une conclusion** relative aux liens existant entre la structure et la fonction de la communauté microbienne étudiées au cours de ce travail.

L'analyse MDS montre un patron très net de regroupement des prélèvements en fonction de la durée d'incubation (4 groupes nettement séparés) traduisant une évolution temporelle de la structure des communautés bactériennes au cours de la dégradation des litières. Dans chacun de ces 4 groupes on constate une séparation des communautés microbiennes de la litière de la forêt non gérée (BU cercle) et celles des forêts gérées (BA carré et BS triangles) traduisant un effet de la gestion forestière sur la composition de la communauté microbienne.

Ce patron n'est pas observé pour les activités enzymatiques pour lesquelles aucun regroupement en fonction de la durée ou de la gestion forestière n'est observable (activités enzymatiques comparables pour des échantillons de différentes litières et/ou après différentes durées d'incubation).

La structure des communautés microbiennes ne détermine ses fonctions de dégradation des litières probablement du fait de la redondance fonctionnelle de différents groupes bactériens et fongiques.

Peu de candidats ont analysé ce document. Lorsqu'elle a été faite, l'analyse est restée très confuse. Rares sont les candidats qui ont réussi à mobiliser la notion de redondance fonctionnelle applicable aux micro-organismes dans le contexte de dégradation des litières forestières étudié ici.

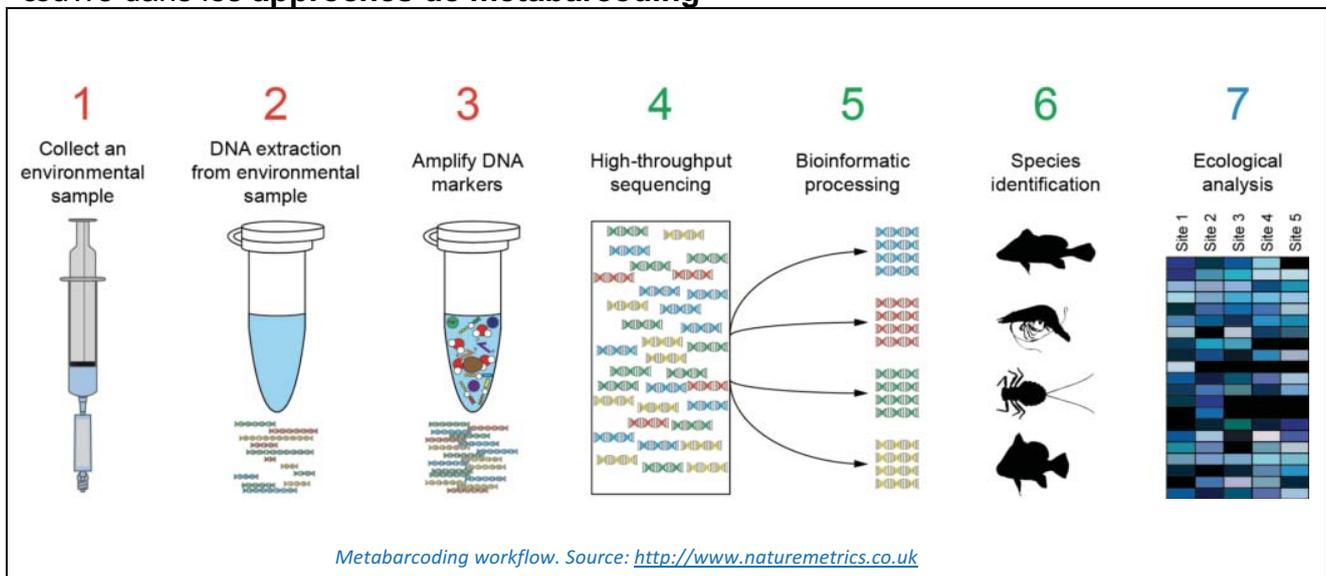
**La partie IV a été partiellement ou totalement traitée par 92% des candidats présents mais 30% de ces candidats ont obtenus une note assez faible.**

# Partie V – Biodiversité des êtres vivants des litières forestières

## V.A – Biodiversité microbienne

Lors d'une étude menée sur la litière d'une réserve forestière de feuillus dominée par le hêtre européen (Répartition inégale des âges, âge des arbres jusqu'à >100 ans, recouvrement par des arbres > 10 m = 85 %), les microorganismes ont été suivis au cours d'une incubation de sacs à litières *in situ* (document IV-1) à l'aide d'une approche de metabarcoding. (D'après Purahong, et al. (2016) *Molecular ecology*, 25(16), 4059-4074).

**V-A.1 Rappeler** brièvement, sous la forme de votre choix, les **différentes étapes** mise en œuvre dans les **approches de metabarcoding**



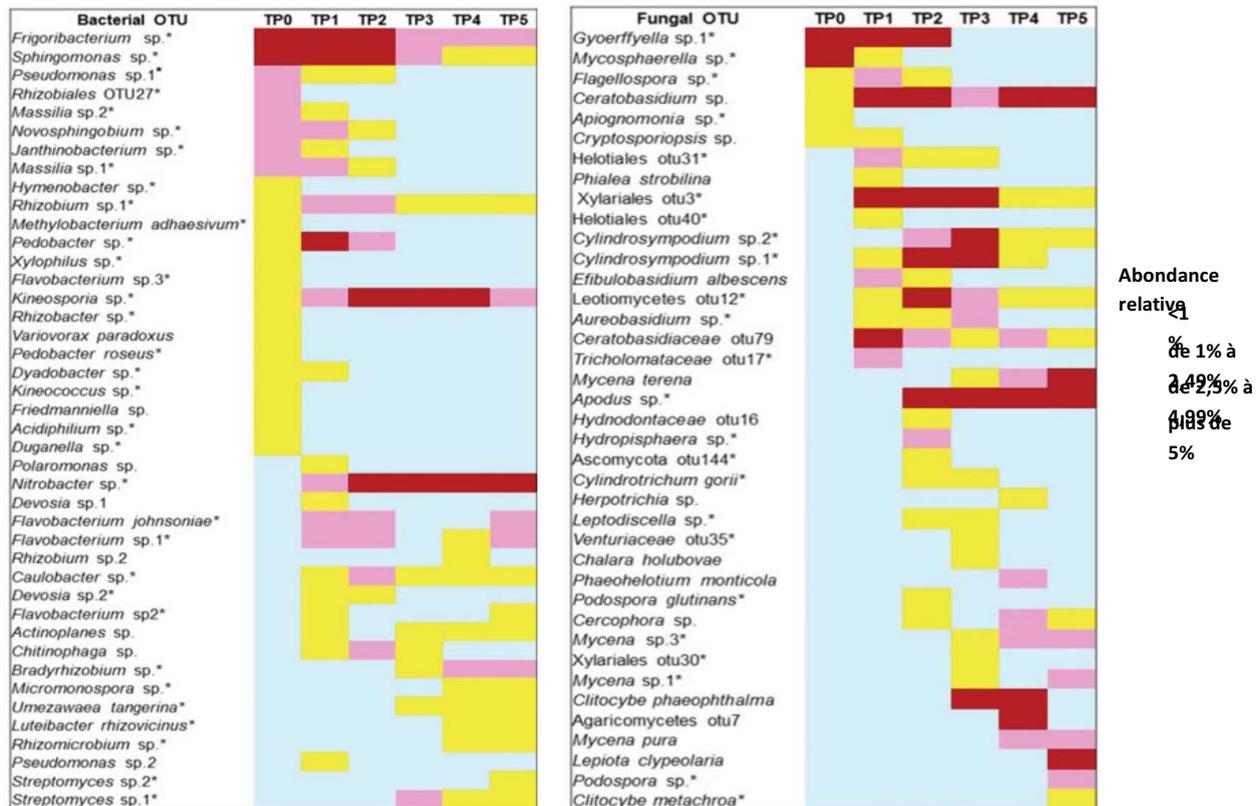
Si l'approche de metabarcoding semble connue, les différents étapes permettant d'obtenir ce type de résultats le sont rarement ou le sont très partiellement.

Au total, 86 609 et 85 979 lectures de qualité satisfaisante ont été obtenues. Après le retrait de séquences chimériques, elles ont été regroupées en 3346 OTU bactériennes et 771 OTU fongiques. La suppression des OTU de faible abondance (c'est-à-dire des singletons aux tripletons) aboutit à un jeu de données contenant 908 OTU bactériennes et 225 OTU fongiques.

### V-A.2 Définir une OTU

Une unité taxonomique opérationnelle (OTU) est une *définition* opérationnelle utilisée pour classer des groupes d'individus étroitement liés qui sont regroupés en fonction de la similarité de séquences spécifiques (généralement le seuil de clusterisation est fixé à 97% en faisant l'hypothèse que cela correspond à une espèce). Les OTU sont donc des proxy pour les espèces ou des groupes taxonomiques supérieurs.

Alors que ce type de méthode moléculaire est largement utilisée en écologie, cette définition semble inconnue des candidats (aucun candidat n'a répondu à cette question !). Le jury tient à souligner qu'une **connaissance des méthodes d'étude est indispensable à un regard critique sur les résultats obtenus.**



**Document V-1 : Evolution temporelle des communautés bactériennes et fongiques dans une litière de réserve forestière.** Les figures concernent les OTU bactériennes et fongiques dominantes (représentant au moins 1 % de l'abondance relative à au moins une date d'échantillonnage). \*: effet significatif ( $P < 0,05$ ) de la durée d'incubation sur les abondances relatives des OTU bactériennes et fongiques. TP0 à 5 correspondent à 0, 89, 180, 284 et 473 jours d'incubation *in situ* des sacs à litière.

### V-A.3 Analyser les résultats obtenus concernant les communautés bactériennes et fongiques

La communauté bactérienne de la litière de feuilles était initialement fortement dominée par deux OTU: *Frigoribacterium* sp. et *Sphingomonas* sp. Ces deux OTU sont restées dominantes après 89 et 180 jours mais leurs abondances relatives ont progressivement diminué jusqu'à 473 jours. La majorité des OTU bactériennes dominantes à un stade précoce diminue ou devient absente dans les stades ultérieurs. Deux OTU bactériennes, peu abondantes initialement (*Nitrobacter* sp. et *Kineosporia* sp.) ont ensuite maintenu des abondances élevées jusqu'à la fin de l'expérience (180– 473 jours) alors que *Bradyrhizobium* sp dominait uniquement au cours des dernières étapes de décomposition de litière de feuilles (284 à 473 jours).

Les OTU fongiques les plus abondantes montrent également un patron saisonnier. A *Gyoeffiyella* sp et *Mycosphaerella* sp. dominantes initialement succèdent Xylariales OTU 3, *Cylindrosymposium* sp.1, et *Leotiomycetes* OTU 12 des jours 89 à 180 puis *Clitocybe* spp., *Mycena* spp., et *Lepiota* spp. des jours 284 à 473 jours.

Les communautés bactériennes et fongiques montrent une succession écologique au cours de la dégradation de la litière.

Lorsque cette question a été abordée, les candidats se sont souvent contentés d'une description partielle et superficielle. Ils se sont rarement appuyés sur quelques OTU précises (le raisonnement pouvait être construit à partir de l'analyse des OTU identifiées en rouge représentant plus de 5% de l'abondance relative). Les termes employés ont souvent été non informatifs ("varient", "sont modifiés"...), l'exploitation des résultats et la formulation d'hypothèses explicatives sont restées le plus souvent inexistantes.

## V.B – Biodiversité morphologique d'êtres vivants de litières forestières

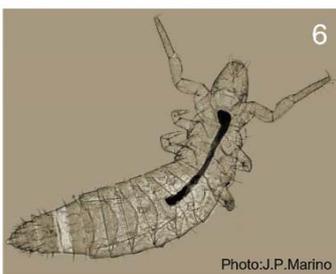
Cet exercice est un exercice de reconnaissance raisonnée d'organismes à partir de vidéos.

**V.B-1** Après avoir visionné les vidéos, proposer une position systématique des organismes en précisant les caractères que vous avez retenus pour faire cette proposition

Vidéo N°	Position systématique argumentée
1	-Cellule avec cytoplasme à aspect granuleux (organites ?) : Eucaryote -Cellule mobile à l'aide de deux flagelles : Biconte -Organites légèrement colorés en vert-brun : Chromoalvéolés -nom vernaculaire <b>Flagellé</b> dont la position phylogénétique est SAR, Rhizarien, Cercozoaire
2	-Organisme pluricellulaire mobile: Eucaryote Uniconte Métazoaire Eumétazoaire -partie antérieure portant les ocelles : Bilatérien -organisme vermiforme aplati : <b>Plathelminthe</b> Les plathelminthes sont des Protostomiens Spiraliens Rouphezoaires
3	-Organisme pluricellulaire mobile: Eucaryote Uniconte Métazoaire Eumétazoaire -partie antérieure/postérieure identifiables au cours du déplacement: Bilatérien -organisme vermiforme dont l'extrémité postérieure est effilée : <b>Nématode</b> Les Nématodes sont des Protostomiens Ecdysozoaires
4	-organisme mobile effectuant des déplacements amiboïdes grâce à des pseudopodes -pseudopodes dépassant d'une structure protectrice la thèque Nom vernaculaire : <b>Amibe à thèque</b> ou thécamébien Les amibes sont des Eucaryotes, unicontes, Amebozoa
5	-Organisme pluricellulaire mobile: Eucaryote Uniconte Métazoaire Eumétazoaire -partie antérieure identifiable au cours du déplacement : Bilatérien -organisme segmenté (4 segments) se déplaçant avec des pseudopodes (4 paires) -organisme à allure de petit ours marchant lentement : <b>Tardigrade</b> Les tardigrades sont des Protostomiens Ecdysozoaires Panarthropodes
6	-Organisme pluricellulaire mobile: Eucaryote Uniconte Métazoaire Eumétazoaire -partie antérieure identifiable par la présence d'antennules et antennes: Bilatérien -corps formé de segments portant des appendices articulés : euarthropodes -corps formé de 4 régions : Céphalon portant un œil composé et furca portant des soies : <b>Crustacés copépodes</b> (Harpacticoïdes) Les Copépodes sont des Protostomiens Ecdysozoaires Panarthropodes Euarthropodes Mandibulates Pancrustacés Altocrustacés Vericrustacés
7	-Cellule avec cytoplasme à aspect granuleux (organites ?) : Eucaryote -cellule mobile effectuant des déplacements amiboïdes grâce à des pseudopodes Nom vernaculaire : <b>Amibe nue</b> Les amibes sont des Eucaryotes, unicontes, Amebozoa

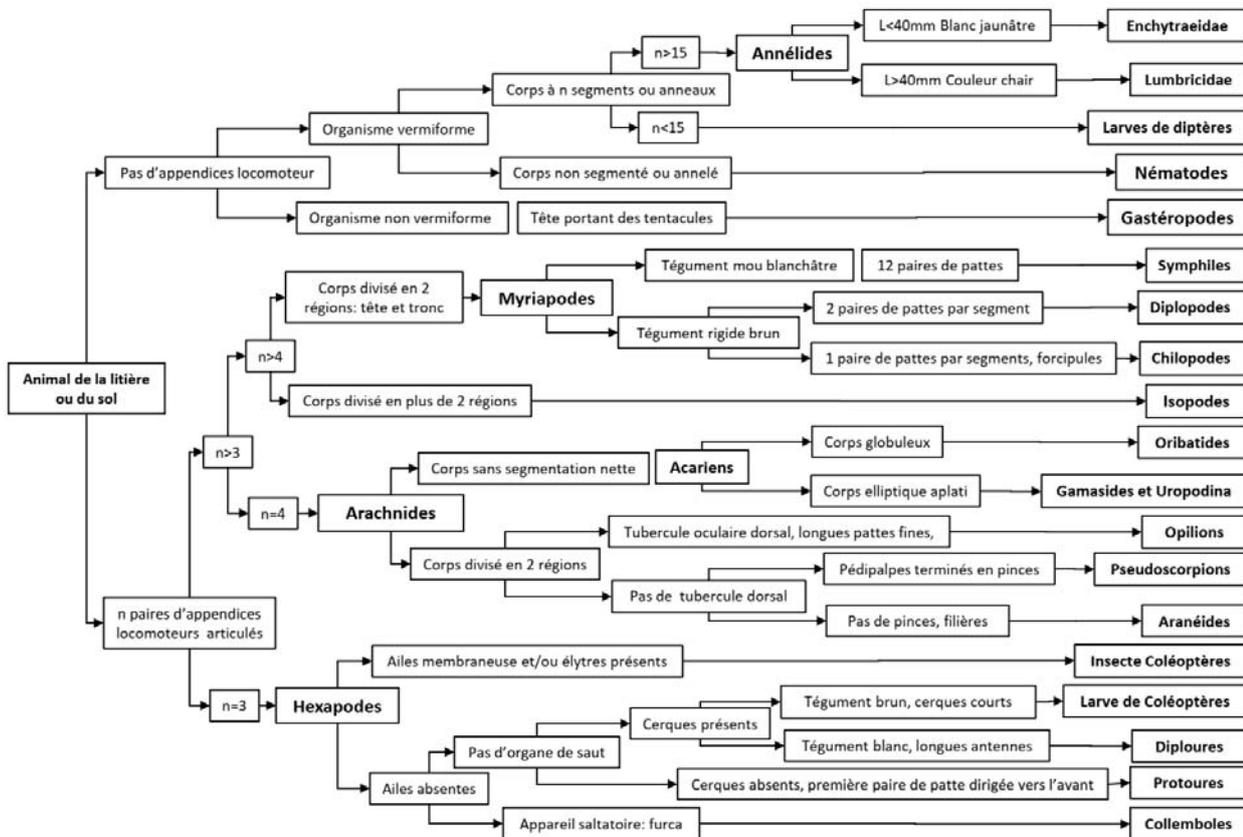
Un réel effort de certains candidats pour reconnaître les organismes présentés a été noté. Le défaut a souvent été le manque d'argumentation des réponses et la non prise en compte de la taille des organismes (microscopiques pour la plupart) ce qui a amené à des confusions plus ou moins importantes.

## V.C – Biodiversité de la mésafaune et de la macrofaune



**Document V-2** : Collection d'organismes d'une litière forestière

**V.C-1** En utilisant la clef de détermination ci-dessous, **identifier les organismes** de la collection (document V-2). **Préciser** ces déterminations à l'aide de vos connaissances.



N°	Détermination	N°	Détermination	N°	Détermination	N°	Détermination
1	Annelide Enchytraeidae	6	Hexapode Protoure	11	Myriapode Diplopede	16	Arachnide Opilion
2	Acarien Oribate	7	Hexapode Collembole	12	Hexapode Larve de Coléoptère	17	Myriapode Chilopode
3	Acarien <i>Gamaside</i> ou Uropodina	8	Acarien <i>Gamaside</i> ou Uropodina	13	Larve de Diptère	18	Hexapode Coléoptère <i>Carabus auratus</i>
4	Myriapode Symphile	9	Gastéropode	14	Arachnide Aranéide	19	Hexapode Coleoptère Staphilin ( <i>Ocyopus olens ex- Staphylinus olens</i> )
5	Hexapode Diploure	10	Annélides Lumbricidae	15	Arachnide Pseudoscorpion		

Pratiquement tous les candidats ont essayé de remplir ce tableau mais les déterminations se sont parfois résumées à un seul des termes mentionnés dans la clef. Toutefois quelques déterminations assez farfelues par rapport aux images proposées ont également été relevées !

# V.D – Caractérisation d'un organisme de la macrofaune

V.D-1 Présenter (sur l'annexe III) selon la/les méthode(s) de votre choix (dessin d'observation, étiquettes ...) l'échantillon 6 fourni, en mettant en évidence les caractéristiques qui vous permettent de le positionner dans la classification du vivant.

Appelez un examinateur pour vérifier l'adéquation entre vos observations et les conclusions formulées.

## Annexe III

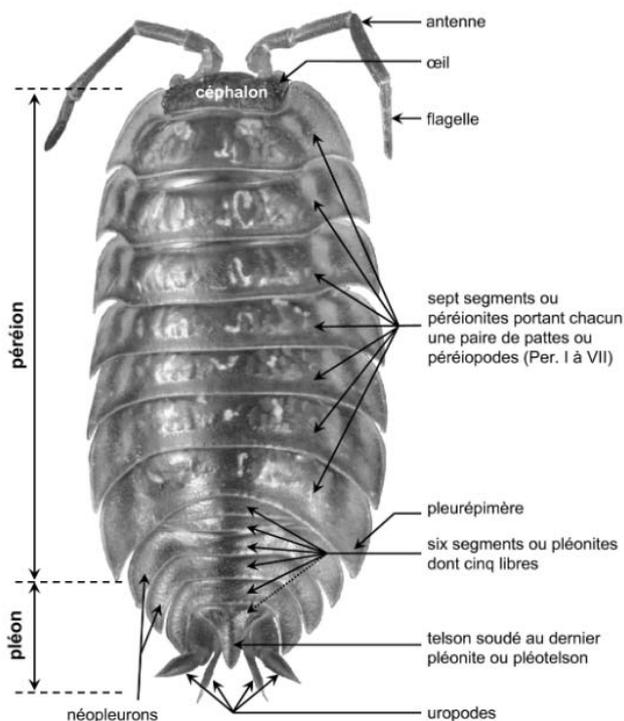


Figure A1. Morphologie générale d'un Isopode terrestre. Vue dorsale d'*Oniscus asellus* Linnaeus, 1758. (Cliché : C. MOUQUET)

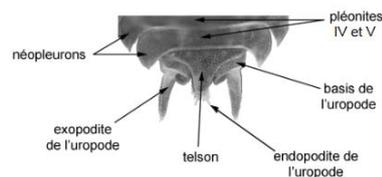


Figure A2. Détail de la partie postérieure du corps d'un Isopode terrestre. Vue dorsale du pléon, du telson et des uropodes chez *Porcellio gallicus* Dollfus, 1904. (Cliché : C. MOUQUET)

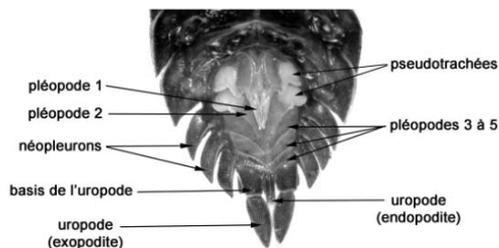


Figure A3. Face ventrale du pléon d'un mâle de *Porcellio scaber* Latreille, 1804. (Cliché : C. MOUQUET)

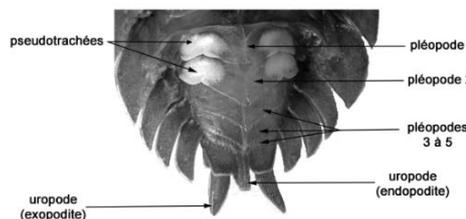


Figure A4. Face ventrale du pléon d'une femelle de *Porcellio scaber* Latreille, 1804. (Cliché : C. MOUQUET)

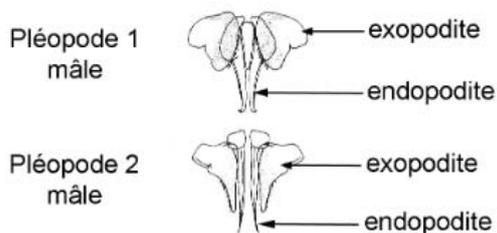


Figure A5. Morphologie des pléopodes (paires 1 et 2) d'un mâle d'Isopode terrestre (d'après HOPKIN, 1991).

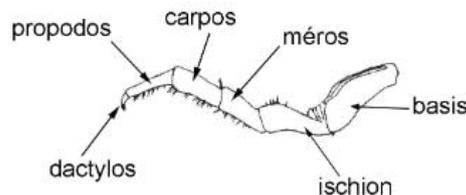
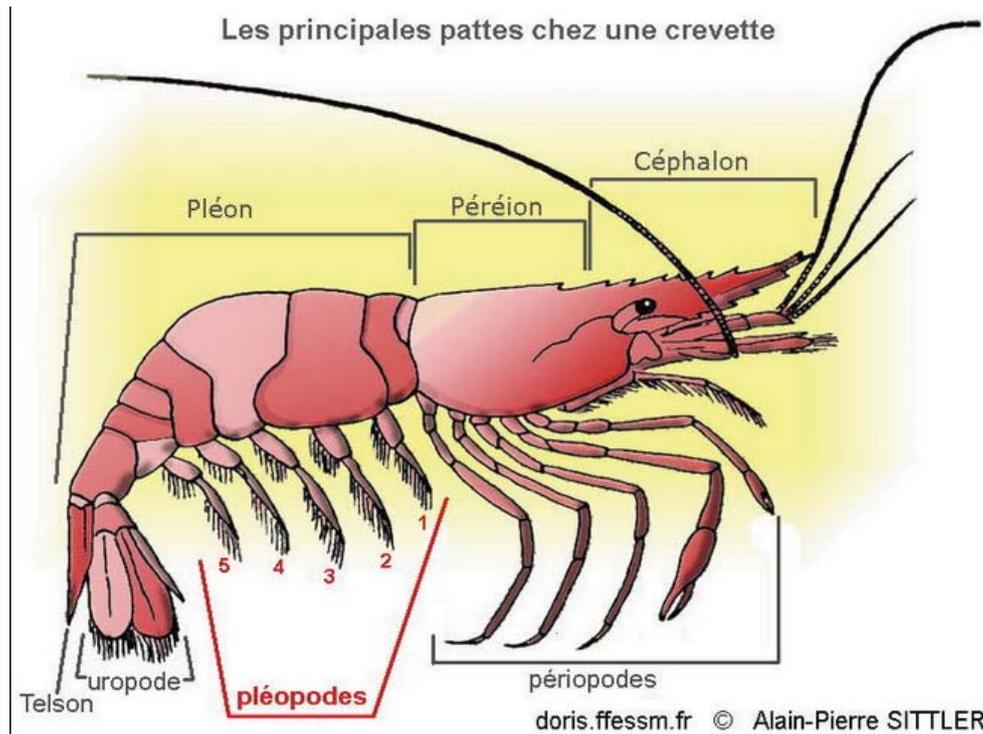


Figure A6. Détail de la morphologie d'un péréiopode d'Isopode terrestre (d'après HOPKIN, 1991).

[http://www.gretia.org/phocadownload/cahiers\\_gretia/IA02/Cle\\_Cloportes\\_11\\_oct\\_N\\_B\\_PDF1.3-1.pdf](http://www.gretia.org/phocadownload/cahiers_gretia/IA02/Cle_Cloportes_11_oct_N_B_PDF1.3-1.pdf)



Les candidats devaient réaliser un dessin d'observation rigoureux de la face dorsale et/ou ventrale d'un cloporte, accompagné d'un titre explicite et éventuellement du grossissement utilisé. Le soin apporté à la représentation anatomique ainsi qu'à l'annotation du dessin permettait d'évaluer leur capacité à identifier et nommer les principales structures morphologiques (antennes, yeux, céphalon, péréion, pléon, telson, uropodes, pléopodes et périopodes). Une attention particulière était portée à la qualité des légendes, à leur précision terminologique et à leur positionnement. La mobilisation d'éléments de comparaison avec un crustacé aquatique, lorsqu'elle était présente, constituait un indicateur supplémentaire de la compréhension de l'appartenance du cloporte aux Crustacés, malgré sa vie terrestre.

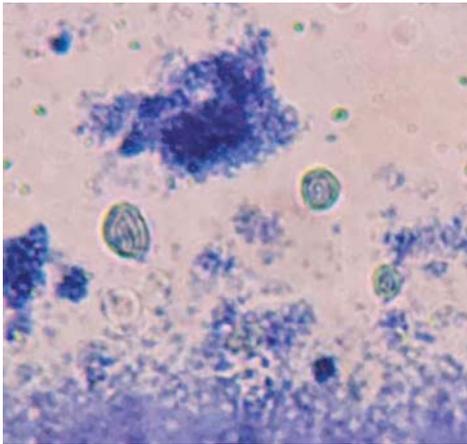
**V.D-2** À l'aide d'un prélèvement de votre choix et en utilisant le protocole fourni, **mettre en évidence** certains éléments du contenu du tube digestif de l'échantillon 6 (sur l'annexe III).

**Protocole de coloration gram**

**Faire un frottis** : nettoyer une lame à l'alcool. Effectuer le prélèvement de votre choix et le frotter sur la lame. Laisser sécher à l'air. Fixer l'échantillon à la chaleur.

**Coloration** (*attention aux éclaboussures, mettez des gants*)

- Déposer quelques gouttes de solution de violet de gentiane (cristal violet) sur le frottis fixé. Laisser agir 1 minute. Jeter l'excès de colorant dans un bécher. Rincer **très brièvement** en faisant couler de l'H<sub>2</sub>O sur la lame au-dessus du frottis (pas directement sur le frottis).
- Déposer quelques gouttes de Lugol sur le frottis. Laisser agir 1 minute. Jeter la solution de Lugol dans un bécher et rincer **très brièvement** à l'H<sub>2</sub>O comme précédemment décrit.
- Décolorer en faisant couler la solution de décoloration (alcool 90) sur la lame jusqu'à ce que le violet ne s'écoule plus du frottis (5 à 10 secondes). Rincer à l'H<sub>2</sub>O. Laisser sécher à l'air.
- Observer au microscope.



Les candidats devaient réaliser une observation microscopique du contenu du tube digestif de cloportes après coloration de type de Gram. L'épreuve visait à évaluer leur capacité à effectuer correctement un prélèvement, à préparer une lame (choix du montage, coloration, grossissement adapté) et à produire un dessin d'observation scientifique rigoureux. Les éléments attendus comprenaient l'identification de bactéries, ainsi que la reconnaissance de fragments de matière organique en cours de décomposition. Le soin apporté au dessin, la pertinence des légendes et la capacité à discriminer les différents éléments observés constituaient des critères essentiels d'évaluation.

**V.D-3 Préciser le(s) rôle(s) assuré(s) par ces éléments dans la biologie de l'organisme étudié.**

Les candidats devaient expliquer le rôle des bactéries, notamment celles du microbiote intestinal des cloportes, dans les étapes finales de la décomposition de la matière organique. L'objectif était de vérifier leur capacité à mobiliser des connaissances sur la production d'enzymes capables de dégrader des polymères complexes (ex. : lignine, cellulose), et à établir un lien fonctionnel entre ce processus microbiologique et la biologie de l'organisme. L'argumentation attendue devait faire apparaître que le microbiote contribue activement à la digestion des éléments de la micromasse de la litière, participant ainsi au recyclage de la matière. La pertinence scientifique des propos et la cohérence du raisonnement étaient des éléments clés dans l'évaluation des réponses.

La majorité des candidats a correctement réalisé la coloration de type Gram et a su mettre en évidence la présence de bactéries impliquées dans les processus de digestion. Toutefois, la notion de *microbiote intestinal*, attendue pour qualifier cette communauté bactérienne spécifique, a été rarement explicitée. De même, le lien entre cette fonction microbienne et la biologie propre du cloporte en tant qu'organisme détritivateur a souvent été omis ou peu développé.

**V.D-4 Comparer le comportement des organismes (de la même espèce que l'échantillon 6) soumis à un stress simulant un changement climatique (augmentation des températures et sécheresse selon le scénario intermédiaire du GIEC) à celui d'organismes non stressés. Vous utiliserez le logiciel **ToxTrac** pour analyser les vidéos et remplir le tableau suivant.**

Condition	Nom de la vidéo	Distance parcourue (mm)	Vitesse moyenne (mm/s)	Temps en mouvement (rate)	Taux d'exploration (rate)
Actuelle	Actuel1	1031,5	8,6	77%	30%
Actuelle	Actuel2	772,35	6,64	86%	29%
Stressé	Stress1	1146,85	9,61	93%	37%
Stressé	Stress2	1392,56	11,61	93%	37%

Voici ci-dessus les données attendues dans le tableau suite à l'analyse des vidéos.

La plupart des candidats a réussi à extraire correctement les données issues de l'analyse des vidéos à l'aide du logiciel ToxTrac, en suivant le protocole fourni sous forme de tutoriel vidéo. Les difficultés rencontrées, lorsqu'elles ont été présentes, étaient le plus souvent liées à une non-application rigoureuse du tutoriel, en particulier à l'oubli de fermer les fenêtres de calibrage, ce qui a perturbé la stabilité du logiciel.

**V.D-5 Sur la base de votre tableau rempli, comparer les deux groupes d'organismes (conditions actuelles vs stress). Identifier les différences majeures en termes de comportement et les implications de ces comportements pour ces organismes en milieu naturel dans un contexte de changement climatique.**

Les candidats devaient analyser et comparer les comportements locomoteurs de cloportes soumis à des conditions de stress (hausse de température et baisse d'humidité, simulant un changement climatique) avec ceux observés en conditions dites « actuelles ». À partir des variables extraites des vidéos (vitesse, distance parcourue, fréquence de déplacement, taux d'exploration), les candidats étaient attendus sur une interprétation des tendances comportementales, mettant en évidence une plus forte activité chez les individus stressés. L'exploitation quantitative des données fournies (extraits d'un tableau) devait permettre d'appuyer l'analyse, en intégrant une réflexion sur le faible nombre de réplicats (2 vidéos par condition), et la nécessité de données supplémentaires ou d'analyses statistiques pour renforcer les conclusions. Enfin, une discussion sur les implications écologiques de ces résultats était attendue, notamment en lien avec la sensibilité des cloportes à la déshydratation et l'interprétation possible de l'augmentation de la mobilité comme stratégie de fuite face à un stress environnemental.

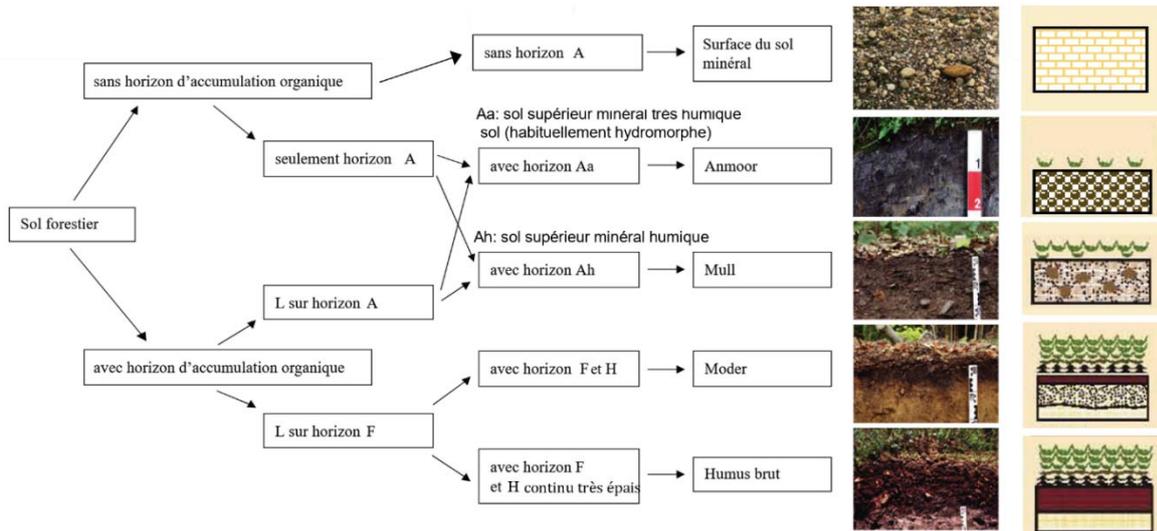
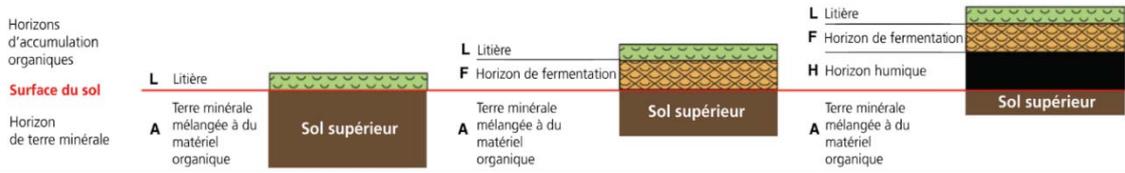
**Appelez un examinateur pour vérifier l'adéquation entre vos observations et les conclusions formulées.**

L'un des attendus a souvent été négligé : l'expression d'un esprit critique, notamment à travers la mention du nombre limité de réplicats et de l'absence d'analyses statistiques nécessaires pour valider les résultats observés.

**La partie V a été partiellement ou totalement traitée par 100% des candidats présents même si 10% de ces candidats ont obtenus une note assez faible.**

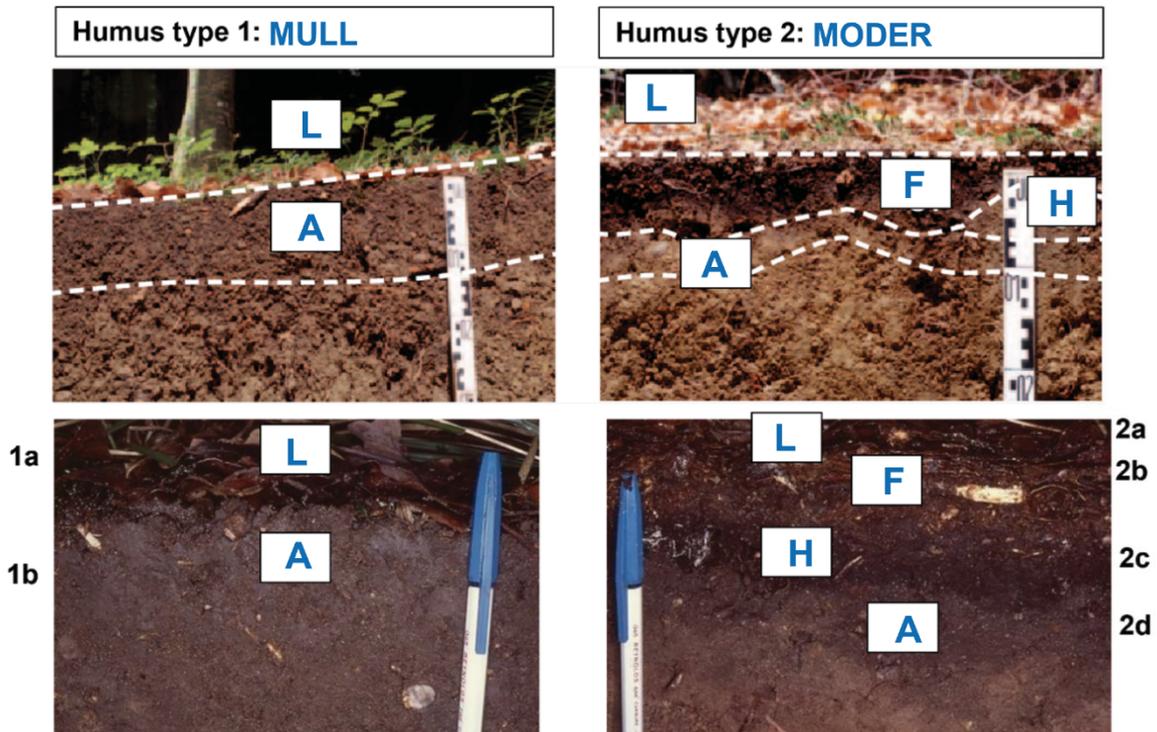
# Partie VI – Comparaison de deux types d’humus

## VI.A – Identification de deux types d’humus



**Document VI-1 : Clef simplifiée de détermination des principaux types d’humus forestiers**  
 Modifié d’après <https://www.waldwissen.net/fr/habitat-forestier>

**VI.A.1** Dans les cadres prévus à cet effet, **nommer** les différents horizons en utilisant les lettres mentionnées dans la clef simplifiée et **nommer** les deux types d’humus



**Document VI-2 : Profils pédologiques complets et horizons superficiels de deux sols forestiers** d’après Lüscher, P. et al. (2009) et Ponge J-F, Milsil, 8(5), 12-14 (2015)

## VI.B – Comparaison des communautés

	Humus type 1			Humus type 2		
	S	N	B	S	N	B
<b>Microfauna</b>						
Flagellata	–	$2.7 \times 10^9$	54	–	–	–
Amoebina	–	$3.5 \times 10^9$	1133	–	–	–
Testacea	65	$84 \times 10^6$	343	51	$57 \times 10^6$	256
Turbellaria	3	859	8	3	1882	4
Nematoda	65	732000	146	–	–	–
Tardigrada	4	4207	4	–	41 <sup>a)</sup>	9 <sup>a)</sup>
Harpacticoida	–	3873	2	1	3300 <sup>a)</sup>	0.6 <sup>a)</sup>
<b>Saprophagous and microphytophagous mesofauna</b>						
Enchytraeidae	36	22300	600	15	108000	1640
Cryptostigmata	61	25900	180	72	101810	195
Uropodina	11	3390	26	4	1525	–
Symphyla	2	57	–	1	–	–
Diplura	–	161	–	> 1	277	–
Protura	–	2481	–	> 1	278	–
Collembola	48	37835	153	> 11	63000	246
<b>Zoophagous mesofauna</b>						
Gamasina	67	2620	45	13	10800	397
<b>Saprophagous macrofauna</b>						
Gastropoda	30	120	430	4	0	0
Lumbricidae	11	205	10700	4	19	168
Isopoda	6	286	93	0	0	0
Diplopoda	6	55	618	1	0	0
Elateridae larvae	11	37	104	4	332	706
Diptera larvae	37 <sup>b)</sup>	2843	161	40 <sup>b)</sup>	7415	628
	(>245 spp.)					
<b>Zoophagous macrofauna</b>						
Araneida	102	140	47	93	462	173
Pseudoscorpionida	3	35	16	2	89	10
Opilionida	8	19	11	4	20 <sup>a)</sup>	6 <sup>a)</sup>
Chilopoda	10	187	265	7	74	155
Carabidae	24	5	144	26	7	93
Staphylinidae	85	103	76	117	314	180

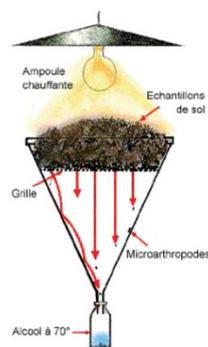
<sup>a)</sup> single measurement; <sup>b)</sup> families.

– = not studied; 0 = not present. Data from different sources (see text). Some minor groups are omitted. For

**Document VI-3** : Richesse spécifique (S), densité annuelle moyenne (N en ind.m<sup>-2</sup>) et biomasse annuelle moyenne (B en mg poids sec.m<sup>-2</sup>) de la « faune » du sol de deux forêts allemandes présentant un humus de type 1 ou 2. D'après Schaefer, M., and J. Schauer mann (1990).

### VI.B-1 Proposer des méthodes d'échantillonnage de la micro, meso et macrofaune

Pour étudier la microfaune, faire une suspension d'une carotte de sol dans de l'eau, faire décanter et observer le surnageant au microscope (si le volume de surnageant est important utiliser une cuve à sédimenter)



Pour étudier la mésofaune et la macrofaune utiliser un appareil de type Berlèse soit avec deux grilles de vide de maille différent (pour séparer meso et macrofaune) soit collecter les organismes en utilisant une grille de grand vide de maille et les séparer par tamisage. Un mélange de solvants (heptane-eau) peut également être utilisé pour séparer par densité les petits organismes.

Le jury a principalement relevé des proposition d'utilisation de la technique de Berlèse de façon indistincte pour toutes les fractions de taille d'organismes vivants dans la litière. Ceci témoigne d'une réelle méconnaissance des méthodes d'étude des microorganismes.

## VI.B-2 Expliciter les cinq catégories utilisées pour présenter les résultats

La « faune du sol » peut être étudiée par fraction de taille. On distingue la micro-meso-macro-mégafaune dont les limites de taille théoriques sont :  $<0,2\text{mm}$  ;  $0,2\text{mm} < \text{taille} < 2\text{mm}$  et  $2\text{mm} < \text{taille} < 20\text{mm}$ .

Les organismes macroscopiques ( $>2\text{mm}$ ) qui consomment la matière organique :

- de la nécromasse sont saprophages,
- des organismes photosynthétiques microscopiques sont microphytophages
- des organismes animaux sont zoophages.

Cette question a été inégalement réussie par les candidats.

## VI.B-3 Compléter le tableau suivant et comparer les densités et biomasses moyennes des individus de la microfaune, mésofaune et macrofaune dans l'humus de type 1.

Humus de type 1	Densité	Biomasse
Microfaune	$6.21 \cdot 10^9 \text{ ind.m}^{-2}$	$1690 \text{ mg PS .m}^{-2}$
Mésofaune	$9,47 \cdot 10^4 \text{ ind.m}^{-2}$	$1004 \text{ mg PS .m}^{-2}$
Macrofaune	$4,04 \cdot 10^3 \text{ ind.m}^{-2}$	$12665 \text{ mg PS .m}^{-2}$

### Comparaison des densités et biomasses dans l'humus de Type 1

La microfaune représente 99,99% des individus et 11,00 % de la biomasse

La mésofaune représente 0,001% des individus et 6,54 % de la biomasse

La macrofaune représente  $<0,001$  % des individus et 82,46% de la biomasse

Les organismes de la « microfaune » sont 100000 plus nombreux que ceux de la mésofaune qui sont eux-mêmes 23 fois plus nombreux que ceux de la macrofaune.

La biomasse de la macrofaune est 7,5 fois de celle de la mésofaune qui est 1,68 fois moins importante que celle de la microfaune

## VI.B-4 En utilisant uniquement les données obtenues pour les taxons ayant fait l'objet d'une détermination à l'espèce dans les deux types d'humus, compléter le tableau suivant et comparer les richesses spécifiques des microfaunes, mésofaunes et macrofaunes

S	Humus de type 1	Humus de type 2
Microfaune	137	55
Mésofaune	225	118
Macrofaune	296	262

### Comparaison des richesses spécifiques dans les deux types d'humus

Quel que soit la fraction de taille étudiée la richesse spécifique est supérieure dans l'humus mull (type1) par rapport à l'humus moder (de type 2). Cette différence est plus importante pour la mésofaune près de 2 fois (1.9) plus diversifiée dans l'humus de type mull que dans l'humus moder.

Lorsqu'elles ont été traitées, les deux questions précédentes l'ont souvent été correctement. Les candidats sont parvenus à interpréter les résultats souvent de façon « empirique » sans que les applications numériques soient justes. Lorsque celles-ci l'étaient, les réponses ont rarement été discutées au moyen de quantifications (comparaison chiffrée des différences).

**VI.B-5** En utilisant les valeurs de densité mentionnées dans le document **VI-3**, calculer les indices de diversité de la **macrofaune saprophage** des deux types d'humus. **Compléter** le tableau ci-dessous et **commenter** les résultats.

Remarque: Les indices de diversité sont théoriquement calculés pour des espèces. Les valeurs calculées ici sont des approximations utilisant les niveaux taxonomiques (non homogènes) listés dans la publication pour estimer la biodiversité.

Indice de diversité	Macrofaune saprophage	
	Humus de type 1	Humus de type 2
<i>S</i> richesse spécifique ici nombre de taxons	6	3
H' Indice de Shannon	1.11	0.28
E indice de Pielou $H = H'/H_{\max}$ avec $H_{\max} = \log_2 S$	0,43	0,17

**Comparaison des indices de diversité de la macrofaune saprophage des 2 types d'humus**

La **biodiversité est supérieure** pour la macrofaune saprophage de **l'humus mull** (H' humus de type 1 supérieur à celui de l'humus de type 2). Les deux communautés sont caractérisées par la très forte dominance du même taxon les larves de diptères expliquant les valeurs de l'indice de Pielou largement inférieure à 1. **L'équitabilité ou equirépartition est toutefois plus forte dans l'humus mull** (E supérieur)

Le jury a été étonné de constater qu'un exercice aussi classique en écologie qu'un calcul d'indice de diversité, avait rarement été fait par les candidats. Quelques valeurs correctes pour la richesse spécifique de H1 ont été obtenues alors qu'un seul candidat a effectué un calcul juste pour H2! Le reste des valeurs a été assez fantaisiste! Si la comparaison de la diversité a été tentée parfois même en l'absence de valeurs calculées, l'équitabilité n'a jamais été discutée.

**VI.B-6 Comparer la biomasse totale et la répartition de la biomasse dans la mésofaune et la macrofaune dans les deux types d'humus**

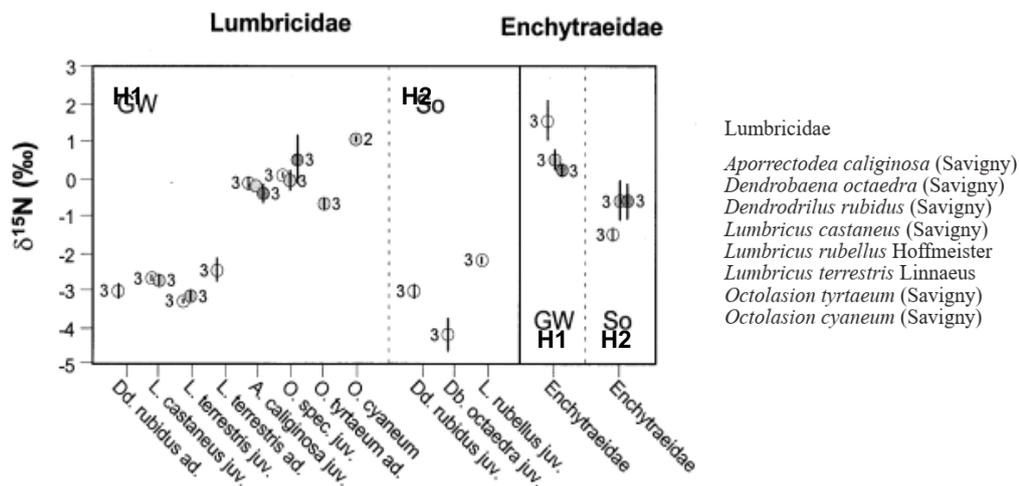
- La biomasse de la « faune » est environ 3 fois plus forte dans l'humus de type 1 ou mull: 15,359 g poids sec.m<sup>-2</sup> que dans l'humus de type moder ou type 2: 4,866 g poids sec.m<sup>-2</sup>
- La macrofaune contribue à 92,62% de la biomasse de la meso et macrofaune confondue dans l'humus de type mull alors que la répartition de la biomasse dans la mesofaune et la macrofaune est plus équilibrée dans l'humus moder (53,90% pour la mesofaune et 46,10% pour la macrofaune).
- Les lumbricidae de la macrofaune représentent 78,28% de la biomasse meso+macrofaune dans l'humus mull alors que les enchytréides de la mesofaune représentent 35,68% de cette biomasse dans l'humus de type moder.
- Les larves d'insectes représentent une part importante de la biomasse dans l'humus moder (respectivement 15,36 pour les larve de coléoptères elateridae et 15.66 pour les larves de diptères).
- La plus forte biomasse de prédateurs est rencontrée chez les Chilopodes de la macrofaune pour l'humus de type mull (1,94% de la biomasse meso+macrofaune) et chez les Acariens Gamasides de la mésofaune dans l'humus moder (8,64% de cette biomasse).  
Les Araneides, Chilopodes et Staphylinidae de la macrofaune contribuent chacun pour plus de 3,5 % de cette biomasse dans l'humus moder (3,76%;3,37% et 3,92 respectivement)

Certains candidats ont pensé à utiliser les données fournies pour quantifier leur comparaison, même si les calculs n'étaient pas toujours corrects, cette démarche a été valorisée. Un seul candidat a comparé explicitement les lumbricidés et les enchytréides et les prédateurs n'ont jamais été mentionnés. D'une manière générale les comparaisons ne sont ni discutée ni interprétées.

## VI.C–Comparaison des réseaux trophiques

De nombreux auteurs ont émis l'hypothèse que la nutrition des espèces saprophages était plutôt basée sur les micro-organismes colonisant la litière et les matériaux du sol plutôt que sur la matière organique morte elle-même, mais l'identification des ressources alimentaires des organismes du sol par des méthodes directes reste délicate. En effet, la petite taille de la majorité de ces organismes entrave les observations directes du contenu intestinal et certains de ces organismes ingèrent des fragments de proies impossibles à identifier visuellement. Les rapports des isotopes stables des organismes se sont révélés utiles pour identifier les relations trophiques dans les habitats aquatiques et terrestres. Sur la base d'une compilation des rapports  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  d'un grand nombre d'organismes, Minagawa et Wada (1984) ont conclu qu'en moyenne, les niveaux trophiques adjacents diffèrent de 3,4 unités  $\delta^{15}\text{N}$  (on retiendra une augmentation d'environ 3 unités entre le niveau trophique  $n$  et le niveau trophique  $n+1$ ).

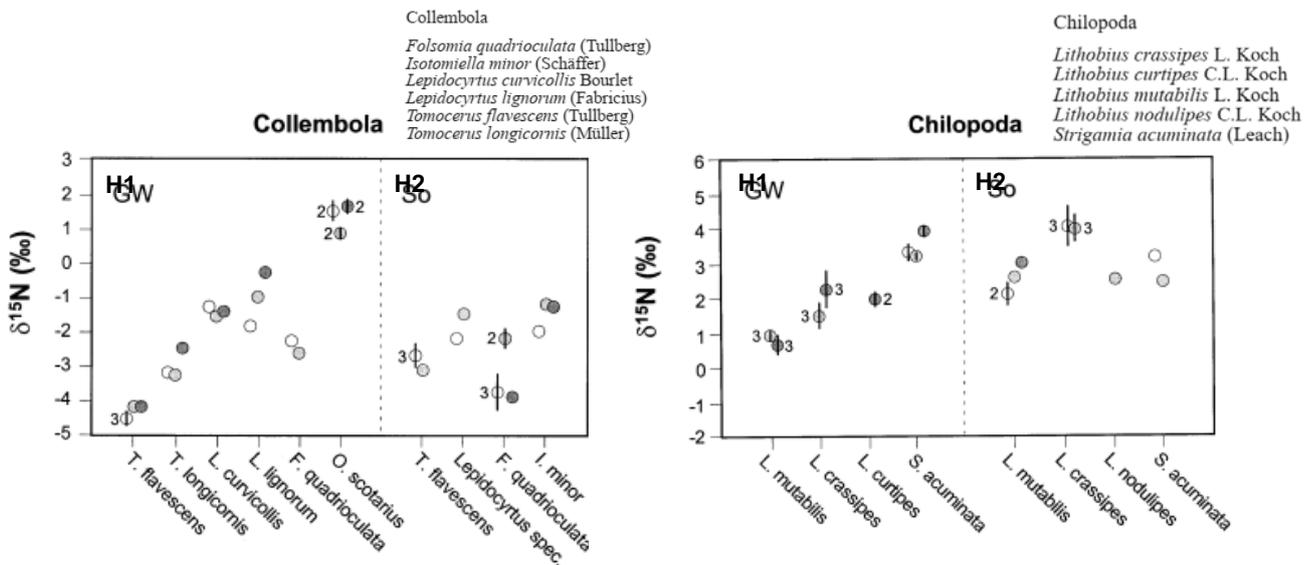
Les résultats suivants concernent des organismes prélevés dans les 2 sites présentant le même type de forêt, mais caractérisés par des sols comportant un humus de type 1 (H1) ou de type 2 (H2). D'après Scheu, S., & Falca, M. (2000). *Oecologia*, 123, 285-296



**Document VI-4 :**  $\delta^{15}\text{N}$  des espèces de Lumbricidae et Enchytraeidae dans les sols avec humus de type 1 (H1) et de type 2 (H2). Le nombre de répliques est indiqué ; les barres représentent les écart-types. Les noms complets des espèces de Lumbricidés sont précisés.

### VI.C-1 Analyser les résultats obtenus pour les Lumbricidae et Enchytraeidae dans les deux sols

La diversité des lombricidés est plus importante dans l'humus mull que dans l'humus moder respectivement 8 et 3 espèces. Les espèces de lombrics de l'humus mull se répartissent en deux groupes l'un ayant un  $\delta^{15}\text{N}$  de l'ordre de -3 et l'autre de l'ordre de 0 qui traduit une différence de niveau trophique parmi ces fousseurs. Tous les lombricidés de l'humus moder ont un  $\delta^{15}\text{N}$  autour de -3 alors que les Enchytréides, quel que soit l'humus, ont un  $\delta^{15}\text{N}$  compris entre -1 et +1. Ces résultats tendent à montrer que les enchytréides et certains lombricidés occupent un niveau trophique supérieur, en consommant les microorganismes colonisant la litière, à celui d'autres lombricidés plutôt saprophages.



**Document VI-5 :**  $\delta^{15}\text{N}$  des espèces de Collemboles et Chilopodes dans les sols avec humus de type1 (H1) et de type 2 (H2). Le nombre de répliques est indiqué; les barres représentent l'écart-type. Les noms complets des espèces sont précisés.

**VI.C-2 Analyser** les résultats obtenus pour les Collemboles et les Chilopodes dans les deux sols

Les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  des Collemboles de l'humus moder sont réparties autour de la valeur  $\delta^{15} = -3$  alors que dans l'humus mull elles s'échelonnent de -4.5 à 2 traduisant des différences de régime alimentaire : certaines espèces étant potentiellement saprophyte avec un  $\delta^{15}$  autour de -3, d'autres microphages avec  $\delta^{15}$  proche de 0 et les  $\delta^{15}$  intermédiaires pouvant s'expliquer par un régime mixte (saprophyte et microphage). Les Chilopodes présentent globalement un  $\delta^{15}$  compris entre 2 et 5 (moyenne environ 3) ils exercent probablement leur prédation sur les microphages alors qu'une espèce de l'humus mull dont le  $\delta^{15}$  est de 1 (*L. mutabilis*) pourrait exercer une prédation sur les organismes saprophytes de cet environnement

Les deux questions précédentes ont posé problème à un certain nombre de candidats parmi ceux, peu nombreux, ayant essayé d'y répondre. Alors que les variations de  $\delta^{15}\text{N}$  entre niveaux trophiques étaient clairement expliquées, certains candidats ont pensé que les documents retraçaient directement des chaînes alimentaires en recherchant par exemple quelles espèces de lombrics pouvaient être prédatrices d'autres espèces de ...lombrics ! Ces questions ont donc été déterminantes et ont permis de valoriser les candidats qui ont fait un lien entre les valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  et les différents niveaux trophiques (voir question suivante)

**VI.C-3 Proposer** une étendue de valeurs de  $\delta^{15}\text{N}$  correspondant à trois niveaux trophiques que vous explicitez. Cette proposition devra être **argumentée**.

En se basant sur l'exemple des Lumbricides et des Chilopodes on peut proposer que les organismes ayant un  $\delta^{15}$  :

- de l'ordre de -3 [-4,5—-2,5] pourraient être saprophyte : consommateurs I
- de l'ordre de 0 [-2—2] pourraient être microphages : consommateurs II
- de l'ordre de 3 [2-5] pourraient être : prédateurs I
- de l'ordre de 6 pourraient être : prédateurs II

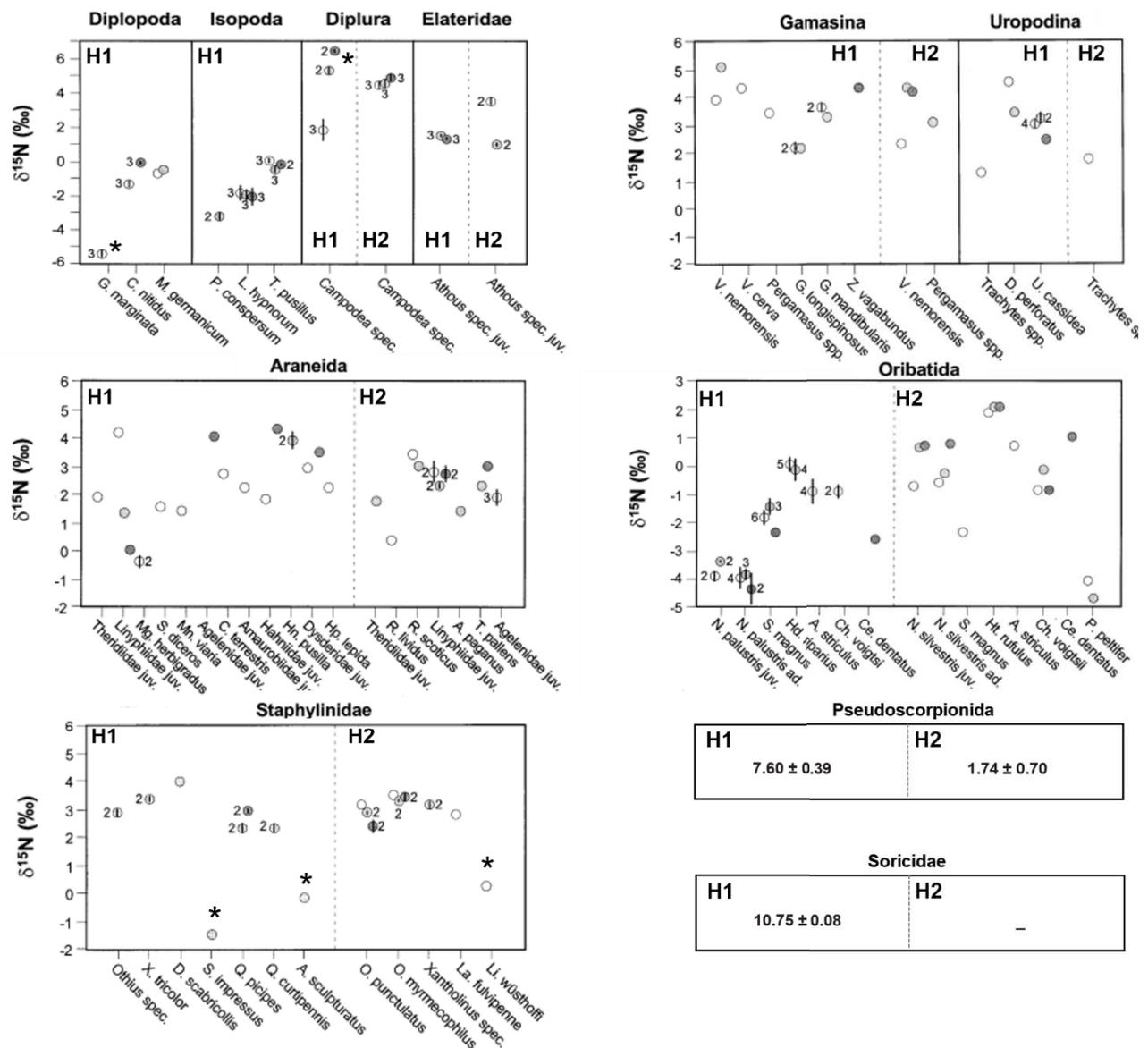


**Document VI-6** : Dentition de l'espèce commune de Soricidé photographiée. (A) Vue de la dentition supérieure et vue latérale de la dentition inférieure gauche. Largeur de l'image d'origine = 1,9 cm. (B) Vue de la dentition inférieure. Largeur de l'image d'origine = 1,1 cm. (C) Image de tomodensitométrie du crâne Largeur de l'image d'origine = 1,3 cm (D) Détail des molaires supérieures gauches <https://www.sciencedirect.com/topics/agricultural-and-biological-sciences/shrew>

**VI.C-4** En vous appuyant sur le document VI-6, **déterminer** le régime alimentaire des Soricidae

La dentition est complète (A,B). La première incisive de grande taille est courbée dans la mâchoire supérieure et couchée dans la mâchoire inférieure (A,C). Les autres dents unicuspidées inférieures interprétées comme des incisives ou des canines entrent en contact avec les dents unicuspidées supérieures juste derrière leurs pointes et agissent comme des pinces. Sur la mâchoire supérieure, les molaires présentent des crêtes (cuspidées) en W : dents qualifiées de dilambdodontes (D).  
 Ces structures dentaires sont adaptées à la préhension et au broyage des insectes: c'est une dentition caractéristique des insectivores.  
 La formule dentaire généralisée pour la dentition permanente des musaraignes est  $I/1-2]C[0-1]P1M3$

La terminologie précise et la formule dentaire n'étaient pas attendues contrairement à une argumentation appuyée sur les documents. Cette question a été assez fréquemment traitée mais de soit manière descriptive sans mise en relation des structures avec leur fonction, soit en énonçant une conclusion sur le régime alimentaire sans aucune argumentation à partir des documents.



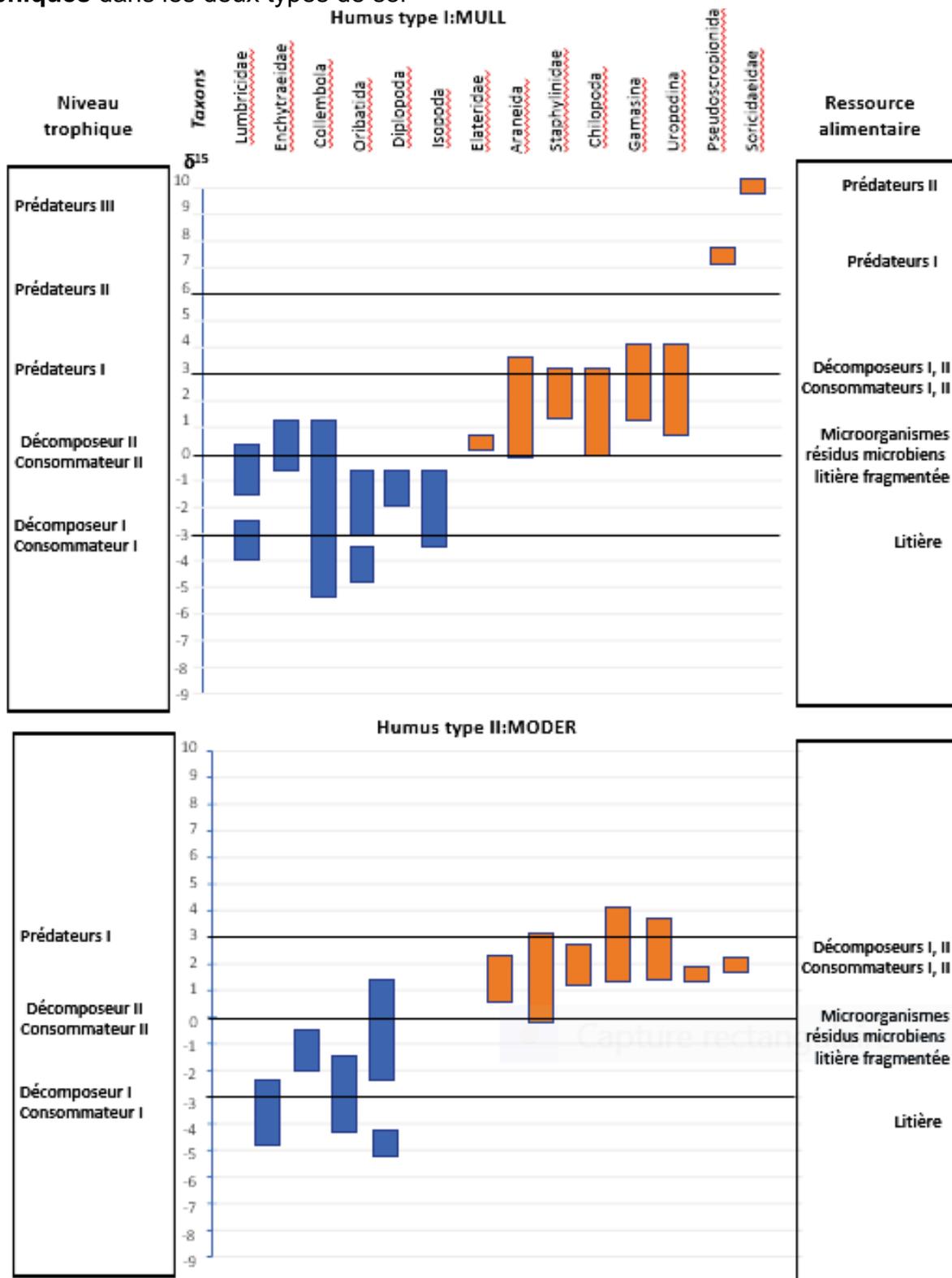
**Document VI-7** :  $\delta^{15}\text{N}$  des autres taxons présentant un effectif significatif dans les sols avec humus de type 1 (H1) et de type 2 (H2). Le nombre de répliques est indiqué ; les barres représentent l'écart-type - : effectif non significatif.

**VI.C-5 Expliquer** en quoi les données isotopiques **confirment** ou **non** les régimes alimentaires mentionnés dans le document VI-3 .

Les diplopodes seraient plutôt microphages ( $\delta^{15}\text{N}$  de l'ordre de 0) que saprophages stricts (VI-3)  
 Certains Isopodes seraient effectivement saprophages mais d'autres plutôt microphages ou consommateurs des deux ressources (débris végétaux ou microorganismes essentiellement bactéries et champignon colonisant ces débris)  
 Les diploures présentent un  $\delta^{15}\text{N}$  anormalement élevé entre 2 et 4 peu cohérent avec un régime saprophage  
 Les Elateridae seraient plutôt microphage que saprophages  
 Les Aranéides, Staphylins, Gamasides et Uropodina seraient effectivement prédateurs  
 Les Oribatida (Cryptostigmata) semblent saprophages ou microphages dans l'humus mull et principalement microphages dans l'humus moder  
 Les pseudoscorpions semblent être des carnivores prédateurs d'ordre II ( $\delta^{15}\text{N}$  de l'ordre de 6) dans l'humus I et d'ordre I dans l'humus II.

Cette question a été abordée dans un trop petit nombre de copies pour pouvoir dégager une tendance générale.

**VI.C-6** En utilisant l'ensemble des données isotopiques, **reconstituer les réseaux trophiques** dans les deux types de sol

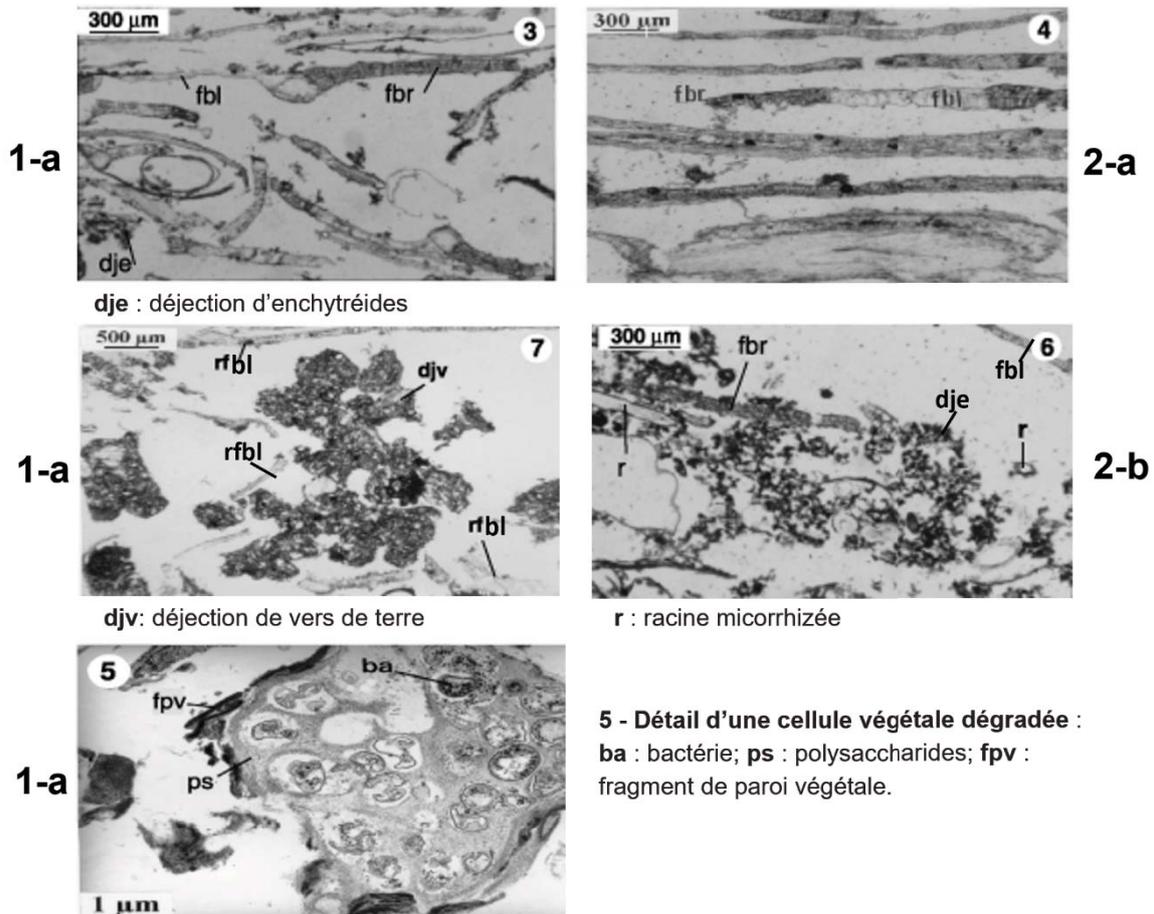


Cette question atypique a été très peu traitée alors qu'il s'agissait simplement de reporter les données sur le graphique et de faire le lien avec les niveaux trophiques et la source de matière organique. Les rares candidats qui se sont lancés ont bien réussi la question qui a été largement valorisée.

## VI.D–Comparaison de la dégradation de la litière

L'objectif de cette partie est de caractériser les changements morphologiques et biochimiques survenant dans une litière forestière dans les deux types de sol représentés sur le **Document VI-2**. D'après Karroum, M. et al. (2005). *Canadian journal of soil science*.

Les documents suivants présentent des observations microscopiques réalisées sur des coupes réalisées dans les différents horizons : 1-a et 1-b dans le sol 1 et 2-a, 2-b, 2-c et 2-d dans le sol 2.



**VI.D-1 Identifier** les structures les plus nombreuses sur les photographies 3 et 4. **Indiquer** la conséquence visible, à cette échelle d'observation, de l'activité d'un agent de la pourriture blanche en proposant une légende pour fbr et fbl. **Identifier** les structures indiquées rfbl dans l'horizon 1-a

Les structures les plus nombreuses correspondent feuilles (coupes de feuilles cf PARTIE I). A cette échelle d'observation la conséquence visible de l'activité d'un agent de la pourriture blanche est la décoloration (blanchiment des feuilles). Les légendes suivantes peuvent être proposées :

### Légendes

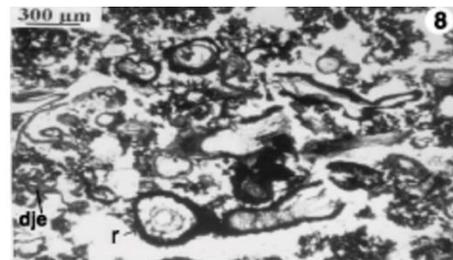
**fbr** : feuilles brunes      **fbl** : feuilles blanchies      **rfbl** : restes (fragments) de feuilles blanchies

Les candidats n'ont pas porté assez attention aux échelles (la proposition la plus fréquente a été fibre de cellulose!) et n'ont pas fait le lien avec leur propre coupe de feuille de hêtre. Ils ne se sont pas appuyés sur l'analyse des documents et l'argumentation a été quasi inexistante.

## VI.D-2 Comparer les horizons 1-a et 2-b et préciser le type de décomposeurs impliqués

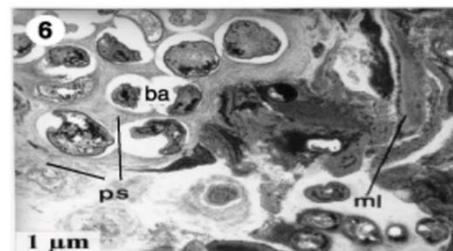
Horizon L (1-a) de l'humus mull présente des restes foliaires, de nombreuses déjections de lumbricidés et des colonies bactériennes intracellulaires participant à la dégradation des cellules végétales. La décomposition résulte de l'action conjointe des champignons, bactéries et lumbricidés

Horizon F (2-b) de l'humus moder présente des structures foliaires typiques mais fragmentées, des racines et de nombreuses déjections d'enchytréides. La décomposition dans cet horizon résulte principalement de l'action conjointe des champignons et enchytréides



2-c

dje : déjection d'enchytréides r : racine



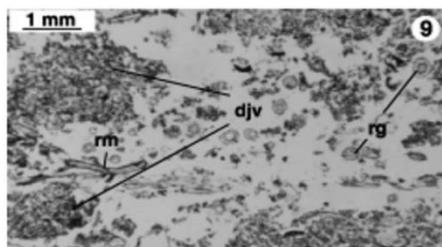
2-c

6- Observation détaillée de l'horizon 2-c: ml : matière ligno-cellulosique; ps : polyccharides; ba : bactérie.

## VI.D-3 Caractériser l'horizon 2-c

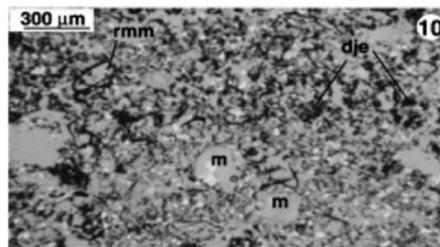
L'horizon 2-c correspond à l'horizon humique H: c'est une couche très organique et sombre avec beaucoup de racines, de déjections d'enchytréides et de nombreuses structures végétales dégradées associées à des bactéries. L'activité bactérienne semble plus importante dans cet horizon (H) que dans l'horizon F sus-jacent.

Pour ces deux questions, très rarement traitées, des réponses fantaisistes ont été proposées pour tenter de faire correspondre les documents à des connaissances théoriques assez générales. Le jury rappelle que la démarche attendue était une analyse comparée de document qui aurait dû permettre de dégager les caractéristiques des deux types d'humus.



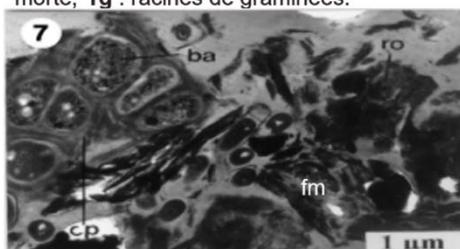
1-b

djv : déjection de vers de terre; rm : racine morte; rg : racines de graminées.



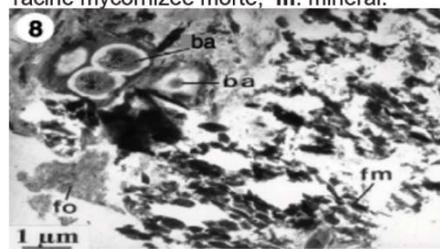
2-d

dje : déjection d'enchytréides; rmm : racine mycorrhizée morte; m : minéral.



1-b

7- Détail de déjection de vers de terre: ro : restes organiques; ba : bactérie; ep : exsudats polysaccharidiques fm : fraction minérale



2-d

fo : fraction organique ; fm : fraction minérale (quartz); ba : bactérie

#### VI.D-4 Comparer les associations organo-minérales dans les horizons 1-b et 2-d

Dans l'horizon A de l'humus mull (1-a) les déjections de lumbricidées dominent. Ces déjections sont constituées d'associations étroites entre des éléments organiques et minéraux. L'association de polysaccharides agrégeant des bactéries, des restes organiques et des minéraux forme des agrégats (microagrégats)

Dans l'horizon A (2-d) de l'humus moder les matières minérales et agrégats organiques sont identifiables et demeurent juxtaposés.

Le jury déplore de trop nombreuses confusions entre : matière/molécule minérale (ou inorganique) et fraction minérale du sol d'une part et organisme mort (matière organique de la nécromasse) et matière minérale d'autre part (confusion vivant=organique et mort=minéral!). Certains candidats formulent des réponses laissant penser que la fraction minérale du sol (ici les grains de quartz) serait produite par la minéralisation de la matière organique! On rappelle que la minéralisation de matière organique, comme un hydrate de carbone (molécule organique), est une oxydation qui conduit à la production de molécules inorganiques (minérales) comme le CO<sub>2</sub> ou H<sub>2</sub>O. La "minéralisation" des molécules organiques azotées libère des molécules inorganiques comme le NH<sub>3</sub> ou NH<sub>4</sub> (transformées par l'activité de différentes communautés bactériennes en autres molécules inorganiques :NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>). De même pour les autres éléments chimiques constitutifs des molécules organiques qui font l'objet de cycles, généralement biogéochimiques, entre des compartiments contenant des molécules organiques et des compartiments contenant des molécules inorganiques=minérales.

Horizon	COT (mg.g <sup>-1</sup> )	Lignine (mg C-phénol.g <sup>-1</sup> COT)	Polysaccharides (mg C-sucres.g <sup>-1</sup> COT)
1-a	349,5 ± 20,0	40,2 ± 5,0	124,1 ± 39,4
1-b	123,8 ± 42,1	7,1 ± 2,9	92,4 ± 65,6
2-a	418,9 ± 8,3	55,5 ± 17,4	117,6 ± 10,6
2-b	396,9 ± 12,1	41,9 ± 2,5	94,1 ± 17,9
2-c	290,6 ± 77,3	25,0 ± 2,6	91,1 ± 47,2
2-d	80,4 ± 23,2	13,2 ± 1,2	81,1 ± 72,0

**Document VI-8** : Teneur en carbone organique total (COT) et teneur en carbone de la lignine totale et des polysaccharides normalisée au COT.

#### VI.D-5 Analyser les résultats obtenus pour les différents horizons des deux types d'humus

-Les teneurs en COT décroissent depuis les horizons superficiels (L) jusqu'aux horizons organo-minéraux (A).  
-La contribution du C des phénols de la lignine est légèrement plus forte dans l'horizon L de l'humus moder (55‰) que dans l'horizon OL-OF de l'humus mull (40‰). Dans la partie supérieure de l'horizon organo-minéral (A) celle-ci n'est plus que de (13‰) dans l'humus moder et (7‰) dans l'humus mull. La diminution est abrupte entre l'horizon L et A de l'humus mull et plus progressive dans les différents horizons de l'humus moder.

-La contribution du C des polysaccharides est comparable dans les deux horizons L (environ 12% du Carbone organique total) et montre une diminution dans les horizons plus profonds.

Ces diminutions résultent de la décomposition puis minéralisation de la matière organique sous l'action des organismes du sol.

Les résultats lorsqu'ils ont été analysés l'ont été de manière trop superficielle pour pouvoir réellement comparer les deux types d'humus.

	Épaisseur de l'horizon (cm)	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Stock de matière (kg.m <sup>-2</sup> )	Stock de C (kg C.m <sup>-2</sup> )	Flux annuel de C dans la litière (kg C.m <sup>-3</sup> .an <sup>-1</sup> )	Temps de résidence (an)	Temps de demi-vie k (an <sup>-1</sup> )
Humus 1: Horizon 1-a	1.8	142.6	2,5668	0.897	0.165	5.44	3.77
Humus 2: Horizon 2-a	2.05	72.2	1.4801	0.620	0.168	6.67	4.63
Humus 2 :Horizon 2-b	0.82	153.9	+1.2620 =2.742	+0.501 =1.121			

**Document VI-9** : Épaisseur moyenne des horizons, masse volumique moyenne des litières des différents horizons et flux annuel de carbone dans la litière (production annuelle de litière).

**VI.D-6 Expliciter** la méthode de calcul permettant d'estimer le stock de C dans un horizon et l'appliquer à l'horizon 1-a et à l'ensemble des horizons 2-a et 2-b. **Compléter** le tableau VI-9

En utilisant les données du tableau VI-9 et en raisonnant par dm<sup>3</sup> on peut faire les calculs suivants :  
-sur 1m<sup>2</sup> l'horizon 1-a représente un volume de 0.18x100=18dm<sup>3</sup> qui a une masse de 18 x 0.1426= 2,5668 kg (on utilise la valeur de la masse volumique de la litière)

En utilisant les valeurs du tableau VI-8 (teneur en carbone organique total par g de litière) on peut en déduire que sur 1m<sup>2</sup> il y a 2.5668 x 0.3495= 0.897kg de C.

Sur 1m<sup>2</sup> l'horizon 2-a représente une masse de 0.205x100x0.0722=1.4801kg et 1.4801x0.4189=0.620 kgC et l'horizon 2-b représente une masse de 0.082x100x0.1538=1.2620kg et 1.2620x0.3969=0.501 kgC

Moins de dix candidats ont réussi à indiquer qu'il fallait multiplier le volume de litière par la masse volumique de celle-ci pour calculer le stock de matière et la moitié d'entre eux a proposé d'utiliser les valeurs de COT mentionnées dans le tableau pour obtenir le stock de C. Lorsque des calculs ont été faits, ils ont été faussés par une mauvaise maîtrise des unités.

**VI.D-7 Définir le temps de résidence du C** dans un compartiment et **comparer** celui-ci dans les horizons les plus superficiels des deux types d'humus (horizon 1-a pour l'humus de type 1 et ensemble 2-a+2-b pour l'humus de type 2). **Compléter** le tableau VI-9.

Le temps de résidence du C dans un compartiment peut être calculé en divisant le stock par le flux entrant ou le flux sortant (supposés égaux) dans ce compartiment. Ici on utilise le flux entrant de C dans la litière. Le temps de résidence du C dans la litière est plus long dans l'humus moder (6.67 ans) que dans l'humus mull (5.44 ans).

Une fois sur deux la définition qui a été proposée n'était pas rigoureuse et ne correspondait pas à la définition scientifique (stock/flux).

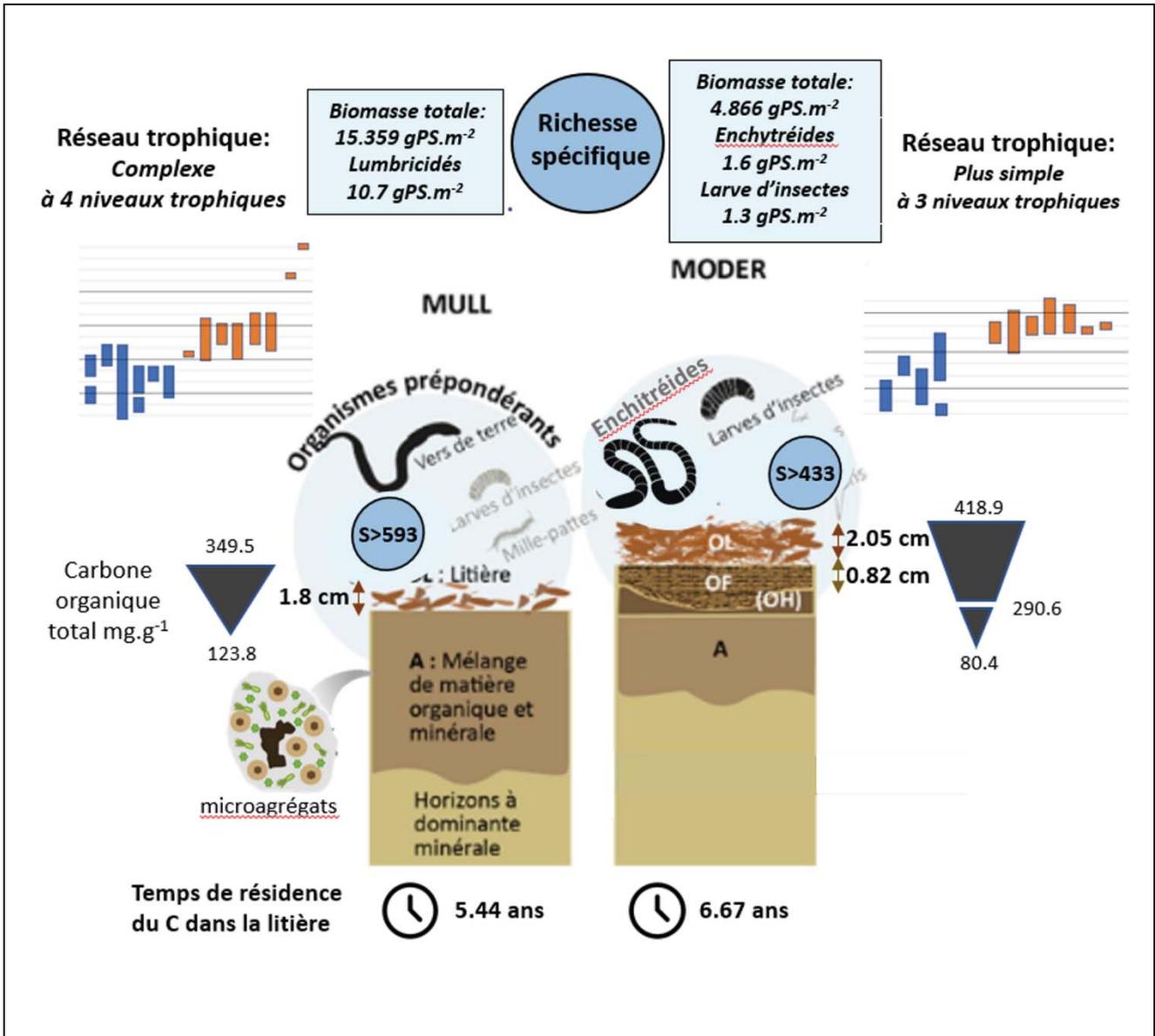
Le modèle de Olson admet que la disparition de la matière organique par minéralisation suit une loi exponentielle. Le temps de demi-vie des matières organiques dans la litière peut être calculé en utilisant la formule suivante :  $t_{1/2} = -(\ln 0,5)/k$  avec k le coefficient annuel de renouvellement de la litière (inverse du temps de résidence exprimé en an<sup>-1</sup>).

**VI.D-8 Comparer le temps de demi-vie** des matières organiques de la litière dans les deux types d'humus. **Compléter** le tableau VI-9.

Le temps de demi-vie est supérieur dans l'humus moder (4.63) que dans l'humus mull (3.77): le processus de minéralisation est donc plus rapide dans l'humus mull que dans l'humus moder.

Ce calcul n'a été fait par aucun des candidats

**VI.D-9 Présenter** de manière synthétique une comparaison la plus précise possible des deux types d'humus.



Très peu de candidats ont abordés les deux dernières parties du sujet (VI-C et VI-D) ce qui limitait la qualité de la comparaison synthétique. Les productions qui apportaient une réponse même très partielle à cette question de synthèse ont été valorisées.

La partie VI a été abordée par 84% des candidats présents mais 70% des candidats ont obtenus des notes faibles sur cette partie. 89% des candidats ont traité même partiellement la partie VI-A, 97% la partie VI-B, 66% la partie VI-C et seulement 33% la partie VI-D.

### 5.3 Epreuve de travaux pratiques de spécialité du secteur C : Sujet et commentaires

NOM :

PRENOM :

Salle :

# AGRÉGATION DE SCIENCES DE LA VIE - SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2025

## TRAVAUX PRATIQUES DE SPECIALITE DU SECTEUR C

Durée totale : 6 heures

### Géologie de l'Afrique et du Moyen-Orient

Les différentes parties sont indépendantes. Certaines questions nécessitent des observations sur des postes de travail (échantillons macroscopiques, lames minces, expérience, modélisation numérique). Un ordre de passage, affiché au tableau, vous permettra d'accéder aux postes de travail. Organisez-vous en conséquence. **Cependant, la réalisation des ateliers ne conditionne pas la finalisation des différentes parties.**

<b>Partie I. Géodynamique et Tectonique de la région Est africaine</b>	p. 2 à 19
<i>Durée conseillée : 2h → 1/3 des points</i>	
<b>Partie II. Le volcanisme Est africain</b>	p. 20 à 32
<i>Durée conseillée : 2h → 1/3 des points</i>	
ATELIER 1 (20 mn) – Roches magmatiques ( <i>macroscopiques et lames minces</i> )	
ATELIER 2 (15 mn) – Modélisation numérique (salle informatique)	
ATELIER 3 (40 mn) – <i>Expérience : Vitesse ascension des bulles (couloir)</i>	
<b>Partie III. Géologie de l'Oman</b>	p.33 à 57
<i>Durée conseillée : 2h → 1/3 des points</i>	
ATELIER 4 (20mn) – <i>Sédimentologie et Paléontologie (macroscopique et lames minces)</i>	
ATELIER 5 (20mn) - <i>Roches métamorphiques (macroscopiques et lame mince)</i>	

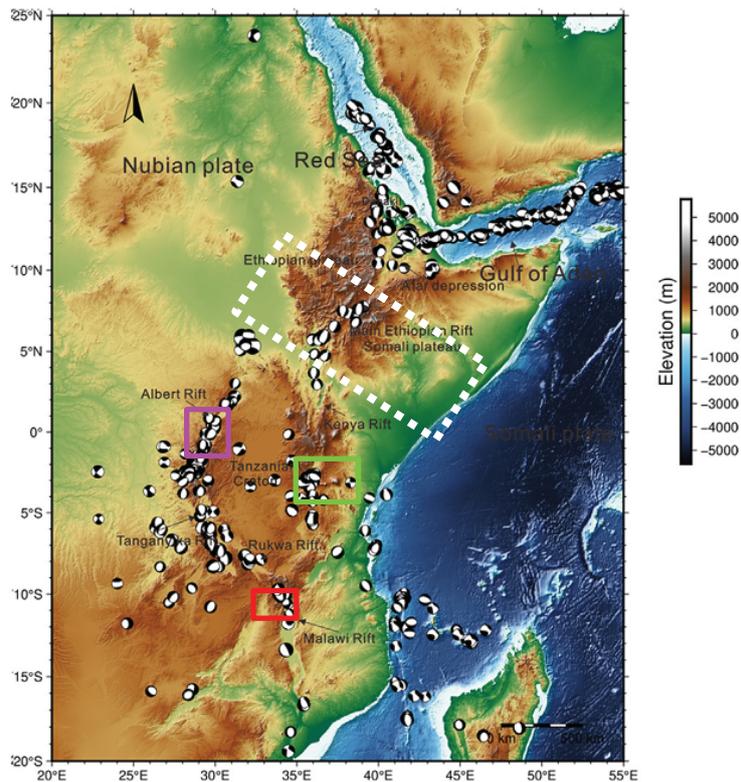
Les réponses aux questions figureront dans les cadres réservés à cet effet. Vous pouvez disposer d'une calculatrice non programmable.

**AVANT DE REMETTRE VOTRE DOSSIER, VÉRIFIEZ QUE VOUS AVEZ BIEN INDIQUÉ VOS NOM, PRÉNOM ET NUMÉRO DE SALLE EN TÊTE DE TOUS LES DOCUMENTS.**

*Vous devez rendre la totalité des feuilles du dossier*

## Partie I. Géodynamique et tectonique de la région Est africaine

La dynamique actuelle de la zone Est africaine est contrôlée par une tectonique extensive aboutissant à la formation d'un rift de plus de 4000 km de long, de l'Afar au golf du Mozambique.



**Figure 1. Mécanismes aux foyers de la zone Est africaine.**

Le cadre en tirets blancs concerne la question I.2. Le cadre rouge renvoie à la Figure 2 et la question I.3. Le cadre violet renvoie à la Figure 5. Le cadre vert correspond à la zone d'étude de la Partie II du devoir.

(Dziewonski et al. 1981 ; Ekstrom et al. 2012)

**Question I.1.** Vous préciserez le mode d'obtention des mécanismes aux foyers et vous expliquerez en quoi les données de la **figure 1** témoignent d'une dynamique extensive.

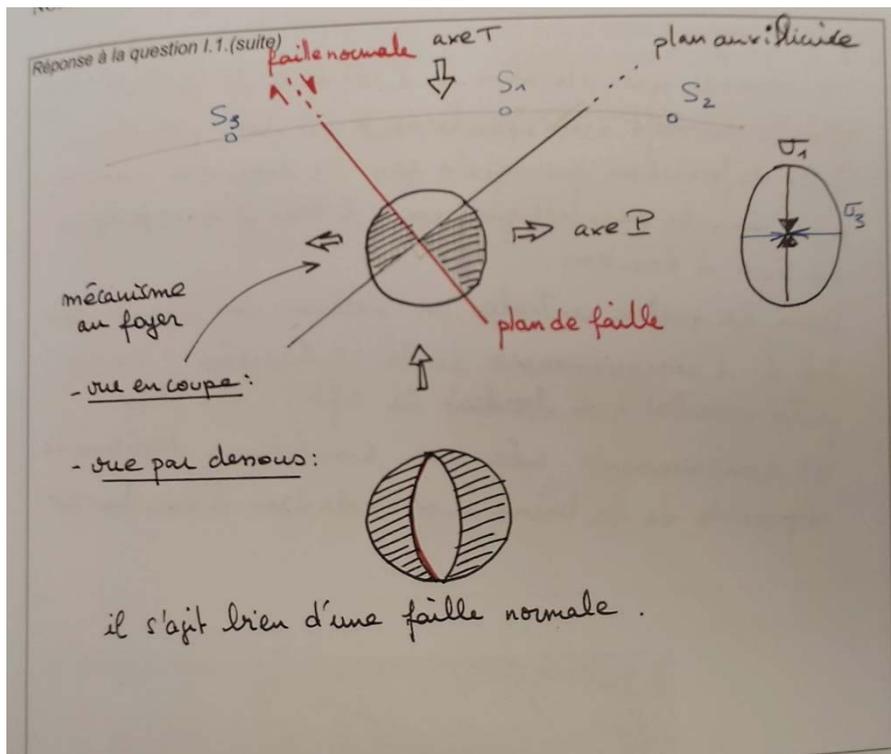
Réponse à la question I.1.

Les mécanismes aux foyers sont des représentations (projections stéréographiques) permettant de retrouver le jeu d'une faille active. Ils sont obtenus par l'analyse de données sismiques liées au fonctionnement de la faille. Les premiers mouvements perçus par les sismographes permettent d'identifier deux types de mouvement : vers le haut ou vers le bas. La compilation d'un grand nombre de données issues de plusieurs stations sismiques permet de distinguer des secteurs dits en « dilatation » (bloc descendant) représentés en blanc ou en « compression » (bloc montant) représentés en noir. La disposition de ces secteurs permet de retrouver le jeu de la faille : inverse, normal ou décrochant.

Concernant la zone Est africaine ; la majorité des mécanismes aux foyers indique un jeu de faille normale, témoin d'une dynamique extensive.

Réponse à la question I.1.(suite)

Une production jugée satisfaisante



**Question I.2.** Vous réaliserez un schéma d'échelle lithosphérique expliquant l'origine des reliefs observés dans la zone encadrée en tirets blancs. Vous émettrez des hypothèses sur les processus mis en jeu.

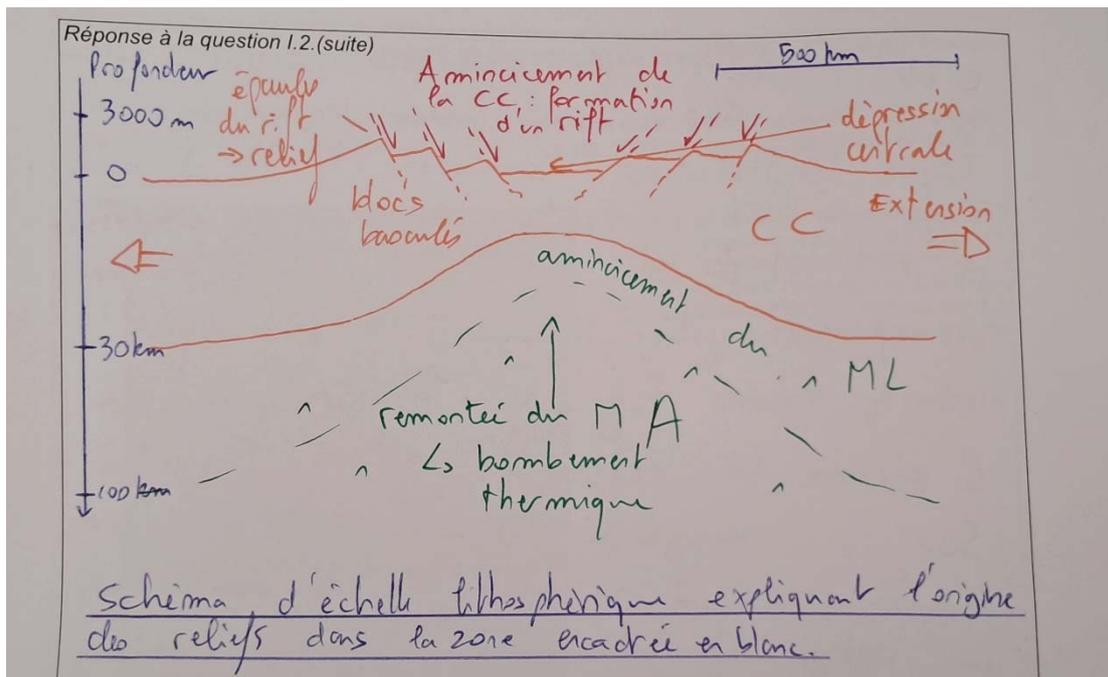
Réponse à la question 1.2.

Les reliefs présents dans le secteur d'étude montrent deux particularités : une dépression étroite (le rift) et des haut plateaux (éthiopien et somalien). Cette configuration est expliquée par la combinaison de deux mécanismes :

- une subsidence tectonique, où l'amincissement de la croûte continentale (liée au fonctionnement des failles normales) entraîne une densification de la colonne de roche et donc cet enfoncement.
- un bombement thermique, où l'amincissement de la lithosphère en réponse à l'étirement provoque une remontée de l'asténosphère (peu dense) et donc un soulèvement régional (épaulement du rift).

Réponse à la question 1.2.(suite)

Une production jugée satisfaisante



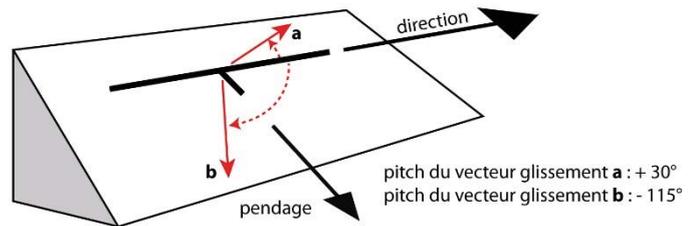
A la suite d'un séisme dont l'épicentre est situé dans la zone encadrée en rouge (voir Figure 1), on cherche à déterminer le jeu de la faille correspondante. Les données du mécanisme au foyer sont indiquées en **figure 2**.

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Date :** 30/08/2014  
**Heure :** 12h 53m 0,69 sec  
**Direction :** N 150  
**Pendage :** 70°  
**Pitch du vecteur glissement :** -25°



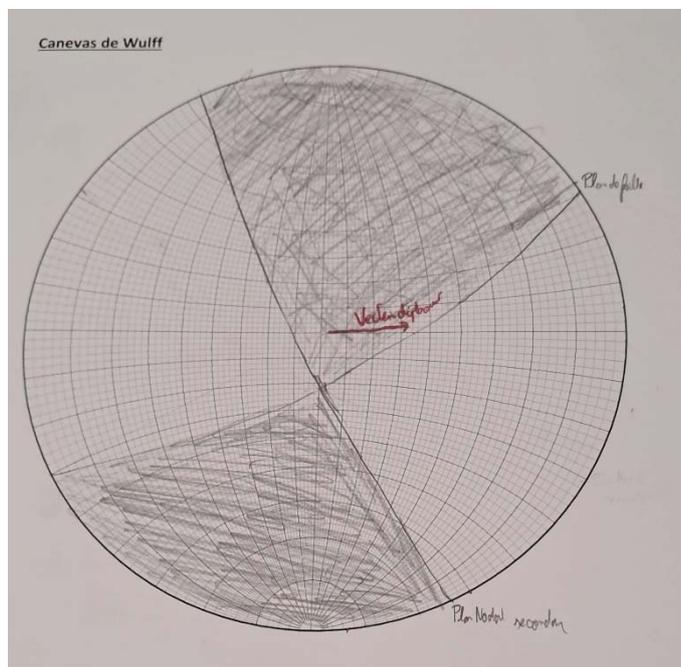
**Figure 2. Données du mécanisme au foyer correspondant au séisme du 30 août 2014 (Mulibo et al. 2022) et relation entre la valeur du pitch et le sens du glissement pour deux exemples théoriques a et b.**

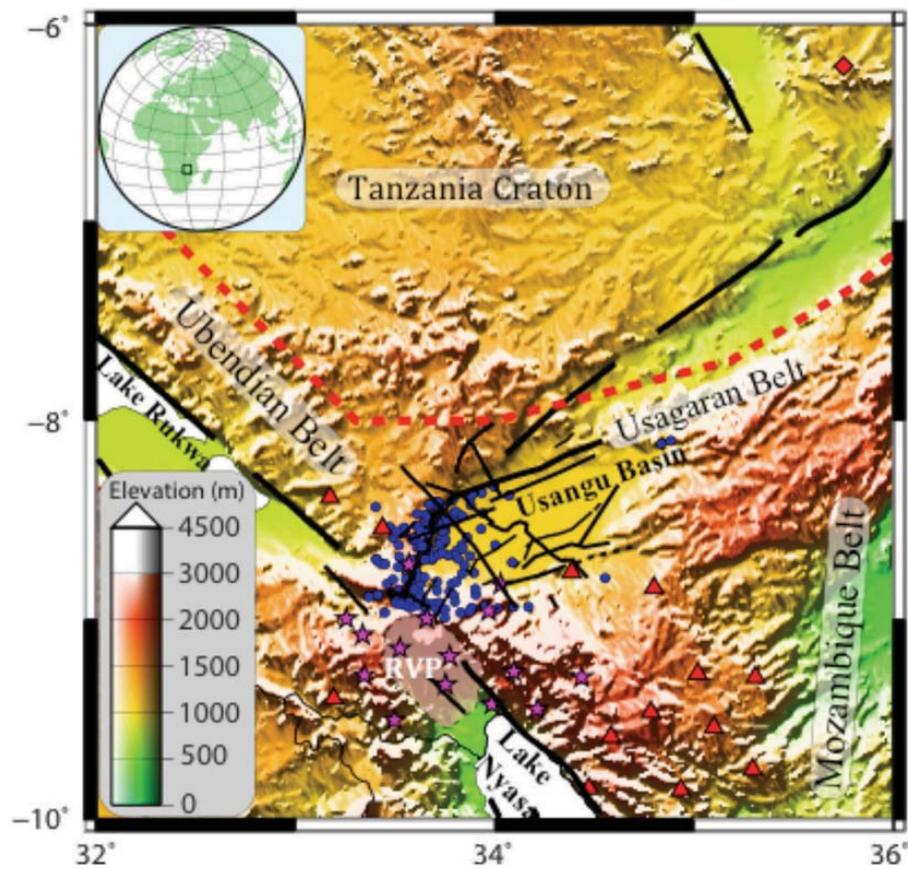
**Question I.3.** A l'aide du canevas de Wulff, du papier calque et de la punaise fournis, vous construirez le mécanisme au foyer du séisme du 30 août 2014. Vous en déduirez le jeu de la faille.

Réponse à la question I.3. -> canevas de Wulff à rendre avec la copie

Le mécanisme du séisme du 30 août 2014 correspond à une faille décrochante.

Une production jugée satisfaisante



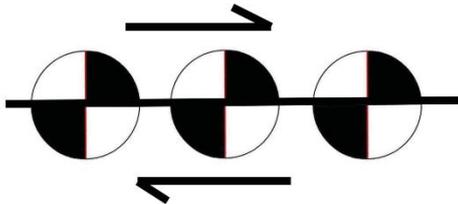


**Figure 3. Sismicité à proximité du Bassin Usangu. Les ronds jaunes localisent des séismes identiques à celui du 30 août 2014. Les ronds bleus et les étoiles violettes correspondent à d'autres types de séismes. Les triangles rouges indiquent les stations sismiques (Mulibo et al. 2022)**

**Question I.4.** D'autres séismes du même type que celui du 30 août 2014 ont été détectés dans cette même zone, ils sont présentés en **Figure 3** (points jaunes). Vous préciserez en quoi ces données permettent d'affiner la réponse à la question I.3.

Réponse à la question I.4.

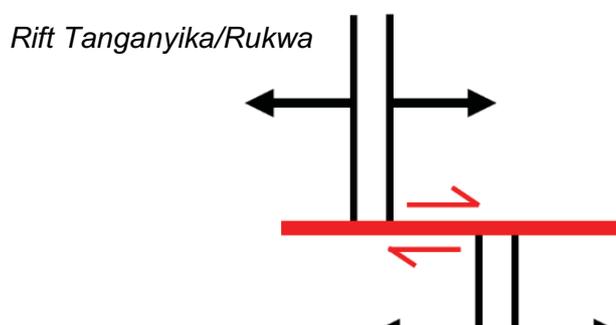
La figure 3 montre plusieurs séismes identiques à celui du 30 août 2014 dont la distribution montre un alignement Est-Ouest. Cet alignement matérialise la faille et permet de privilégier l'un des deux plans nodaux du mécanisme au foyer (le plan Est-Ouest). Cette déduction amène à préciser le jeu de la faille impliquée : un **décrochement dextre**.



**Question I.5.** Vous formulerez une hypothèse expliquant l'existence de ce type de faille dans ce secteur (un schéma est attendu)

Réponse à la question I.5.

Le secteur étudié en figure 2 est une zone de jonction entre deux rifts (Tanganyika/Rukwa et Malawi). Or ces deux rifts sont décalés. La zone décrochante dextre pourrait correspondre à une faille de transfert (zone transformante) accommodant le jeu de ces deux axes extensifs non continus.



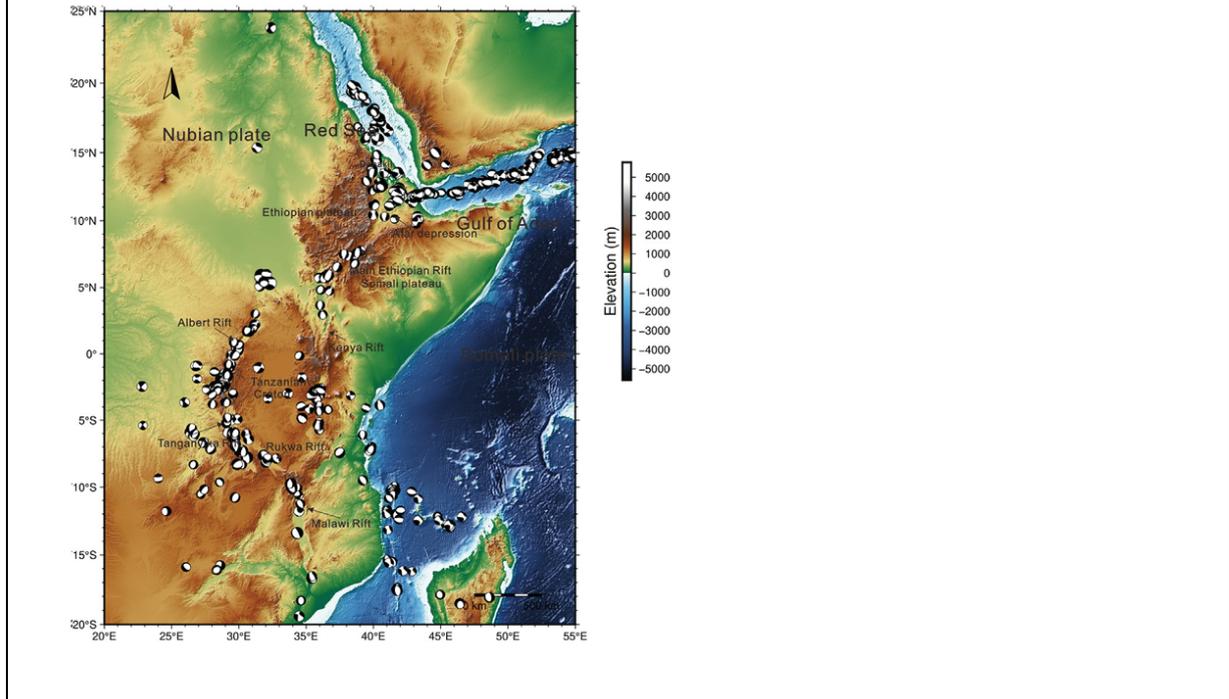
*Faille transformante*

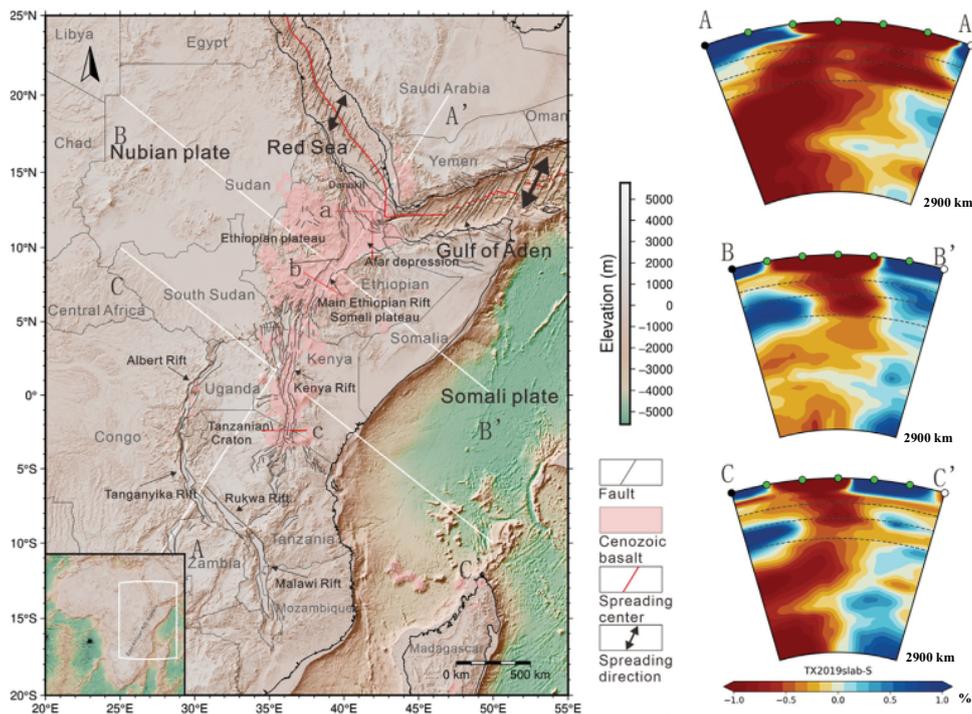
*Rift Malawi*

**Question I.6.** Vous indiquerez par des hachures rouges sur la **Figure 1 p.2** une/d'autre(s) zone(s) susceptible(s) de présenter une dynamique identique. Vous justifierez cette proposition.

*Réponse à la question I.6. : compléter la Figure 2 (page 2) – commentaire dans ce cadre*

*La figure 2 montre, plus au Nord un décalage conséquent entre les rift Albert et Ethiopien. Une zone transformante senestre, est donc susceptible de se former entre ces deux rifts.*





**Figure 4. Carte tectonique et de tomographie sismique dans la zone du rift Est-africain (Lu et al. 2019). En rose : volcanisme pré-rift.**

**Question I.7.** Vous précisez le mode d'obtention des coupes de tomographie sismique présentées en **Figure 4**.

Réponse à la question I.7.

Le principe de la tomographie est de comparer les temps d'arrivée réels des ondes sismiques à des temps d'arrivée calculés à partir d'une référence. La référence classiquement utilisée est le modèle PREM (Preliminary Reference Earth Model) où chaque enveloppe de la Terre est caractérisée par une vitesse sismique (ou une gamme de vitesses). L'utilisation de plusieurs séismes naturels permet d'identifier des anomalies en profondeur (écarts par rapport au modèle).

Réponse à la question I.7. (suite)

Ces anomalies sont positives (vitesses plus importantes) ou négatives (vitesses plus faibles) et peuvent être interprétées par des variations de densité. Or, en considérant le manteau minéralogiquement homogène (péridotite), seules des variations de température peuvent expliquer ces variations.

Ainsi une anomalie négative correspond à une portion de manteau anormalement chaude (peu dense). Cette situation correspond à une remontée mantellique. Du manteau profond remonte en se refroidissant très peu, il sera donc plus chaud que les roches qui l'entourent.

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question I.8.** Vous proposerez une interprétation des anomalies de vitesses observées dans la Figure 4.

*Réponse à la question I.8.*

Les trois coupes tomographiques montrent une forte anomalie négative dont la base se situe à la limite manteau/noyau (2900 km). Elle peut être interprétée comme un panache mantellique (solide) chaud remontant vers la surface. La tête du panache est centrée à l'aplomb de la branche orientale du rift.

**Question I.9.** A partir de la réponse à la question I.8, vous proposerez des mécanismes probables pour l'initiation du rifting dans les deux zones suivantes :

- le rift éthiopien
- le rift de Tanganyika

*Réponse à la question I.9.*

Les données de tomographie sismique témoignent d'une remontée mantellique enracinée à la base du manteau : un panache. La tête de ce panache est située à l'aplomb des rift éthiopien et kényan. Par ailleurs, ce secteur est le lieu d'un intense volcanisme au Cénozoïque. On peut,

NOM :

PRENOM :

Salle :

dans cette zone (branche orientale du rift Est-africain) suggérer un mécanisme de rifting où la remontée mantellique induit le volcanisme en surface puis déclenche le rifting par érosion thermique de la base de la lithosphère et glissement gravitaire.

En revanche, la zone du rift Tanganyika (branche occidentale) ne montre pas ces caractéristiques, il semblerait ici que seules les contraintes aux limites soient responsables de l'extension. Contraintes qui se sont vraisemblablement propagées depuis la branche orientale. Ici ce n'est pas la remontée du manteau qui initie l'extension.

La formation d'un rift peut être expliquée par l'isostasie. On considère une lithosphère continentale à l'équilibre isostatique constituée de :

-30 km de croûte continentale de masse volumique moyenne de  $2,7 \text{ g/m}^3$

-70 km de manteau lithosphérique de masse volumique de  $3,3 \text{ g/m}^3$

**Question I.10.** Vous calculerez la valeur de la subsidence tectonique (en km) pour un amincissement de 50% de la croûte continentale sans prendre en compte un remplissage par l'eau ou les sédiments.

Réponse à la question I.10.

L'équilibre isostatique implique une égalité des pressions ( $P = \rho \cdot g \cdot h$ ) exercées à la base de colonnes de roches au niveau d'une surface repère dite surface de compensation. Pour simplifier les calculs, celle-ci peut être située à la base de la croûte continentale de la colonne 1.

$$P_1 = P_2$$

$$(\rho_C \cdot g \cdot h_{C1}) = (\rho_M \cdot g \cdot h_M) + (\rho_C \cdot g \cdot h_{C2}) + (\rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot h_S)$$

Simplification par  $g$  et non prise en compte du remplissage par l'eau :

$$(\rho_C \cdot h_{C1}) = (\rho_M \cdot h_M) + (\rho_C \cdot h_{C2})$$

$$\text{or } h_M = h_{C1} - h_{C2} - h_S$$

$$(\rho_C \cdot h_{C1}) = \rho_M \cdot (h_{C1} - h_{C2} - h_S) + (\rho_C \cdot h_{C2})$$

$$(\rho_C \cdot h_{C1}) = \rho_M \cdot h_{C1} - \rho_M \cdot h_{C2} - \rho_M \cdot h_S + (\rho_C \cdot h_{C2})$$

$$(\rho_C \cdot h_{C1}) + \rho_M \cdot h_S = \rho_M \cdot h_{C1} - \rho_M \cdot h_{C2} + (\rho_C \cdot h_{C2})$$

$$\rho_M \cdot h_S = \rho_M \cdot h_{C1} - \rho_M \cdot h_{C2} + (\rho_C \cdot h_{C2}) - (\rho_C \cdot h_{C1})$$

$$h_S = [\rho_M \cdot h_{C1} - \rho_M \cdot h_{C2} + (\rho_C \cdot h_{C2}) - (\rho_C \cdot h_{C1})] / \rho_M$$

$$h_S = (3,3 \cdot 30 - 3,3 \cdot 15 + 2,7 \cdot 15 - 2,7 \cdot 30) / 3,3$$

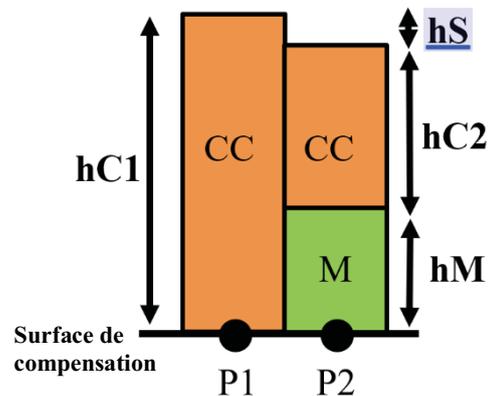
$$h_S = (99 - 49,5 + 40,5 - 81) / 3,3$$

$$h_S = (99 - 49,5 + 40,5 - 81) / 3,3$$

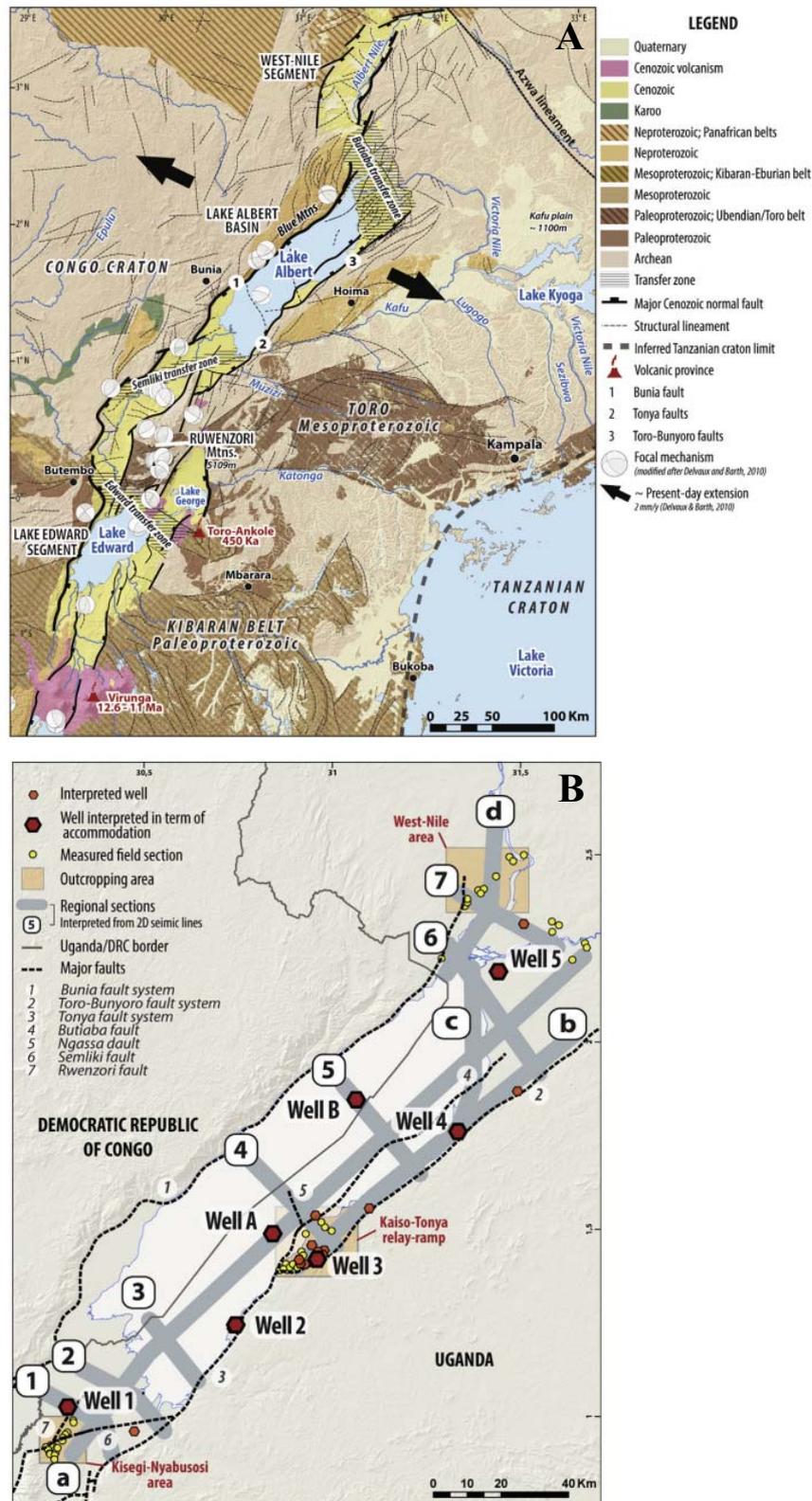
$$h_S = 9 / 3,3$$

$$h_S = 2,73 \text{ km}$$

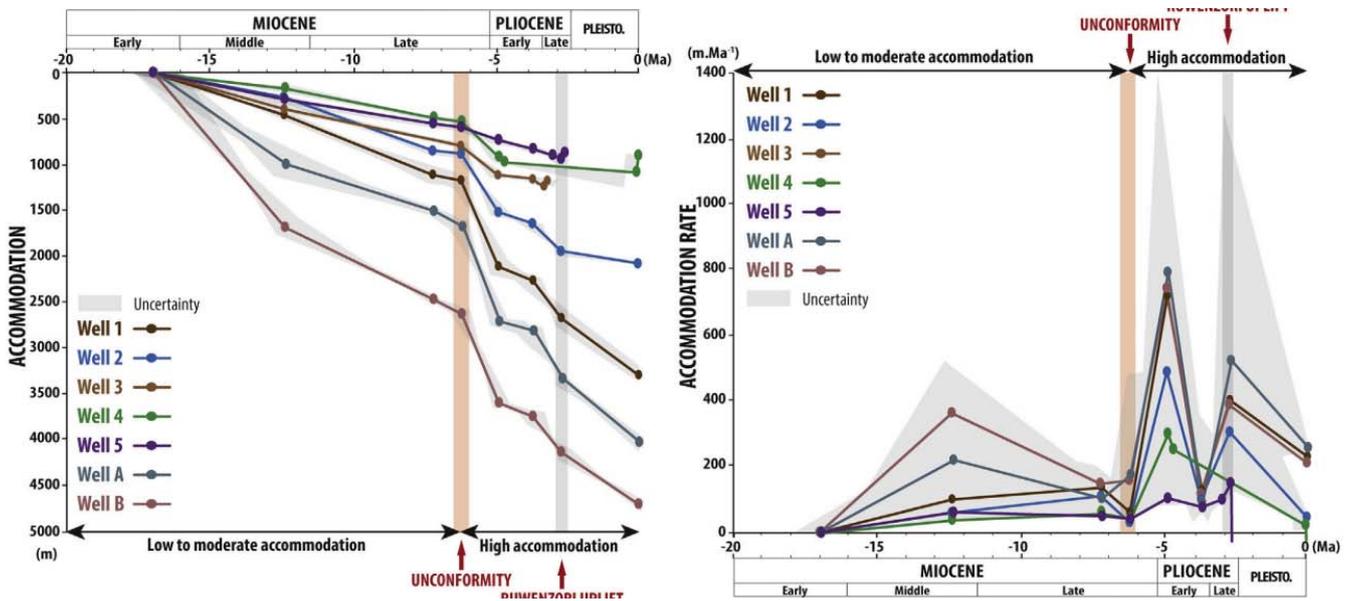
La subsidence tectonique est de 2,73 km



Des forages ont été réalisés dans le bassin du lac Albert (cadre violet de la Figure 1). La **Figure 5** localise le secteur étudié et indique la position des différents puits (*well* en anglais) réalisés.



Les données issues des puits ont permis une interprétation en termes de variation d'accommodation (**Figure 6**).



**Figure 6.** Evolution de l'accommodation et du taux d'accommodation au cours du temps pour le bassin du lac Albert. Reconstitutions déduites des données issues des puits (well) localisés en Figure 5 (Simon et al. 2017).

**Question I.11.** Vous définirez ce qu'est l'accommodation ; un schéma est attendu.

Réponse à la question I.11.

L'accommodation est définie comme l'espace disponible total pour la sédimentation dans un bassin sédimentaire. Cet espace est dépendant de facteurs climatiques (eustatisme ou niveau de base) et tectonique (subsidence).

**Question I.12.** Vous expliquerez comment ont été reconstituées les variations d'accommodation à partir des données de forages.

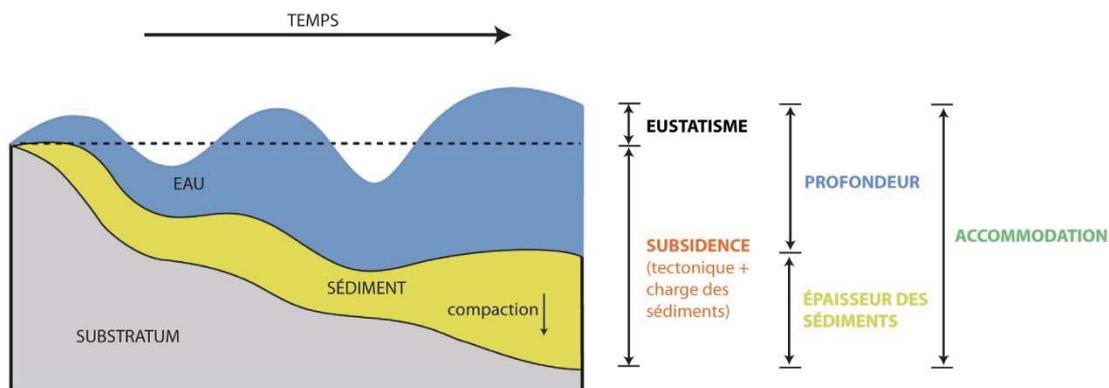
Réponse à la question I.12.

Les forages permettent d'accéder à deux informations :

- l'épaisseur des sédiments (que l'on corrige de l'effet de la compaction)
- la nature des roches sédimentaires.

Réponse à la question I.12. (suite)

L'analyse des roches sédimentaires (sédimentologie) le long du forage permet d'en reconstituer le faciès et donc de déterminer la paléobathymétrie de mise en place des sédiments au moment du dépôt. La connaissance de cette profondeur (espace encore disponible) ainsi que celle de l'épaisseur des sédiments (espace comblé) renseignent sur l'espace disponible total : l'accommodation.



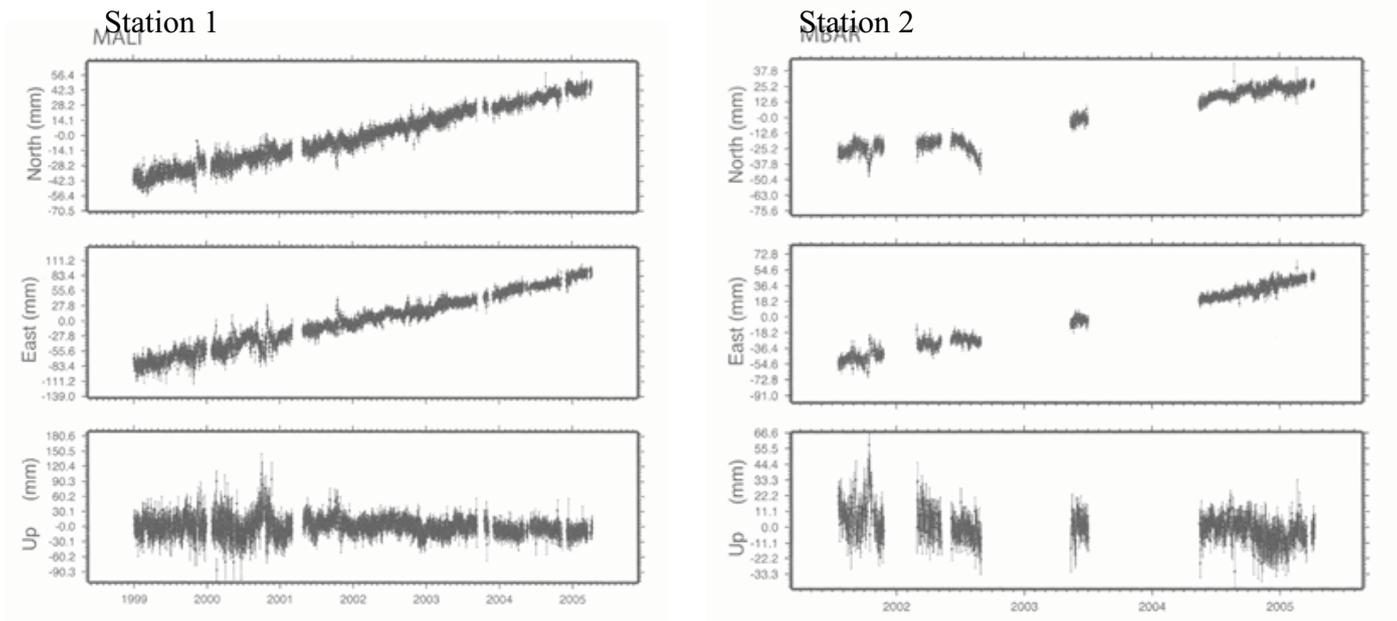
**Question I.13.** Vous analyserez les variations du taux d'accommodation observées en Figure 6 en lien avec l'histoire géologique de cette région.

Réponse à la question I.13

Le taux d'accommodation évolue en deux phases :

- un taux faible à modéré pendant le Miocène
- une accélération depuis la fin du Miocène

Cet à-coup n'est pas enregistré de la même manière d'un puits à l'autre, cela sous entend un contrôle tectonique (et non climatique, dont l'influence serait identique en tout point). Cette évolution de l'accommodation correspond au fonctionnement des failles normales, responsables de la subsidence du rift (voir figure 5).



**Figure 7. Positions GPS pour deux stations (1 et 2) au cours du temps. Les stations sont localisées en Figure 8. Chaque composante (Nord-Sud, Est-Ouest, verticale) est indiquée séparément (Calais et al. 2006).**

**Question I.14.** Des données GPS sont présentées en **Figure 7**. Vous décrivez brièvement le mode d'obtention de ces données.

Réponse à la question I.14

Le principe du GPS (Global Positioning System) : une constellation de 30 satellites envoie en permanence des signaux codés dans toutes les directions de l'espace, à la vitesse de la lumière ( $300\,000\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Lorsqu'un récepteur, situé sur Terre, reçoit le signal d'un satellite, il compare l'instant d'arrivée et l'instant d'émission par le satellite (via des horloges internes). La durée d'émission du signal étant ainsi calculée, la distance satellite-récepteur peut être précisée (la vitesse du signal étant connue). Néanmoins, un seul satellite ne suffit pas pour positionner un point sur Terre. Il reste en effet d'innombrables possibilités, localisées sur une surface sphérique, dont le rayon est égal à la distance calculée (le satellite étant au centre de la sphère). Il faut au moins trois satellites pour localiser un point précis. En pratique, quatre sont utilisés car l'imprécision des horloges peuvent conduire à des incertitudes.

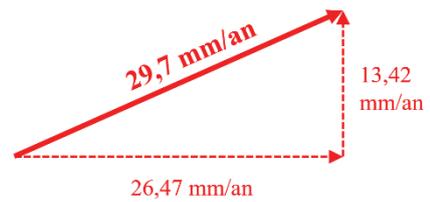
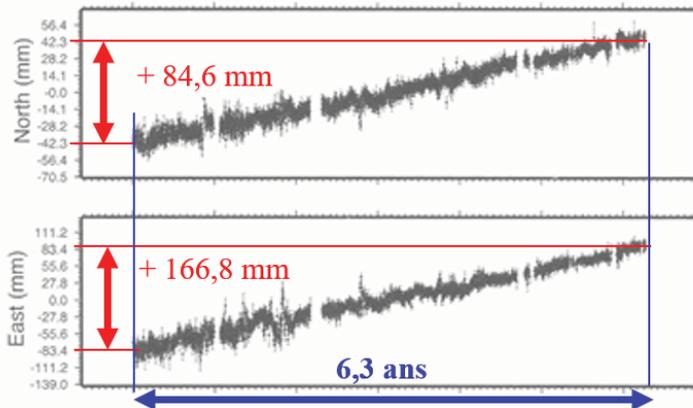
Pour estimer un déplacement (sens et vitesse), on effectue plusieurs positionnements sur un intervalle de temps donné (quelques dizaines d'années).

**Question I.15.** Vous tracerez, sur la Figure 8, les vecteurs GPS correspondants aux stations 1 et 2. Vous explicitez la méthode suivie.

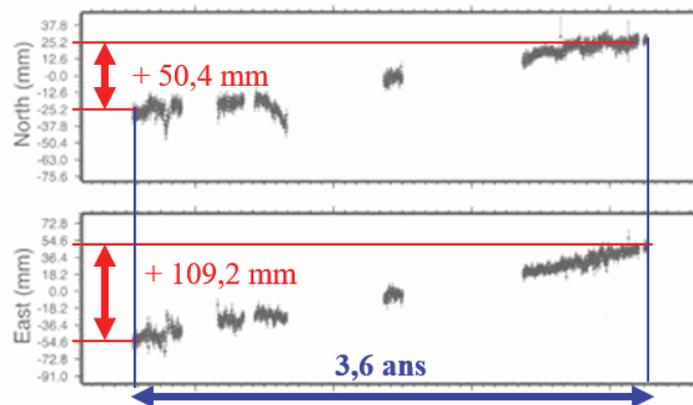
Réponse à la question I.15. (vecteurs sur la figure 8 (page 16) – commentaire dans ce cadre)

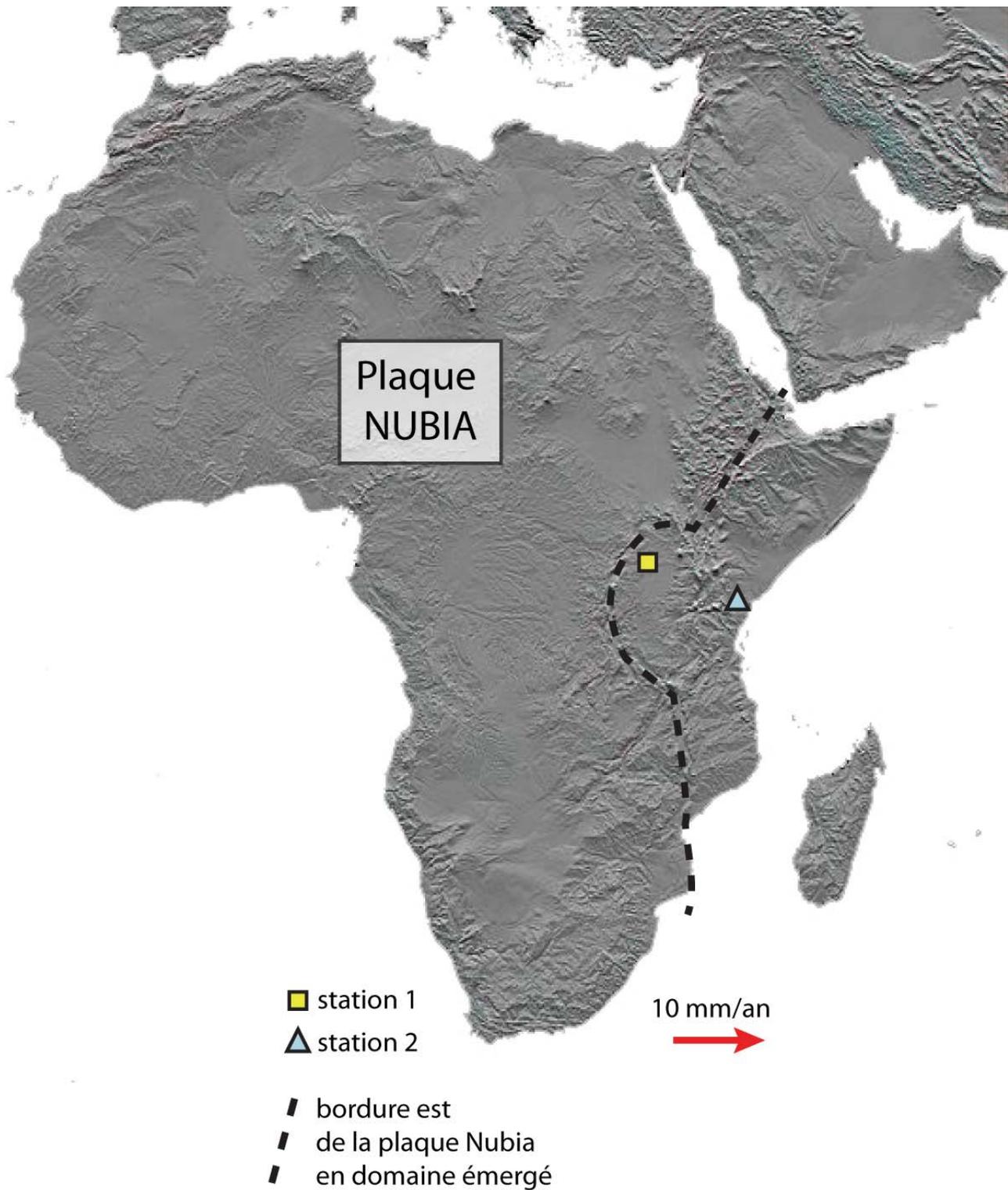
Les composantes Est-Ouest et Nord-Sud permettent, par le calcul, de connaître la norme du vecteur déplacement en utilisant le théorème de Pythagore.

Station 1



Station 2



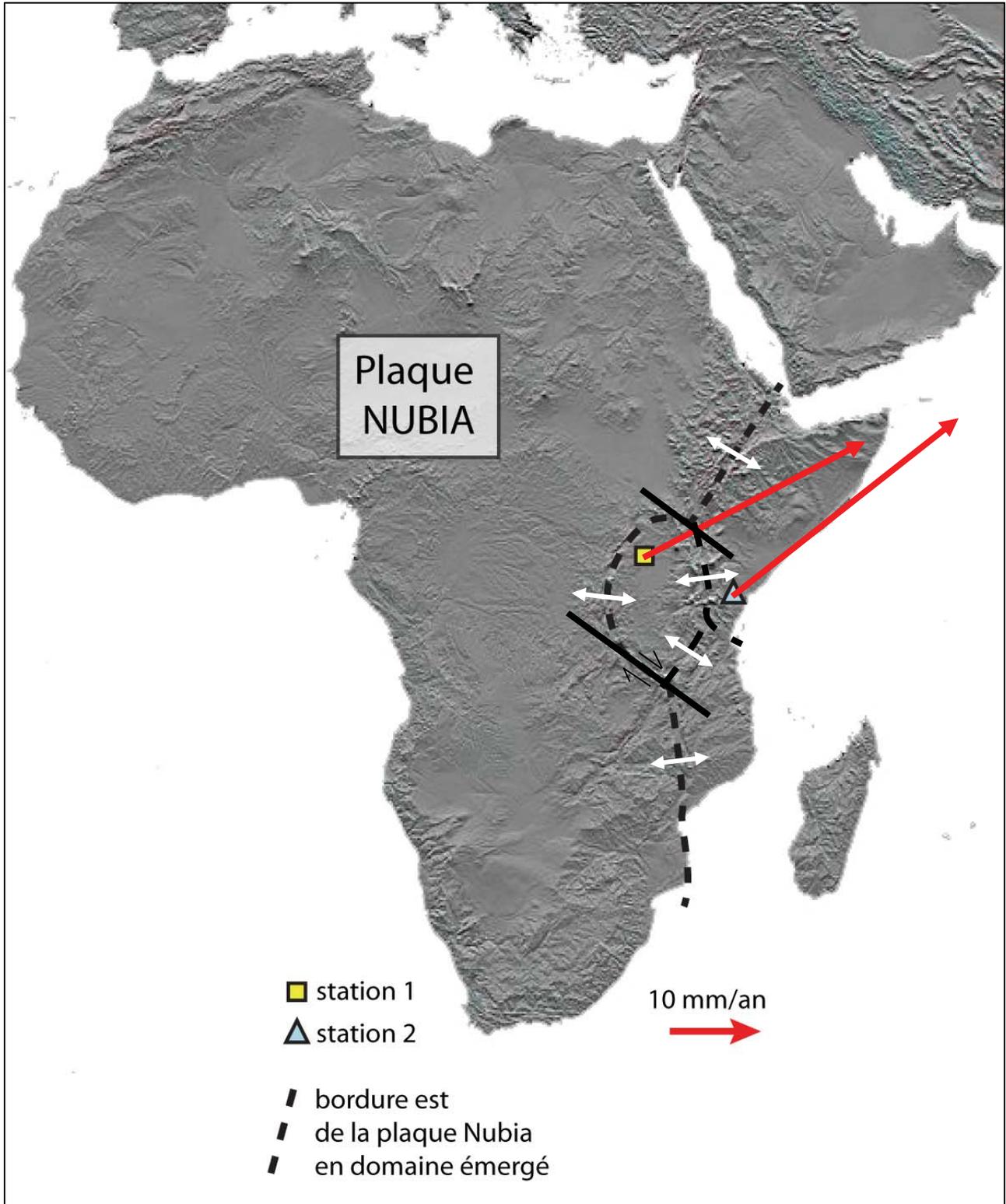


*Figure 8. Fond de carte topographique de l'Afrique et position des stations GPS 1 et 2.*

NOM :

PRENOM :

Salle :



**Question I.16.** A l'aide des résultats GPS et de la carte, vous discuterez d'un possible déplacement relatif entre les deux stations.

Réponse à la question I.16.

Il y a une différence de vitesse de 3,7 mm/an (= 33,4 – 29,7) entre les deux stations, cela sous entend donc un déplacement relatif. La station 2 (située à l'Est de la première) montrant la vitesse la plus importante, ce déplacement relatif est une **divergence**.

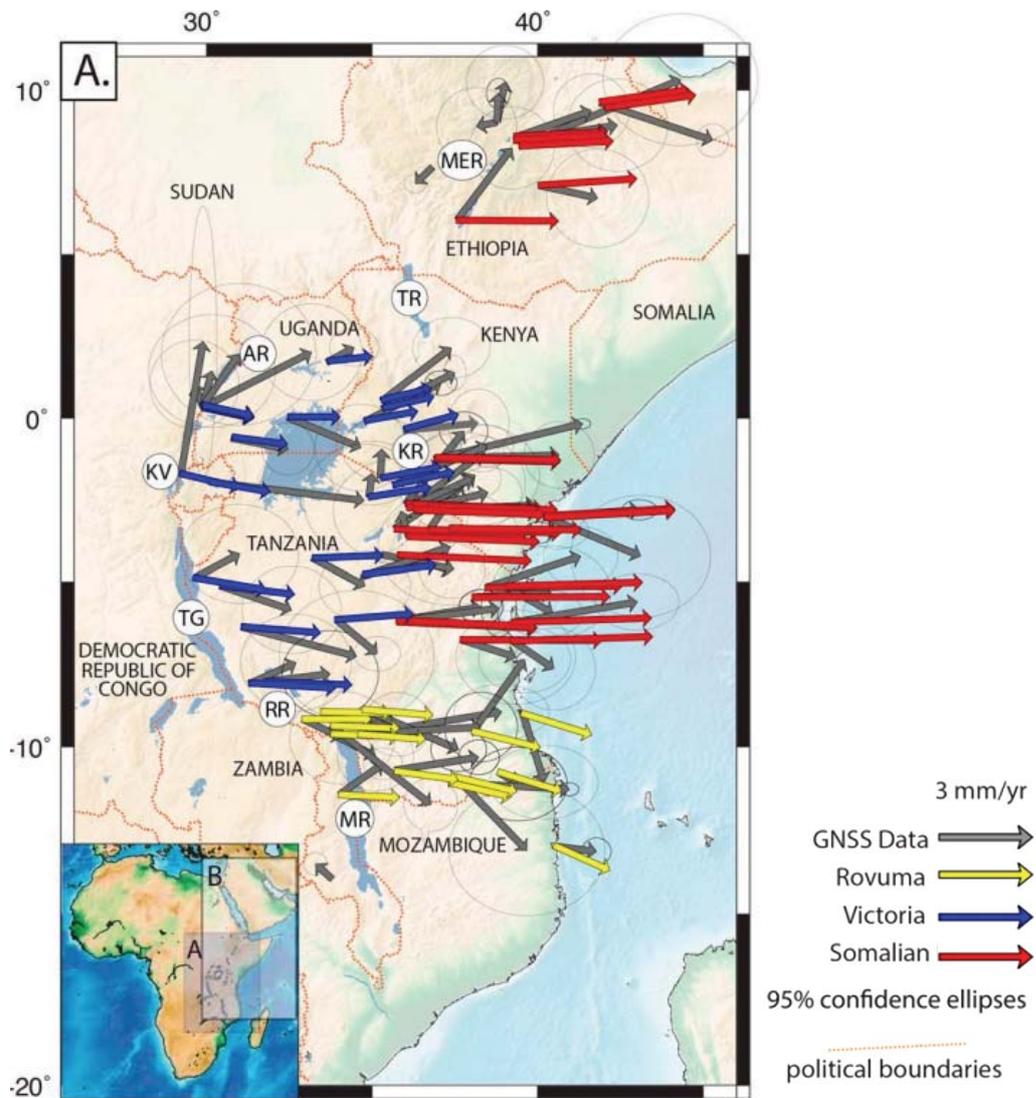


Figure 9. Donnée GPS le long du Rift Est africain, en considérant la plaque Nubia fixe. (Rajaonarison et al. 2021)

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question I.17.** Des données complémentaires de même type (issues d'autres stations GPS) sont présentées en **Figure 9**. Elles représentent les vecteurs de déplacement par rapport à la plaque Nubia, considérée fixe. A partir de ces informations, vous complèterez la **Figure 8** en y représentant toutes les limites de plaques en présence ainsi que les mouvements relatifs entre celles-ci, par des flèches. Vous expliquerez votre raisonnement en intégrant notamment les informations des questions **I.1 à I.5**.

*Réponse à la question I.17 (représentation des limites de plaques et leurs mouvements en figure 8, commentaire dans ce cadre)*

L'ensemble des vecteurs GPS montre un déplacement vers l'Est par rapport à la plaque Nubia (la frontière est donc divergente). Par ailleurs, tous les vecteurs n'ont pas la même norme. Par exemple, ceux du secteur somalien (en rouge) ont une norme plus grande que celle des vecteurs de la zone Victoria (en bleu). Cela indique la présence de deux microplaques dont la frontière est également divergente. La microplaque somalienne montre un déplacement plus rapide que celui de la zone Rovuma. Les réponses aux questions I.1 à I.5 indiquent un régime extensif dans ces mêmes frontières ainsi que des zones transformantes accommodant ces déplacements relatifs. Le système du rift Est africain correspond donc à trois microplaques qui s'éloignent de la plaque Nubia.

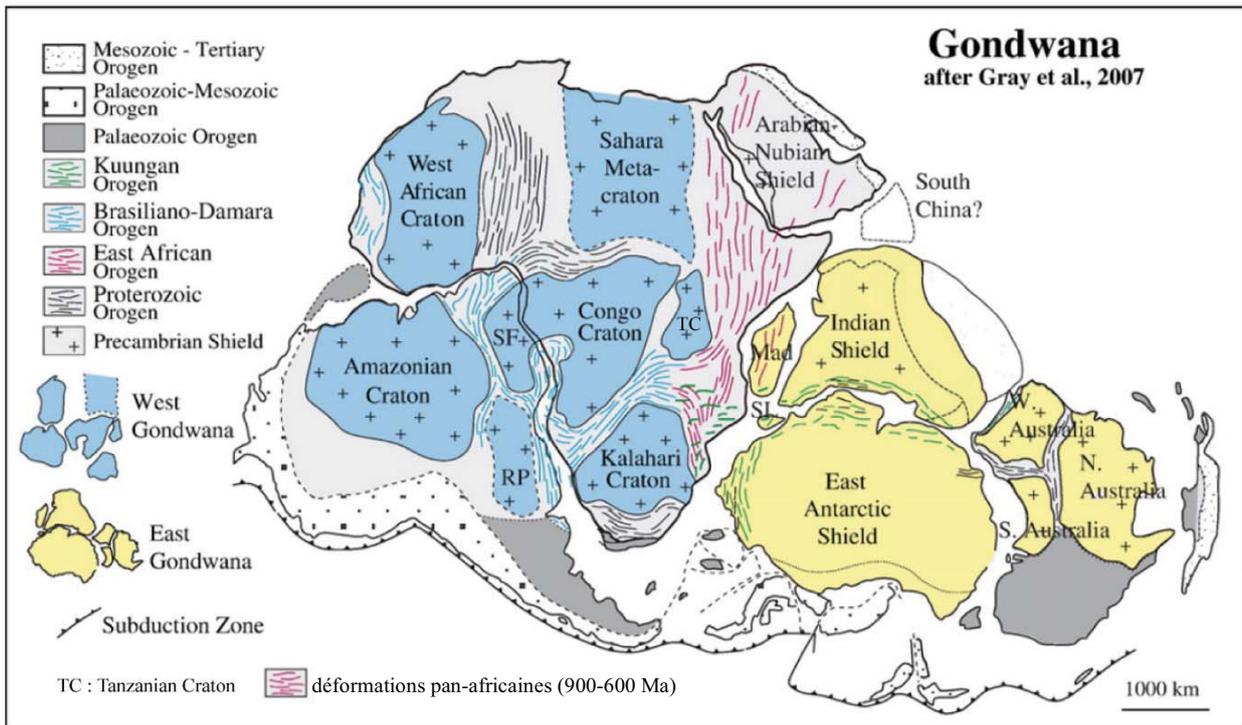


Figure 10. Carte structurale du Gondwana (Gray et al. 2007)

**Question I.18.** Vous montrerez comment les informations de la Figure 10 peuvent expliquer la géométrie du système d'extension Est africain.

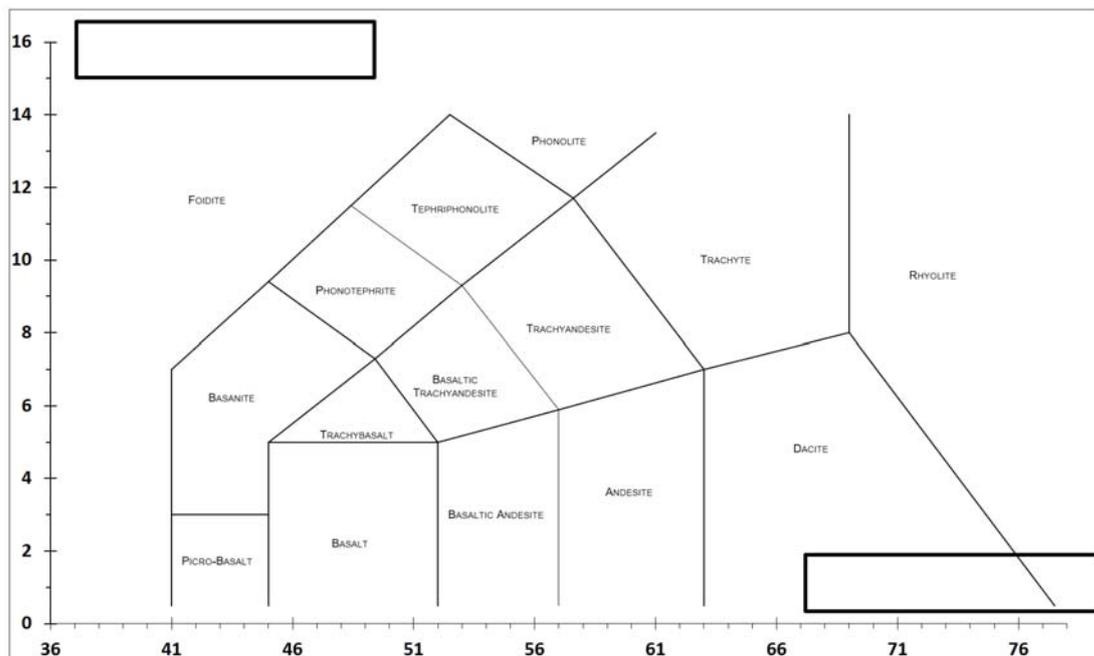
La figure 10 montre un parallélisme fort entre les structures anciennes (déformations pan-africaines) et les branches du rift est africain. Par ailleurs le cratons tanzanien (croûte continentale archéenne, froide et résistante) correspond à l'une des microplaques identifiées en question I.16. Ainsi, ces zones de faiblesse et de résistance anciennes sont un cadre structural important pour l'extension est africaine : c'est l'héritage structural.

## Partie II. Le volcanisme est-africain

Vous avez étudié le contexte géodynamique global de l'Afrique de l'Est. Nous vous proposons dans cette partie de vous focaliser sur le volcanisme actuel dans la zone encadrée en vert sur la **Figure I.1**.

Des échantillons ont été récoltés dans la région ; vous avez à disposition les compositions en éléments majeurs et traces (Tableau 1), et trois échantillons de roches et la lame mince correspondante (Poste 1, Pétrologie)

**Question II.1.** Dans le diagramme fourni (**Figure 11**), vous identifierez les axes correspondants dans les cadres noirs correspondants. Vous préciserez quelle(s) information(s) nous apporte cette représentation graphique. Vous reporterez les compositions du tableau 1 et vous conclurez sur le processus pétrologique qui relie les différents échantillons.



**Figure 11 : Diagramme de classification des magmas (Lebas et al., 1992).**

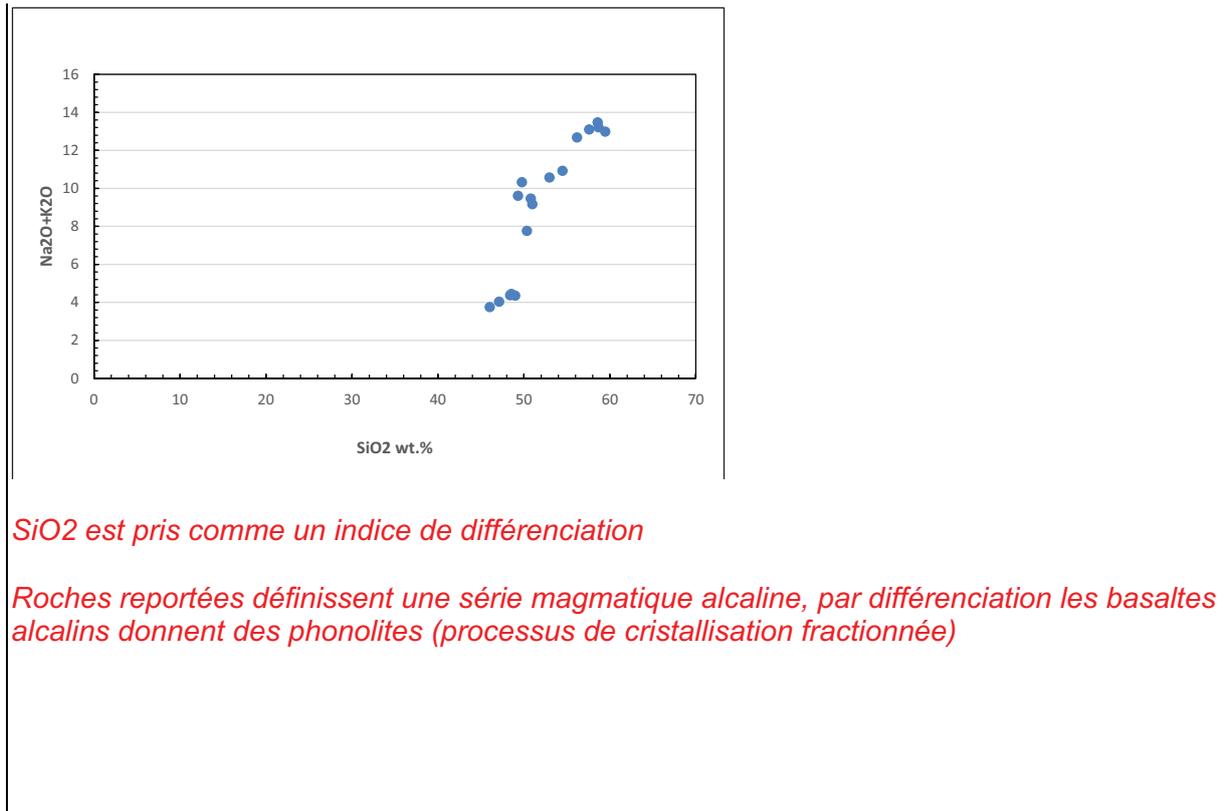
Réponse à la question II.1

*Diagramme TAS c'est  $Na_2O + K_2O = f(SiO_2)$*

NOM :

PRENOM :

Salle :



### **ATELIER 1 : ROCHES MAGMATIQUE (20 min)**

**Question II.2.** Réalisez une identification raisonnée de trois échantillons venant des roches du tableau 1 (roche et lames minces correspondantes). Vous réaliserez un schéma de la lame mince **de l'échantillon 1 uniquement**.

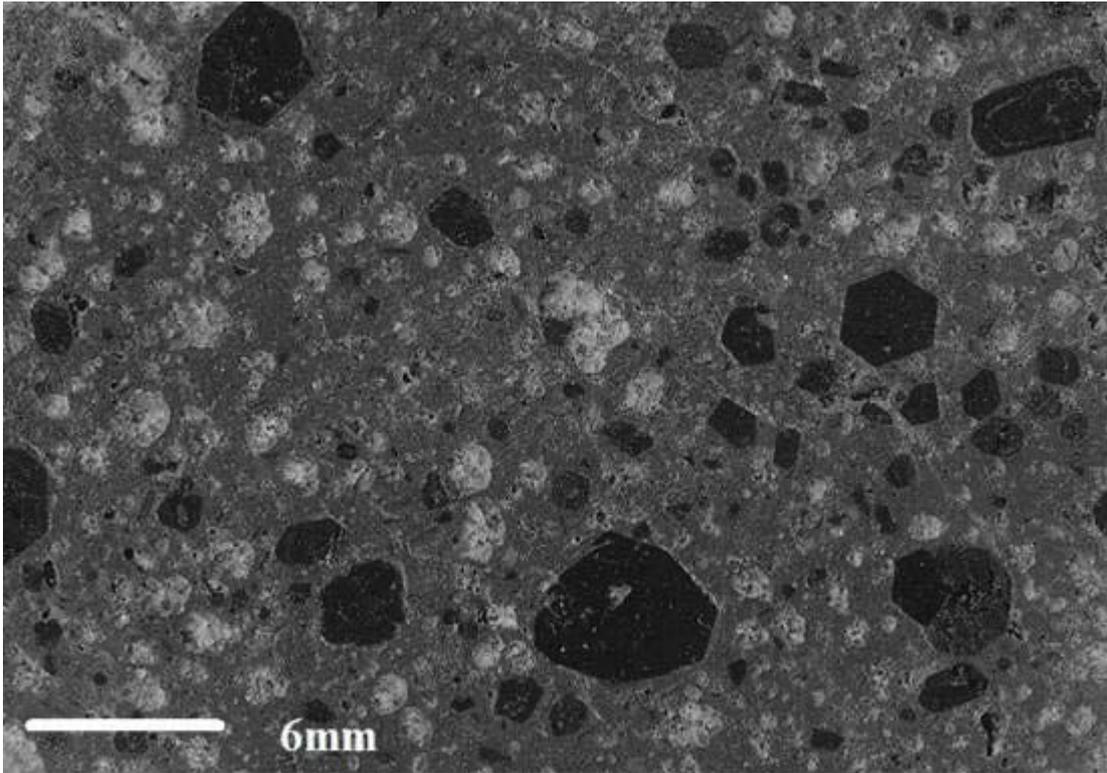
Réponse à la question II.2.

*Les 3 échantillons étaient : Basalte, Tephrite à leucite, Phonolite à sanidine*

NOM :

PRENOM :

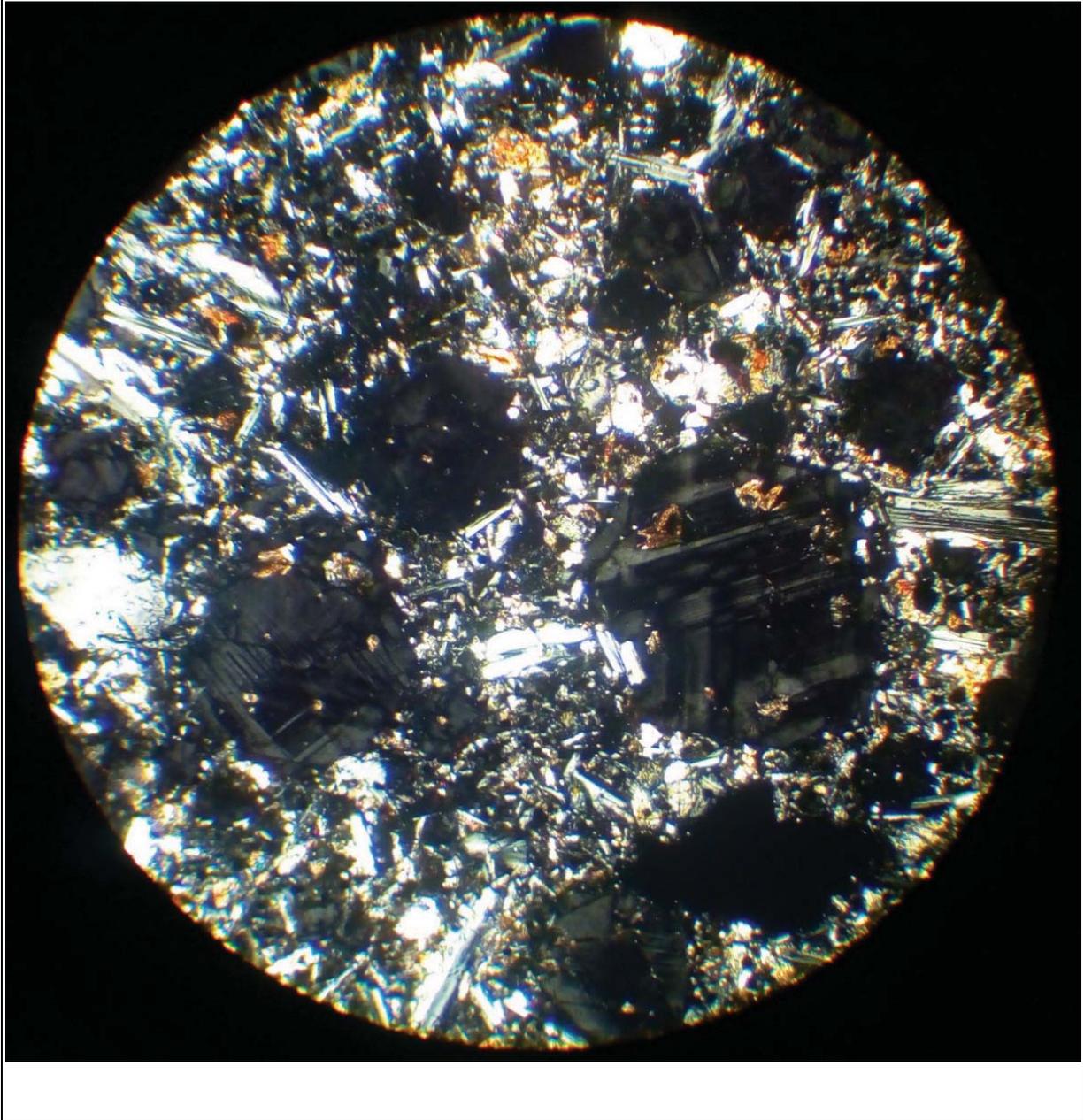
Salle :



NOM :

PRENOM :

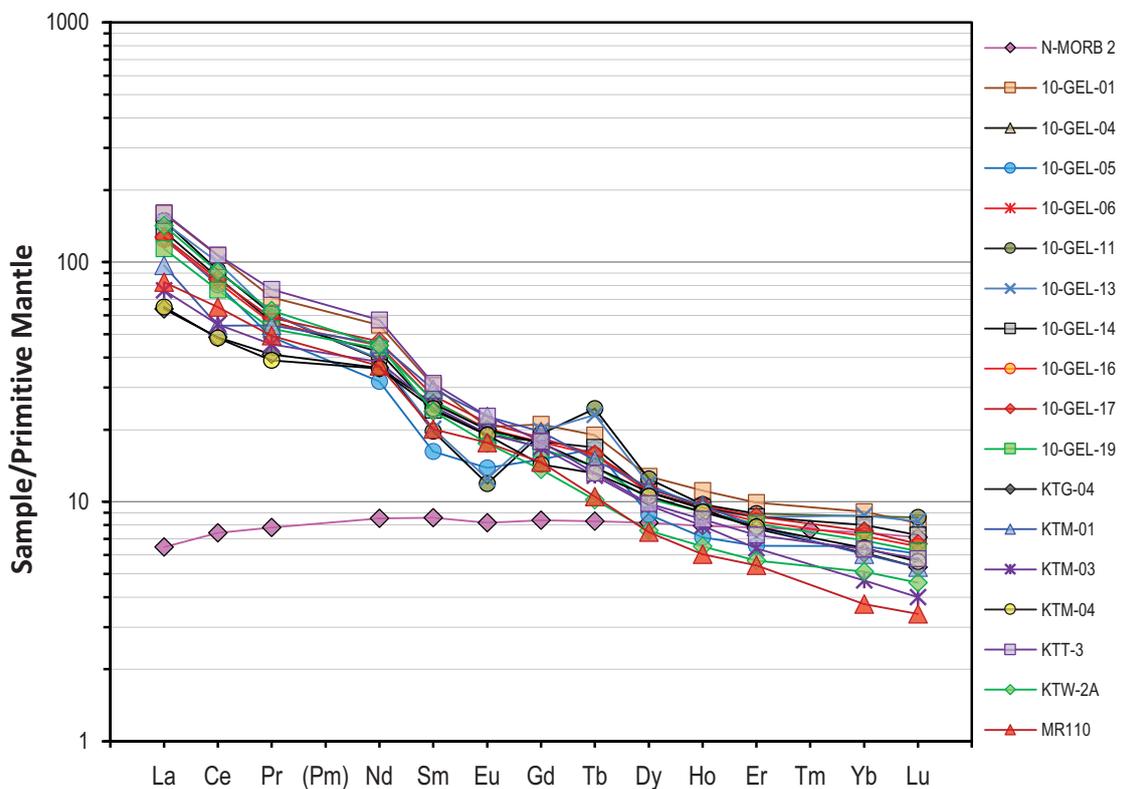
Salle :



*Réponse à la question II.2. (suite) (schéma à réaliser dans l'encadré bleu)*



**Question II.3.** Le **tableau 1** vous donne aussi accès aux compositions en certains éléments traces. La **Figure 12** représente une partie de ces données. Vous explicitez les axes, en particulier (1) ce que signifie le rapport « *échantillon / manteau primitif* » en ordonnée, (2) de quels éléments il s'agit en abscisse et comment sont ordonnés ces éléments et (3) vous représenterez le spectre du manteau primitif sur la figure.



**Figure 12 : Spectre d'éléments traces des magmas étudiés.**

**Réponse à la question II.3**

*Sample / primitive mantle = normalisation par rapport au manteau primitif pour ne voir que les événements postérieurs = différenciation de la terre primitive par extraction des croûtes*

*Abscisse = Terres rares = éléments classés par ordre d'incompatibilité décroissante de gauche à droite*

*Spectre MP = droite à 1 dans la figure*

**Question II.4.** Vous préciserez quelle(s) information(s) sur la source des magmas nous donne cette représentation. En particulier vous comparerez les résultats avec le spectre des N-MORB représenté en rose.

**Réponse à la question II.4**

*MP → FP → liquide enrichi en éléments incompatibles = toutes les TR, mais davantage en TR légères, les plus incompatibles = spectre typique d'un basalte de type OIB = fusion du manteau primitif (spectre plat)*

*Spectre MORB = enrichi en TR MAIS moins et appauvri en TR légères = signe de la fusion d'un manteau source déjà appauvri par un épisode de FP*

**Question II.5.** On cherche à estimer le taux de fusion partielle ayant généré les magmas étudiés. Pour cela on vous donne l'équation de la loi de fusion partielle. D'après Shaw (1970), la loi de fusion partielle peut s'écrire mathématiquement sous la forme suivante :

$$C_L^i = C_0^i / [D_0^i + F(1 - D_0^i)] \quad \text{Equation 1}$$

Avec

$C_L^i$  = Concentration de l'élément i dans le liquide L à l'instant t

$C_0^i$  = Concentration de l'élément i dans le solide initial qui fond

$D_0^i$  = coefficient de partage d'un élément i donnée, dans l'assemblage minéralogique initial

F = taux de fusion partielle

L'équation 1 peut se simplifier pour isoler F ; vous justifierez la simplification faite. Puis vous calculerez le taux de fusion partielle ayant produit les magmas de la zone d'étude, sur la base des questions II.3 et II.4 et des données du tableau 1. Vous discuterez votre résultat.

**Réponse à la question II.5.**

*Si on prend un élément très incompatible =  $D \sim 0$*

*Simplification  $F = C_0^i / C_L^i$*

*Taux de fusion partielle en prenant en compte avec la gamme de valeur entre 50 ppm et 100 ppm dans le magma*

*$F = 1/50$  et  $1/100$  soit entre 0,01 et 0,02 = 1 à 2 % de taux de FP,*

*Taux typique des contextes de point chaud*

NOM :

PRENOM :

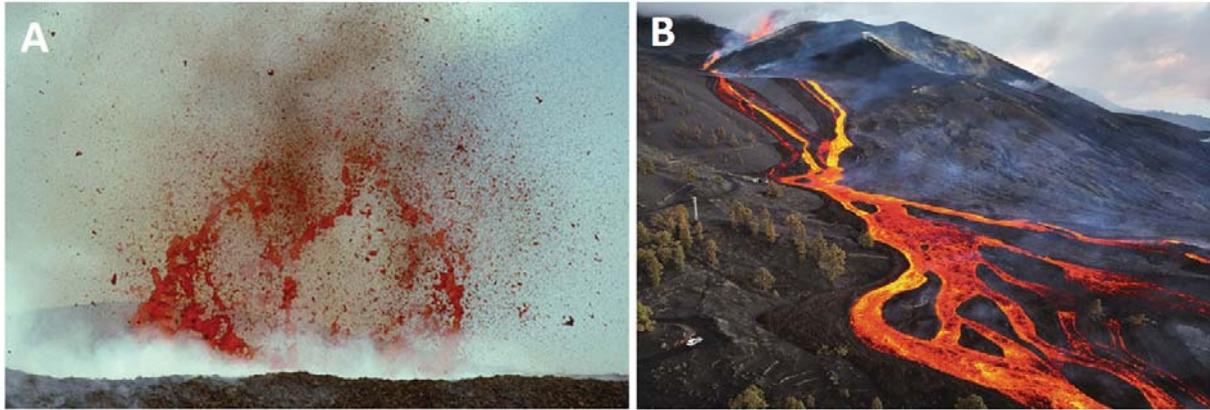
Salle :

**Question II.6.** On peut également retrouver dans la région des Komatiites, datées à 2.5 Ga. Ces roches proviennent également d'un processus de fusion du manteau mais avec un taux estimé autour de 50 %. (1) Vous comparerez avec le résultat obtenu à la question II.5 et (2) vous formulerez une hypothèse quant à l'origine de leur formation.

*50% >> 1-2 %*

*Origine archéenne = manteau plus chaud qui fond avant de se déshydrater*

On peut trouver des analogues naturels actuels des éruptions des volcans ayant produits les magmas dont les compositions sont reportées dans le Tableau 1. Ainsi, vous avez en **figure 13** deux photos d'éruptions récentes qui auraient pu être celles ayant donné les champs volcaniques étudiés.



**Figure 13 : A. Explosion strombolienne au Piton de la Fournaise, Novembre 2006. Photo: S. Gélabert. B. Coulée de lave prise à La Laguna, au nord-ouest du volcan Cumbre Vieja (île de la Palma). Photo: E. Morenatti**

Dans la suite de cette partie, on cherche à caractériser le régime d'écoulement dans le conduit, c'est-à-dire le comportement des bulles vis-à-vis du magma lors de la remontée entre le réservoir et la surface, ayant donné en surface les deux types d'éruption observées. Ce comportement des bulles va conditionner le style éruptif en surface en jouant sur différents paramètres.

Le comportement des bulles dans le conduit est en partie conditionné par la vitesse d'ascension des magmas dans le conduit. On vous propose, dans un premier temps, d'estimer la vitesse d'ascension des magmas. C'est un paramètre complexe à estimer lors d'une éruption. A l'aide de la chronométrie diffusive appliquée aux cristaux transportés par les magmas, il est possible d'estimer cette vitesse d'ascension des magmas dans les conduits. Le minéral le plus communément utilisé pour des magmas basaltiques est l'olivine dans laquelle on mesure la concentration en hydrogène (H) le long d'un transect entre le cœur et la bordure du minéral.

**Question II.7.** Vous émettez des hypothèses pour justifier l'utilisation de H comme traceur.

*Réponse à la question II.7.*

*H = H<sub>2</sub>O = élément volatil majeur des magmas = traceur des processus de dégazage*

**Question II.8.** Quelle loi physique permet de décrire la diffusion d'un élément chimique ?

*Réponse à la question II.8.*

*La loi de Fick*

**ATELIER 2 : POSTE INFORMATIQUE - vitesse d'ascension des magmas par application de la diffusion intracristalline (15 min)**

Vous avez à disposition au poste informatique (Atelier 2), une feuille excel. Par application de la méthode diffusion, on estime le temps d'ascension à 26,5 jours.

**Question II.9.** Vous explicitez qualitativement les paramètres qui influencent le plus le processus de diffusion en faisant varier les paramètres libres sur la feuille excel (cellules en vert).

Réponse à la question II.9.

*Conclusion = la température est le paramètre le plus important*

**Question II.10.** Le but est de calculer la vitesse d'ascension du magma ayant transporté l'olivine analysée. Des études pétrologiques sur les réservoirs magmatiques donnent une profondeur du réservoir ayant alimenté l'éruption étudiée de 1,2 km. Vous calculerez la vitesse d'ascension du magma des échantillons étudiés, notée  $v$ . Vous commenterez votre résultat.

Réponse à la question II.10.

*$V=D/t = 1\,200 / 170 = 7\text{ m/s}$  soit 25 km/h contre des pointes de Usan Bolt sur 100 m à 12 m/s (~45 km/h)*

**Question II.11.** Connaissant la vitesse on est capable d'estimer le diamètre du conduit. A l'aide de l'expression de l'équation 2, calculez le diamètre du conduit correspondant à la vitesse trouvée à la question précédente II.10.

$$v = 7.7 [w^5 / \{\mu(\rho g \Delta\rho)^3\}]^{1/7} g \Delta\rho \quad \text{Equation 2 d'après Lister and Kerr (1991)}$$

Données : la viscosité  $\mu = 10\text{ Pa s}$ , la densité du magma  $\rho = 2600\text{ kg m}^{-3}$ ,  $g$  l'accélération de la pesanteur ( $\approx 9.81\text{ m s}^{-2}$ ), et  $\Delta\rho$  la différence de densité entre le magma et la croûte ( $50\text{ kg m}^{-3}$ ) ;  $w$  le diamètre du conduit (en m) et  $u$  la vitesse d'ascension du magma (en  $\text{m s}^{-1}$  ; question II.10). 7,7 est un paramètre expérimental.

Réponse à la question II.11.

$$w = [(v/7.7g\Delta\rho)^7 \times \mu(\rho g \Delta\rho)^3]^{(1/5)}$$

*soit 2,27 m*

NOM :

PRENOM :

Salle :

Nous venons de regarder les informations portées par les cristaux. Nous allons regarder maintenant le comportement des bulles directement.

**L'objectif de cette partie est de discuter du lien entre le style éruptif (figure 14) et le régime d'écoulement du magma dans les conduits d'alimentation, en particulier la façon dont les gaz influencent le type d'éruption observé.**

Pour cela, on vous propose un atelier analogique. La modélisation analogique sert à mieux comprendre et prédire les comportements complexes du magma dans les conduits volcaniques, en offrant un moyen visuel, accessible et simplifié d'étudier ces phénomènes naturels. La remontée du magma dans les conduits volcaniques implique de nombreux facteurs physiques, tels que la viscosité et la densité du magma, la pression, la température et les interactions entre les différents composants du magma. Une modélisation analogique permet de simplifier ces phénomènes en les reproduisant avec des systèmes physiques plus simples, ce qui permet de visualiser et d'étudier le comportement du magma.

**ATELIER 3 : MODELISATION ANALOGIQUE Modélisation analogique de  
l'ascension des magmas dans les conduits d'alimentation (EXPERIENCE DANS  
LE COULOIR) (40 min)**

**Vous disposez du matériel suivant :**

- un tube en plexiglas de 40 cm de hauteur remplis de glycérol, de diamètre 5 cm
- un bulleur réglable
- un mètre, des feutres, un chronomètre
- une calculatrice scientifique

**On cherche à vous faire compléter le diagramme de la Figure II.4 en fonction des résultats que vous obtiendrez lors de vos expériences.** Pour cela il faut reporter :

1. Le comportement des bulles observée qualitativement en faisant varier le débit du bulleur manuellement
2. La vitesse des bulles que vous aurez calculée

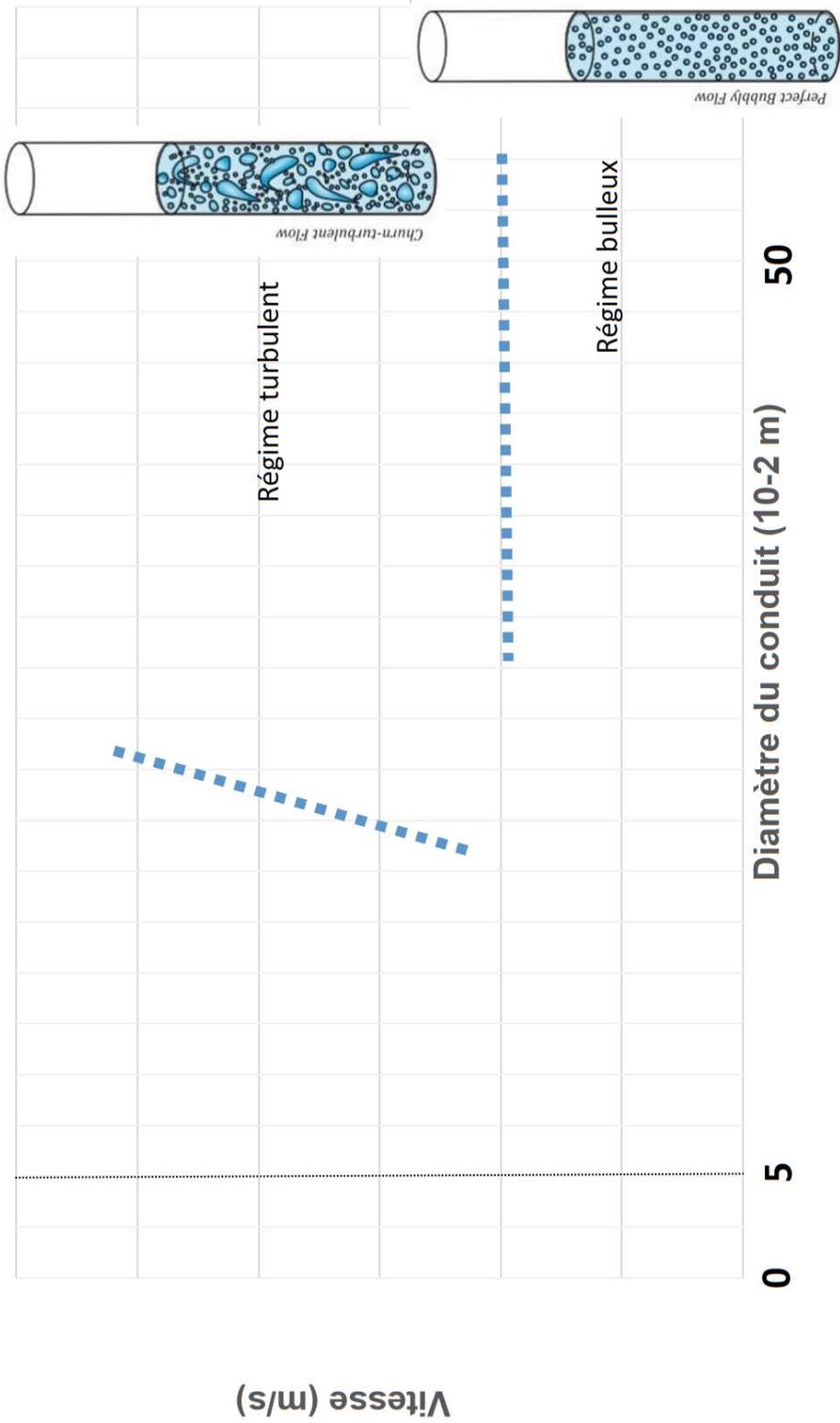
Ainsi vous pourrez compléter les domaines de régime d'écoulement des bulles comme reportés dans la **Figure 14** pour un diamètre de 50 cm.

**Figure 14 : Vitesse d'ascension des magmas en fonction du diamètre du conduit. Le résultat est reporté pour un diamètre de 50 cm et le régime d'écoulement des bulles est précisé (régime bulleux ou turbulent).**

NOM :

PRENOM :

Salle :



NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question II.12.** Vous schématiserez le protocole suivi et vous en ferez une description orale à l'examineur. Vous préciserez (1) les régimes d'écoulement des bulles observés qualitativement, puis (2) quel paramètre vous mesurez directement et (3) quel paramètre vous calculez pour compléter la **figure 14**.

*Réponse à la question II.12.*

*(1)*

*Faible vitesse = plein de petites bulles = régime bulleux comme pour gros diamètre / faible vitesse*

*Vitesse élevée = coalescence des bulles pour former de grosses bulles de la taille presque du conduit = "slug"*

*+ à la frontière entre les 2 régimes pour une vitesse intermédiaire*

*(2)*

*On mesure = temps de remontée d'une bulle repérée entre 2 marques faites sur le tube.*

*(3)*

*On calcule la vitesse, connaissant la distance parcourue par la bulle*

**Question II.13.** Vous réaliserez le nombre d'expérience nécessaire pour répondre à la problématique, en justifiant ce nombre, et vous reporterez vos résultats dans **le tableau 2**. Un tableau est à votre disposition pour noter par expérience la valeur du paramètre mesuré et celui calculé.

NOM :

PRENOM :

Salle :

	Mesure	Calcul
Quel paramètre ?		
Quelle unité ?		
Expérience 1		
Expérience 2		
Expérience 3		
Expérience 4		
Expérience 5		
Expérience 6		

**Tableau 2 : Résultats des expériences effectuées à reporter dans ce tableau**

Réponse à la question II.13.

*Pour un débit donné = plusieurs mesures(>3? ) pour une moyenne de temps*

*4 débits différents pour couvrir une large gamme de valeur de vitesse ?*

*On cherche ici à tester le candidat dans sa démarche.*

- penser à répéter les mesures*
- comment est effectuée cette mesure*
- faire les 2 vitesses extrêmes puis une intermédiaire*
- propreté des manipulations*
- posture lors de la mesure (trait de repère, chronomètre..)*
- passage préparé avant d'arriver sur l'atelier*

**Question II.14.** Vous complèterez la Figure II.4 en décrivant les régimes d'écoulement observés (et la frontière entre les différents régimes observés), et en quantifiant la vitesse d'ascension des bulles.

Réponse à la question II.14.

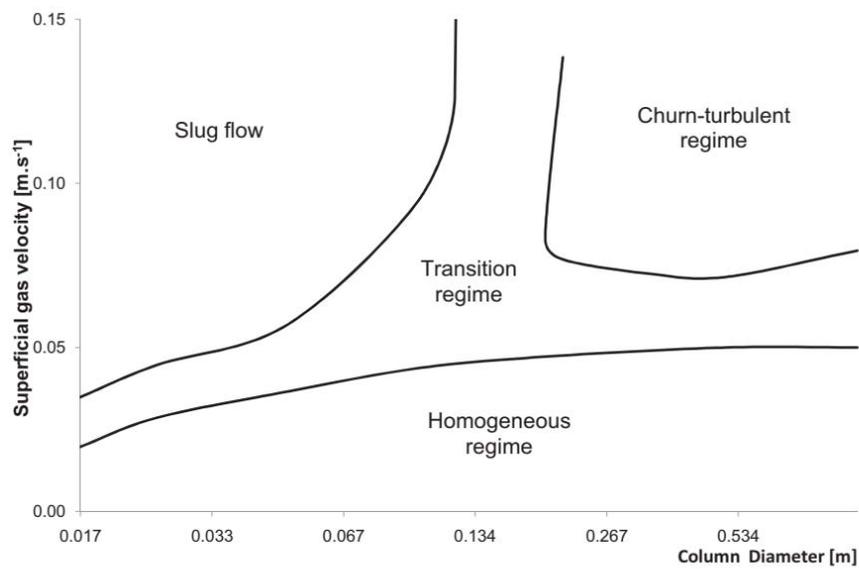
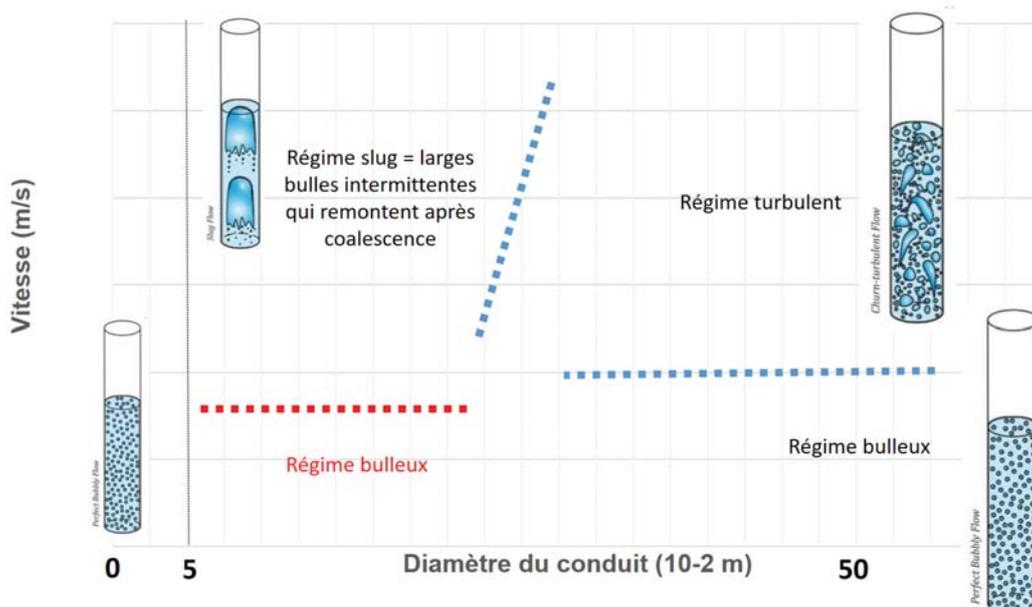


Fig. 2 – Flow regime diagram at ambient pressure and temperature. Air/water system. Adapted from (Kantarci et al., 2005).



NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question II.15.** En vous aidant de vos résultats analogiques, vous proposerez un régime d'écoulement menant aux 2 types d'éruption de la **figure 14**.

*Réponse à la question II.15.*

*A = slug = petit diamètre / vitesse élevée*

*B = faible vitesse, peu importe le diamètre*

NOM :

PRENOM :

Salle :



**Figure 15 : Activité de fontaine de lave. Lava fountain 450 m (1,475 ft) de haut du volcan Kīlauea. Durée 10 secondes. Photo: C. Heliker.**

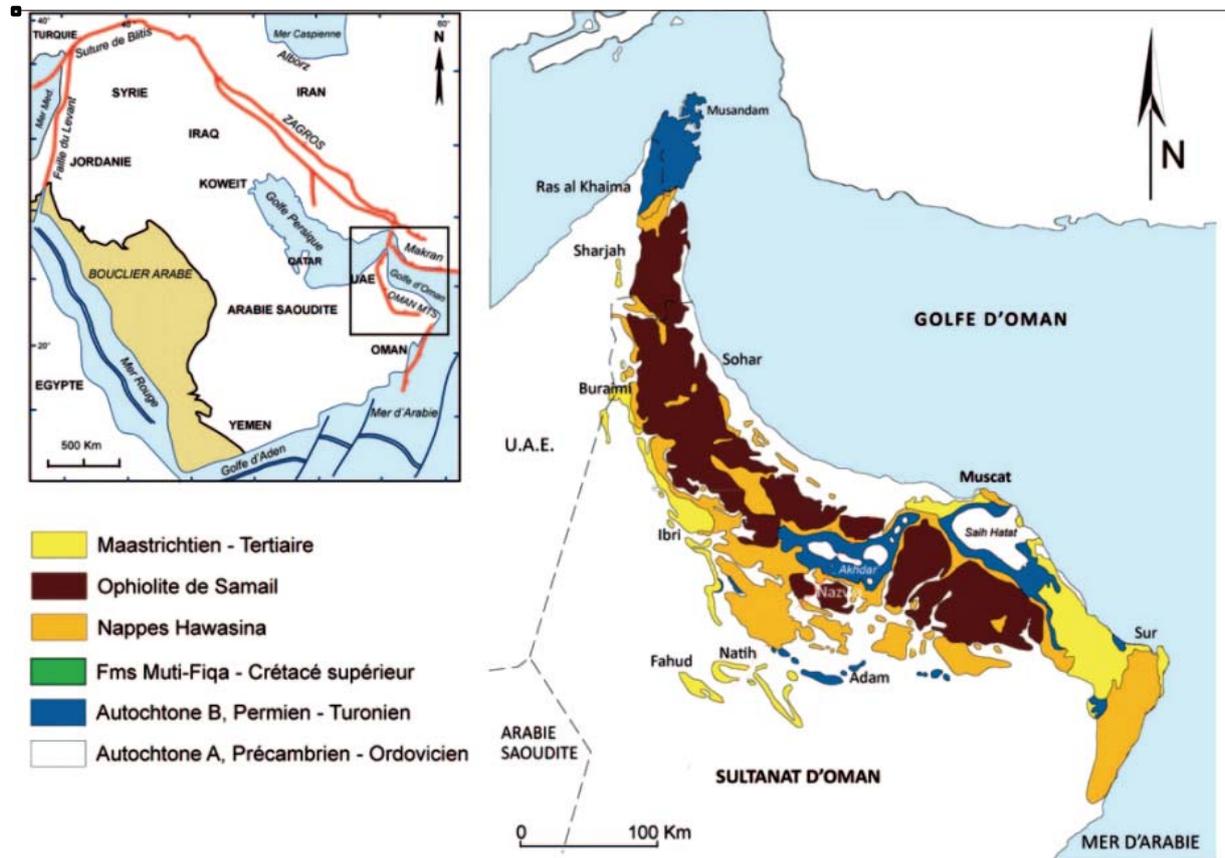
**Question II.16.** On peut également parfois observer des fontaines de **lave (figure 15)**. A partir de ce que vous avez montré dans cette partie, comment expliqueriez vous ce type d'activité (quel régime d'écoulement dans le conduit ?, quelle vitesse d'ascension ? )

*Réponse à la question II.16.*

*Régime annulaire = teneur en gaz élevé et coalescence formant un jet central dans le conduit qui repousse le magma aux parois*

**Partie III. Géologie de l'Oman**

Situées à l'extrémité orientale de la péninsule arabique, les montagnes de l'Oman forment un arc de 700 km de long. Vous avez à disposition la carte géologique de Seeb au 1/50 000 couvrant le secteur central de cet arc. Sa localisation est précisée en **Figure 16**

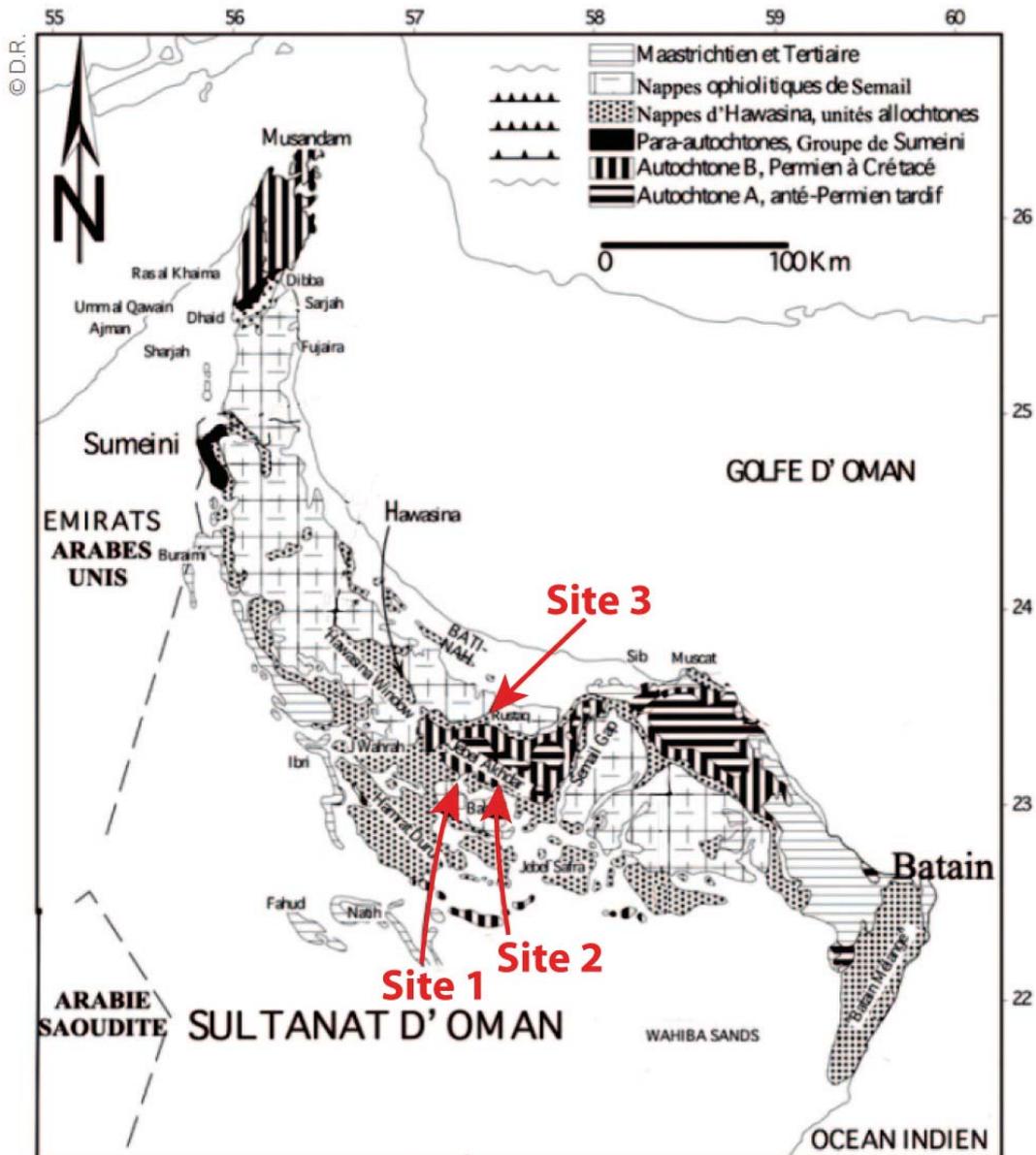


**Figure 16. Carte schématique des montagnes d'Oman (Béchenec, 2023). La cadre rouge localise la carte géologique de Seeb, l'ellipse rouge entoure la fenêtre de Saih Hatat (voir question III.9).**



## Etude sédimentologique de la région de Djebel Akhdar

On cherche à reconstituer le paléoenvironnement de la plate-forme arabe au Trias. Celle-ci affleurant au niveau du dôme de Djebel Akhdar. Pour cela, 3 sites localisés sur la **Figure 17** sont à étudier.



**Figure 17.** Carte géologique simplifiée des montagnes d'Oman localisant les 3 sites à étudier. Les terrains correspondant à ces sites sont tous d'âge permo-trias. (Baud, 2023).

NOM :

PRENOM :

Salle :

**ATELIER 4 : SEDIMENTOLOGIE ET PALEONTOLOGIE (30 min)**

**Question III.3.** Pour chaque site, vous décrirez et identifierez les roches et/ou fossiles fournis puis interprétez les observations en termes de milieu de dépôt. Vous réaliserez un dessin d'observation de **deux fossiles** des sites 1 et 3 (encadrés bleus) mettant en évidence les caractéristiques permettant leur identification. Vous annoterez les photos pour le site 2.

*Réponse à la question III.3.*

**SITE 1 : (dessin annoté de l'échantillon A)**

*Echantillon A*

Brachiopode /Térébratulidé

Réponse à la question III.3. (suite)

**Commentaire pour le Site 1 :**

**Echantillon A :**

-Organisme bivalve dont l'axe de symétrie est perpendiculaire à la charnière =>

**Brachiopode**

-coquille lisse, stries de croissance, crochet développé, léger sinus dorsal => **Térébratulidés**

Organisme marin, fixé grace à un pédoncule, de **plateforme continentale** (maximum : 50 m de profondeur)

**Echantillon B :**

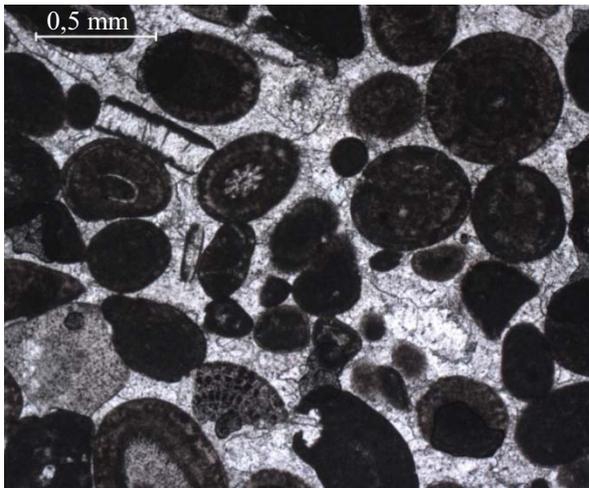
Le fossile correspond à une bioconstruction montrant un organisme colonial (loges nombreuses) présentant des cloisons rayonnantes (septes). Cette symétrie radiale est la caractéristique du groupe des **Cnidaires**. Il s'agit d'un polypier (ou boundstone) squelette calcaire des coraux caractérisant les milieux récifaux (eau chaude peu profonde-profondeur maximum : 10 m).

**Bilan :**

Les informations fossiles indiquent, pour le **site 1**, un **milieu marin peu profond** (récifal).

Réponse à la question III.3. (suite)

**SITE 2** (commentaire de l'échantillon macroscopique et annotation et commentaire de la lame mince)



**Oolithe** (structure ovoïde formée de couches concentriques de carbonate autour d'un nucleus).

**Sparite** (ciment carbonaté-

**Grainstone (ou oosparite)**

**Echantillon macroscopique :**

roche beige, faisant effervescence à l'acide chlorhydrique et constituée de grains millimétriques arrondis => **calcaire oolithique**.

La présence d'oolithes tout comme la nature de la phase de liaison (sparite) indiquent un milieu **régulièrement agité**.

Les **oolithes** se forment par enrobage de couches de carbonates autour d'un noyau (ou nucleus) qui peut être un débris coquiller ou un grain de quartz. Cet enrobage sur toutes les faces nécessite une **agitation régulière** de l'objet.

La présence d'un **ciment sparitique** (et non d'une matrice) témoigne d'un sédiment lavé des fines particules. Le milieu est donc **suffisamment agité** pour empêcher le dépôt des particules les plus fines. Lors de la diagenèse, la porosité est comblée par cristallisation de la calcite (cimentation).

**Bilan :**

ces informations indiquent un milieu de dépôt de type avant-côte, soumis à l'action régulière de la houle, au dessus de la limite d'action des vagues de beau temps (moins de 60 m de profondeur).

NOM :

PRENOM :

Salle :

Réponse à la question III.3. (suite)

**SITE 3 : (dessin annoté du fossile)**

Cératite

**Commentaire pour le Site 3 :**

**Fossile :**

organisme à coquille univalve, enroulée et cloisonnée => Céphalopode  
Les sutures (traces des cloisons) présentent des sinusoïdes => Ammonoïdes  
Les lobes sont dentés et les selles lisses => Cératite

Organisme marin, vivant dans la tranche d'eau.

**Echantillon macroscopique :**

roche carbonatée (test positif à l'acide chlorydrique) à grain très fin (non visible à l'oeil nu). => mustone (ou micrite).

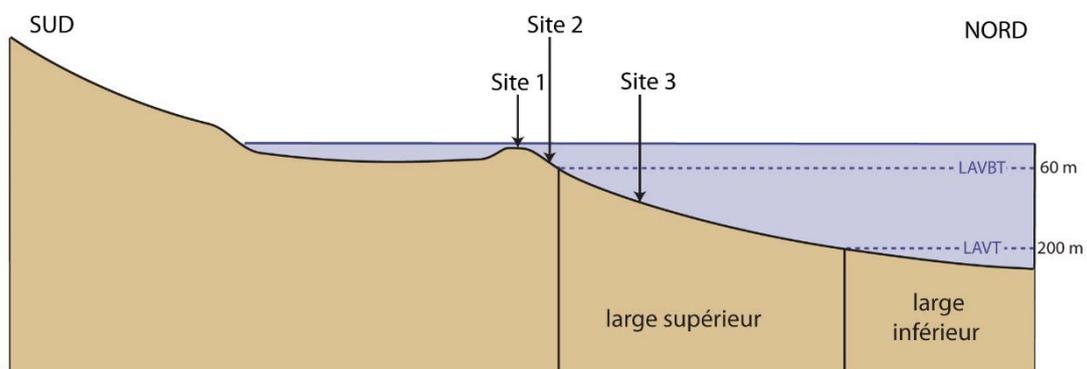
Les grains fins indiquent un milieu très calme

**Bilan :**

Ces informations indiquent un milieu de dépôt au niveau du large (supérieur ou inférieur) au delà de 60 m de profondeur.

**Question III.4.** Vous intégrerez spatialement les données obtenues à la question III.3 en replaçant chaque site sur un profil de dépôt orienté, que vous schématiserez.

Réponse à la question III.4.



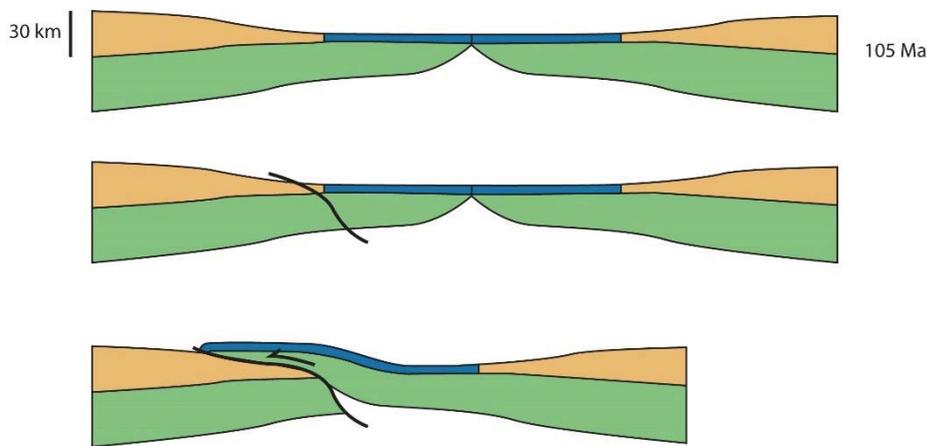
**Question III.5.** A partir de ces interprétations, vous déterminerez le contexte paléogéographique de la plate-forme arabe au Trias.

Réponse à la question III.5.

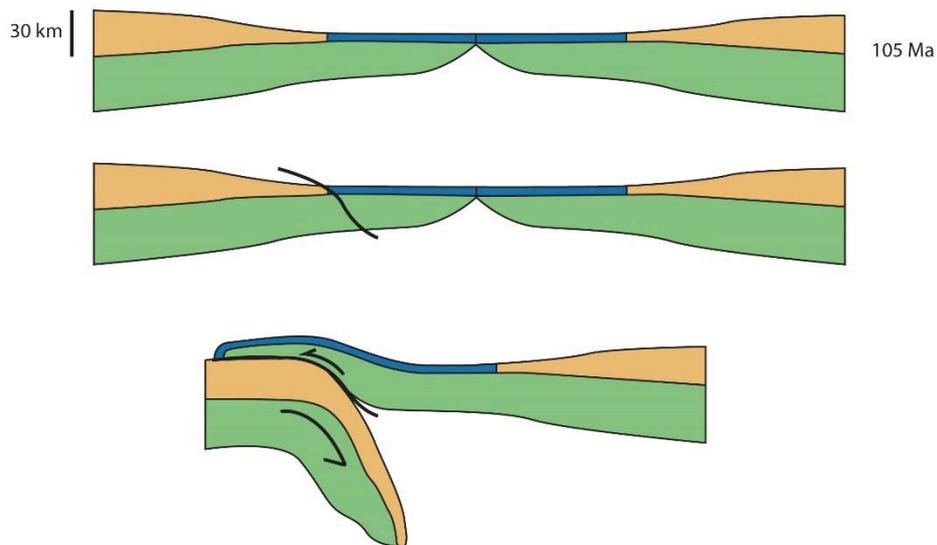
*Cette plate-forme carbonatée correspondrait à la marge Sud de l'océan Téthys.*

On cherche maintenant à déterminer les conditions de mise en place de la nappe ophiolitique de Samail. Quatre modèles géodynamiques sont proposés en **Figure 18** (voir planche A3). Les questions III.7 à III.18, organisées en trois grands thèmes, guident l'exploitation des données, permettant de privilégier l'un de ces quatre modèles.

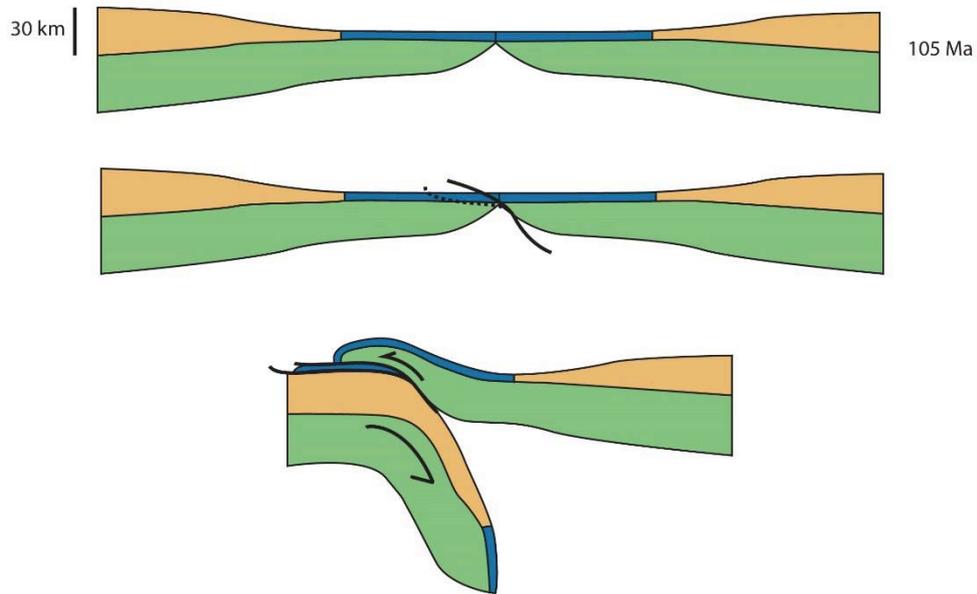
**Modèle 1 : obduction simple**



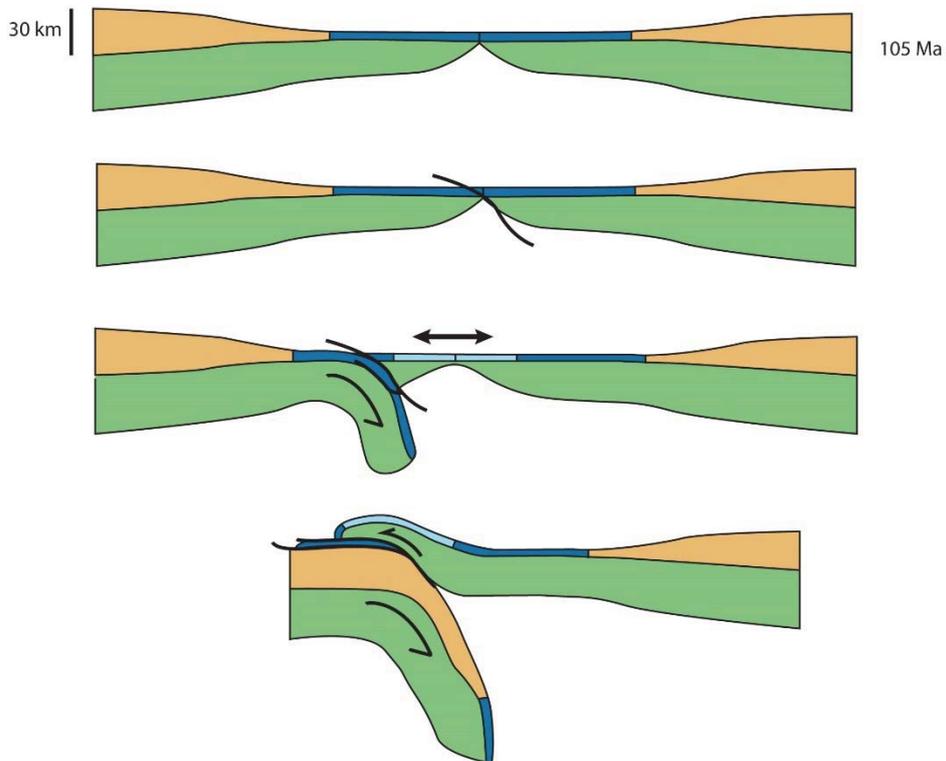
**Modèle 2 : subduction continentale**



**Modèle 3 : subduction intra-océanique**



**Modèle 4 : supra-subduction (production de nouvelle croûte océanique synchrone de la subduction)**



**Figure 18. Quatre modèles possibles de mise en place des ophiolites de Samail**

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question III.6.** Vous définirez le terme « ophiolite ».

*Réponse à la question III.6.*

*Une ophiolite est une séquence de roches (péridotite, gabbro, dolérite, basalte) correspondant à une portion de la lithosphère océanique, charriée sur le continent.*

## **Etude pétrologique et chronologique des roches de la fenêtre de Saih Hatat**

Deux roches métamorphiques, équivalentes à celles retrouvées dans la fenêtre de Saih Hatat (localisée en figure 1) sont à étudier.

### ***ATELIER 5 : ROCHES METAMORPHIQUES (20 min)***

La roche A est un ancien sill basique d'âge Permien, mis en place dans la marge continentale arabe. Un échantillon macroscopique est fourni.

Pour la roche B, un échantillon macroscopique et une lame sont à analyser.

**Question III.7.** Vous décrierez et identifierez les 2 échantillons fournis et vous proposerez un contexte de formation pour chacun d'eux en précisant également le protolithe possible de la roche B. Un schéma annoté de l'échantillon A ainsi que de la lame de l'échantillon B est attendu (dans les encadrés bleus).

NOM :

PRENOM :

Salle :

Réponse à la question III.7

**ECHANTILLON A : (schéma annoté de l'échantillon macroscopique)**

Commentaire pour l'échantillon A :

*roche composée de grenat et omphacite => **éclogite***

*Les couronnes de hornblende indique un cristallisation postérieure à l'assemblage grenat-omphacite (réaction coronitique) : **Gt + Omph + H<sub>2</sub>O -> Hbd***

NOM :

PRENOM :

Salle :

Réponse à la question III.7 (suite)

**ECHANTILLON B : (schéma annoté de la lame mince)**

Commentaire pour l'échantillon B :

*échantillon macroscopique :*  
*roche présentant une schistosité marquée, composée pour l'essentiel de micas blancs =>*  
***micaschiste.***

*Lame mince :*  
*la lame précise la minéralogie avec **micas blancs, chlorites, chloritoïdes et grenats.***

*Le protolithe de cette roche métamorphique est une **pélite** (roche sédimentaire argileuse).  
Les argiles de la roche initiale recristallisent en micas lors du métamorphisme.*

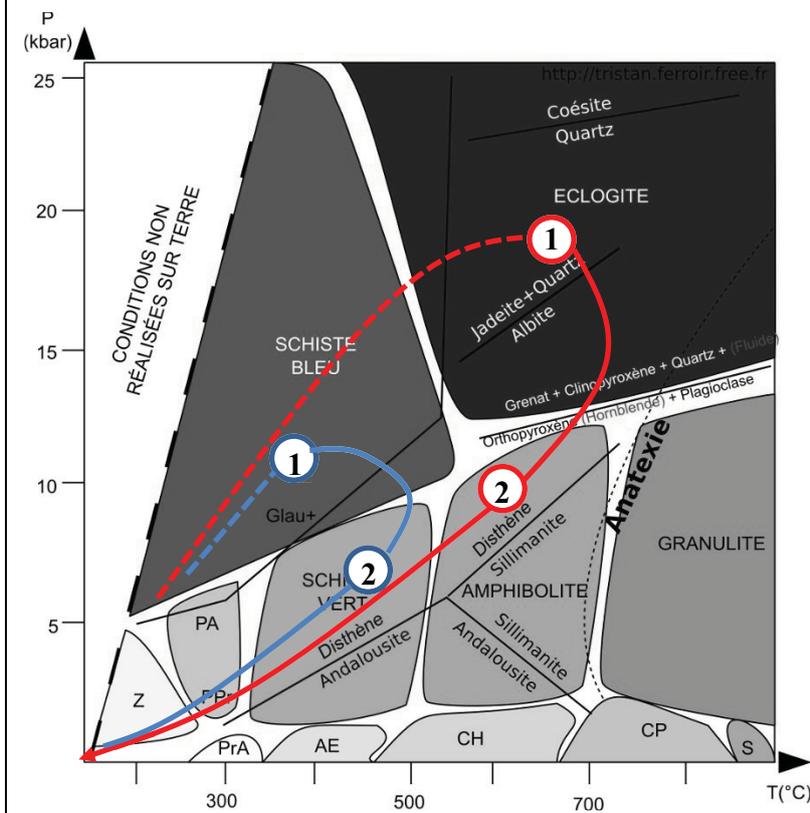
**Question III.8.** A partir de l'analyse de l'échantillon A, vous tracerez le trajet Pression-Température de la roche dans le diagramme fourni.

Réponse à la question III.8.

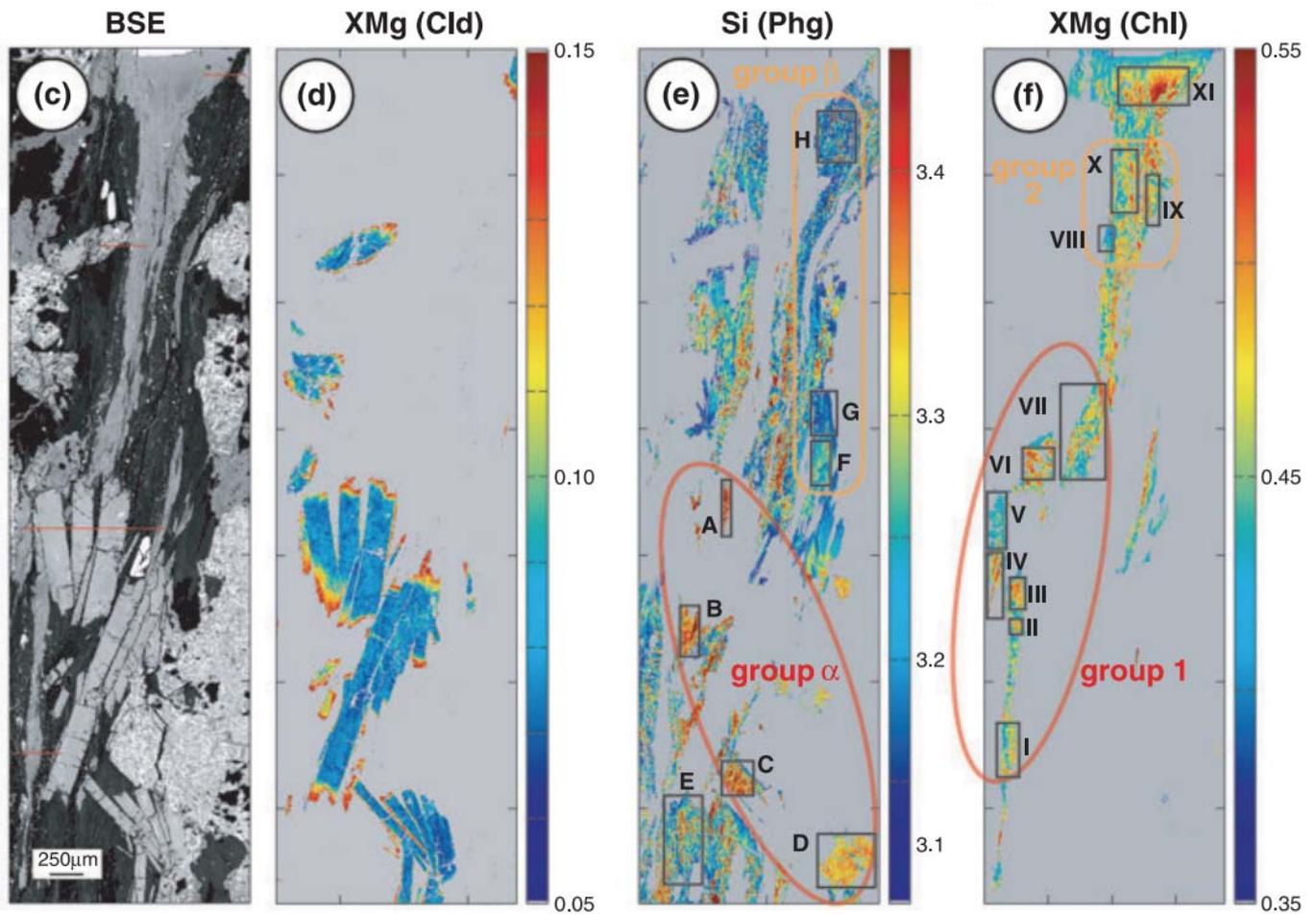
La réaction déduite de la description de l'échantillon indique l'ordre suivant :  
 1-Omph (Jadéite) + Gt : facies **éclogite**  
 2-Hbd : facies **amphibolite**

Il s'agit d'une réaction de **rétroréformation**.

Trajet P-T en rouge ci-dessous



Une analyse pétrographique fine a permis de reconstituer les conditions d'enfouissement puis d'exhumation des roches correspondant à l'échantillon **B**. La figure de gauche montre une image en électrons rétro-diffusés acquise au microscope électronique à balayage d'une lame mince de cette roche. Les images suivantes (d à f) montrent les zonations de composition en magnésium des prismes de chloritoïde (Ctd) en silice pour les phengites (micas blancs) et en magnésium pour les chlorites. Notez les extrémités plus riches en magnésium des chloritoïdes (flèche noire). Pour les phengites et les chlorites, les valeurs maximales sont préservées autour du groupement de cristaux de chloritoïde (groupe  $\alpha$  et groupe 1), et peuvent être reliées à la croissance principale de ceux-ci et donc à leur cœur. Les compositions évoluent vers des valeurs plus basses le long de la schistosité (groupe  $\beta$  et groupe 2).



**Figure 19. Cartographie chimique d'une roche métamorphique de Saih Hatat (équivalent de la roche B).** (Yamato et al. 2007).

**Question III.9.** Vous discuterez d'une interprétation possible des différences chimiques entre le cœur et les bordures observées dans les minéraux ainsi que celles décrites le long de la schistosité (**Figure 19**) ?

Réponse à la question III.9.

-les minéraux ayant une croissance centrifuge, les différences chimiques entre le cœur et la bordure sont interprétées comme une évolution de la chimie au cours de la croissance du minéral (en lien avec des **variations des conditions P-T**). Les compositions dans les **cœurs** correspondent donc à des conditions **plus précoces** que celles des bordures.

-les phases **minérales le long de la schistosité sont plus tardives** que celles non déformées. Là encore une différence de chimie témoignerait d'une évolution des conditions P-T.

**Table 4.** Examples of calculations performed with TWEEQU (version 2.02., Berman, 1991).

Minerals involved in the paragenesis					P-T calculations				
Cld*	Chl	%Fe <sup>3+</sup>	Phg	Others	Chl Mod.	P	Pdev	T	Tdev
d11.2 (compositional map)									
0.10	I	14	D	–	V2001	9.2	0.7	327	26
					VP209	9.1	0.9	330	33
0.13	IV	7	B	–	V2001	10.2	0.6	376	19
					VP209	10.0	0.8	383	26
0.12	VIII	6	E	–	V2001	8.6	0.8	442	28
					VP209	8.4	0.6	447	24
–	X	7	F		V2001	6.4	0.3	469	12
					VP209	6.4	0.5	469	17

\* $X_{Mg}$  value of chloritoid.

**Figure 20.** Conditions P-T estimées à partir de données thermodynamiques sur les équilibres chlorite-phengite. Les chiffres romains (I, IV, VIII, X) et les lettres (D, B, E, F) renvoient aux secteurs localisés en figure 4.

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question III.10.** A partir des données pression-température fournis en **Figure 20**. Vous tracerez le trajet pression-température de l'échantillon B sur le diagramme fourni en question III.8. Vous expliquerez votre démarche.

Réponse à la question III.10.

D'après la réponse à la question III.9, il est possible d'établir une **chronologie** de mise en place des différents phases minérales.

1-phases précoces (coeurs des minéraux) : groupe  $\alpha$  et groupe 1

Elles correspondent aux secteurs I-D et IV-B

C'est dire aux **conditions P-T suivantes : 9,2-10,2 kb et 327-376 °C**

→ **faciès des Schistes Bleus**

2-phases tardives (le long de la schistosité) : groupe  $\beta$  et groupe 2

Elles correspondent au secteur X-F

C'est à dire aux **conditions P-T suivantes : 6,4 kb et 469 °C**

→ **faciès des Schistes Verts**

Trajet P-T en bleu sur le diagramme de la question III.8

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question III.11.** En intégrant les réponses aux questions III-8 et III-10 vous déterminerez le gradient métamorphique correspondant aux 2 roches A et B et préciser, en argumentant, le contexte géodynamique correspondant.

*Réponse à la question III.11.*

*Les facies aux pics du métamorphisme sont ceux des **Schistes bleus** (roche B : micaschiste à chloritoïde) et **Eclogite** (roche A : éclogite). Ils correspondent à **un gradient Haute Pression-Basse Température** (environ 8°C/km). C'est-à-dire un gradient anormalement faible par rapport à un géotherme stable (30°C/km). Cela suggère le plongement d'une lithosphère froide dans le manteau : **une subduction**.*

*Les facies Schistes Verts et Amphibolites correspondent aux conditions des chemins retrogrades.*

**Question III.12.** Vous préciserez en quoi ces résultats permettent d'éliminer l'un des 4 modèles de mise en place des ophiolites d'Oman.

*Réponse à la question III.12.*

*La **subduction** (voir question III.13.) est une étape de la mise en place des ophiolites d'Oman. On peut donc **éliminer le modèle 1** qui ne présente pas ce contexte. Les modèles 2 à 4 restent possibles.*

**Question III.13.** En vue d'effectuer une datation de la roche A, des analyses Rb-Sr ont été effectuées sur plusieurs échantillons (**figure 21**). A partir de ces données, tracez l'isochrone correspondante (à l'aide du papier millimétré fournis). Vous déterminerez ensuite l'âge de la roche en explicitant la démarche empruntée.

N° de l'échantillon	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$
1	1,7578	0,71903
2	2,1926	0,71965
3	2,6272	0,72015
4	3,1319	0,72058
5	3,3737	0,72091
6	3,7229	0,72115
7	4,1099	0,7218

On donne  $\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$

**Figure 21.** Données rubidium-strontium sur roche totale.

Réponse à la question III.13. (tracé de l'isochrone à rendre avec la copie)

Pour estimer l'âge de la roche, il faut tracer une isochrone dans un repère

$$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = y / ^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = x.$$

L'alignement des points (correspondant chacun à un échantillon) confirme le caractère **isochrone** de l'ensemble des échantillons.

$$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0 + (^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) (e^{\lambda t} - 1)$$

Calculer la pente de cette droite isochrone permet d'obtenir l'âge des échantillons et donc de la cristallisation de l'éclogite, car la pente  $a = e^{\lambda t} - 1$ .

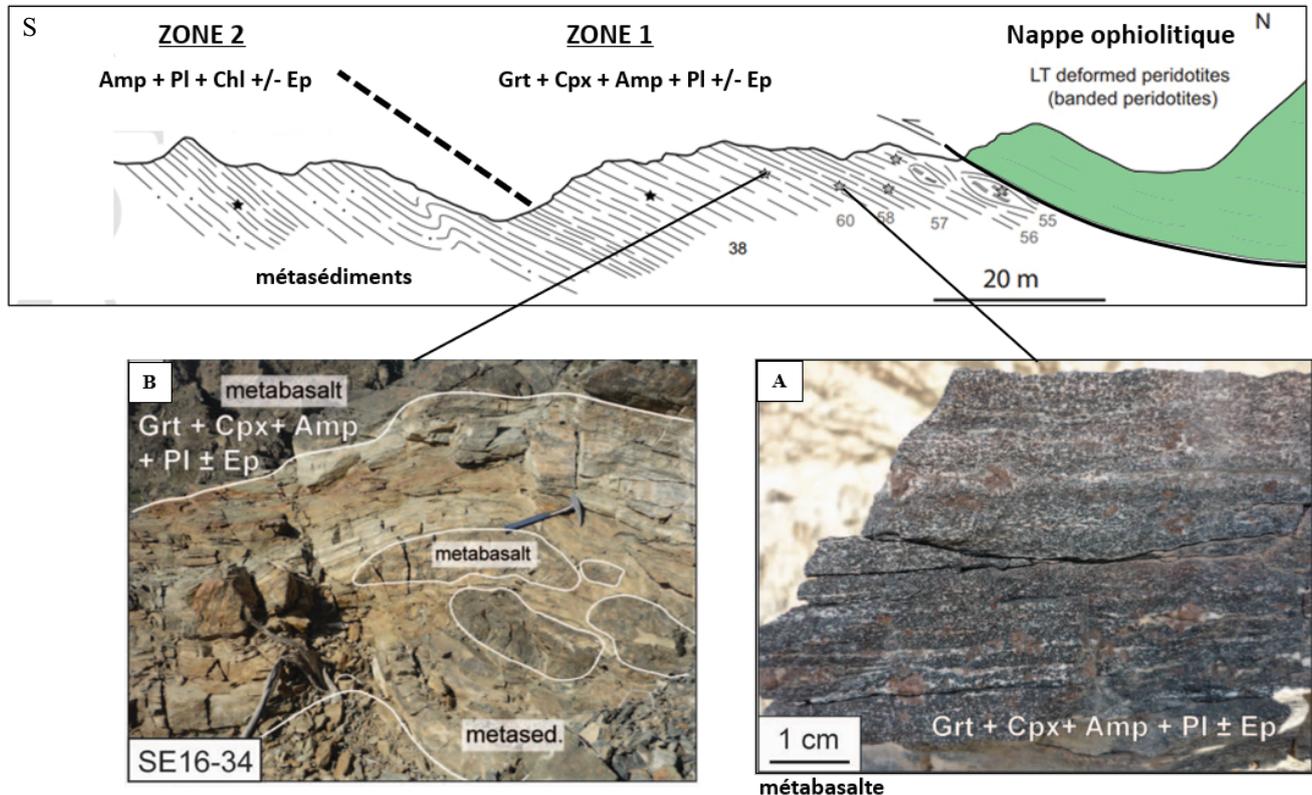
$$\text{Donc } t = \ln(a+1)/\lambda$$

Or  $a = 0,0011$  (obtenu graphiquement)

$$t = 77,4 \text{ Ma (âge de l'éclogite et donc de la subduction)}$$

## Etude de la semelle de la nappe ophiolitique de Semail

Les roches immédiatement à la base de la nappe forment une « semelle » qui peut être subdivisée en deux zones (zone 1 et 2 de la **figure 22**). Deux formations représentatives de la zone 1 sont présentés en photos A et B.



**Figure 22.** Coupe géologique passant par la nappe ophiolitique et sa semelle (d'après Soret et al., 2017). Grt : grenat, Cpx : clinopyroxène, Amp : amphibole, Pl : plagioclase, Ep : épidote, Chl : chlorite.

**Question III.14.** Vous préciserez ce que suggère la nature lithologique de la semelle (photos A et B) quant à son origine. A partir de cette information, vous argumenterez le le modèle de mise en place des ophiolites de Semail qui peut être éliminé.

Réponse à la question III.14.

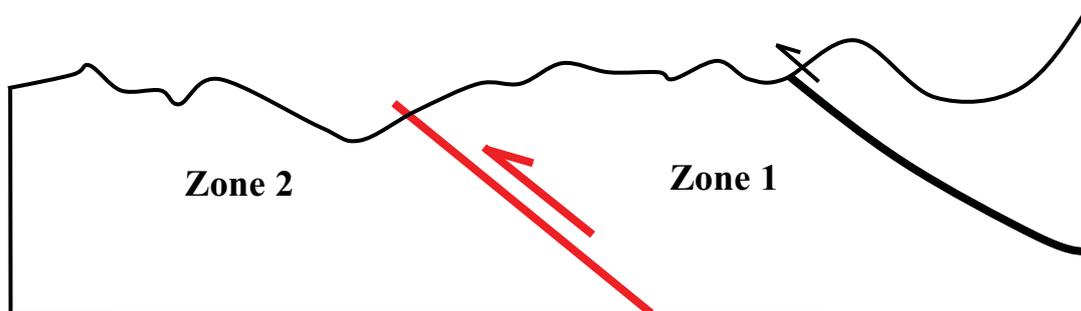
*Les roches immédiatement à la semelle de la nappe ophiolitique sont de basaltes métamorphisés ainsi que des métasédiments : une lithologie d'affinité océanique. Or seul le modèle 2 indique un autochtone continental. Nous pouvons donc supprimer ce modèle. Les modèles 2 et 3 restent possibles.*

**Question III.15.** Vous proposerez deux explications possibles de la distribution des paragenèses métamorphiques au sein de la semelle de la nappe ophiolitique (des schémas sont attendus).

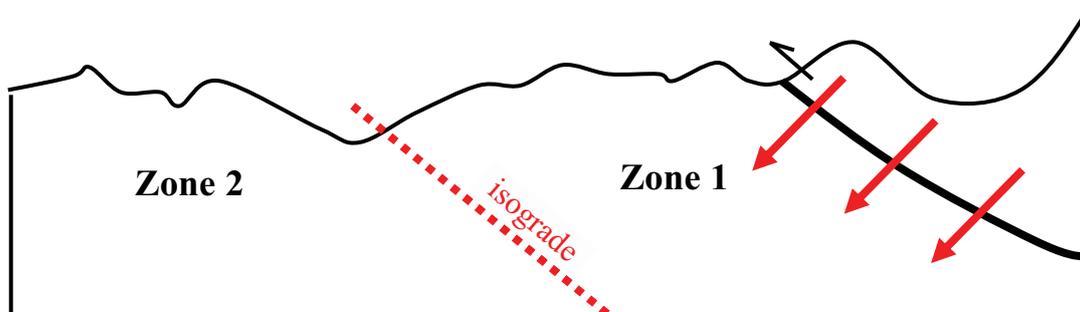
Réponse à la question III.15.

L'unité supérieure (zone 1) est caractérisée par un assemblage minéralogique du faciès Granulite (Cpx/Pl) alors que celui de l'unité inférieure (zone 2) montre une paragenèse de faciès des Schistes Verts, soit d'un degré de métamorphisme inférieur. Deux situations peuvent expliquer ce métamorphisme dit « inverse » :

-1- **deux unités séparées par un chevauchement** : une unité initialement profonde, chevauche celle plus superficielle

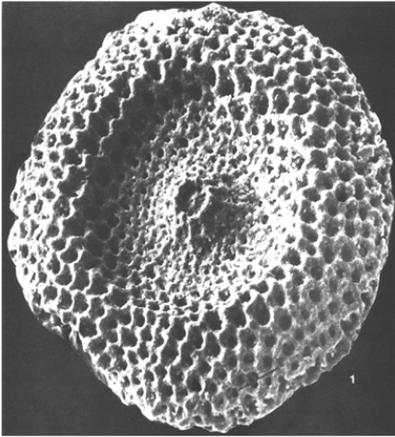


-2- **l'effet fer à repasser** : la nappe ophiolitique, chaude, transmet de la chaleur à l'autochtone, la zone immédiatement à son contact est davantage chauffée que celle plus éloignée.

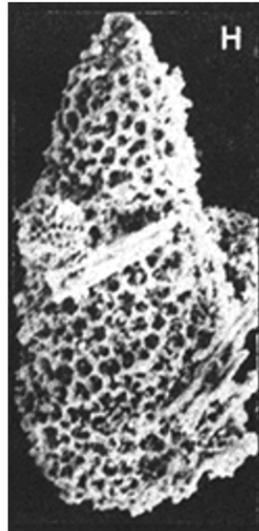


## Détermination de l'âge de la croûte ophiolitique

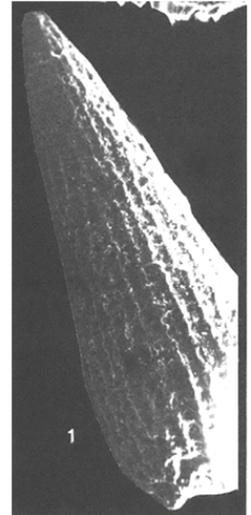
On cherche à déterminer l'âge de la croûte ophiolitique de la nappe de Sémil par biostratigraphie en utilisant les radiolaires présents dans les radiolarites de la séquence (voir figure 23).



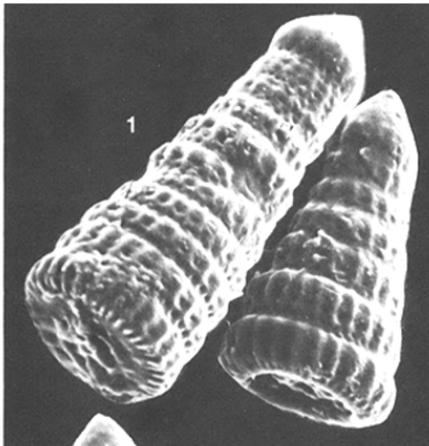
**Chartonae**  
(Albien moyen à Turonien)



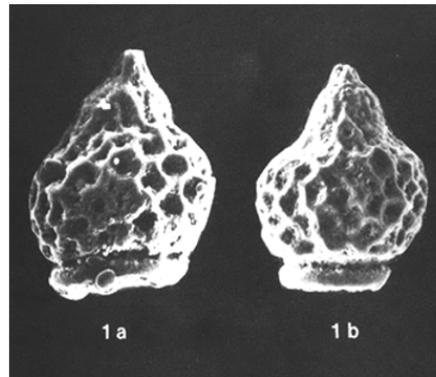
**Somphedia**  
(Cénomaniens)



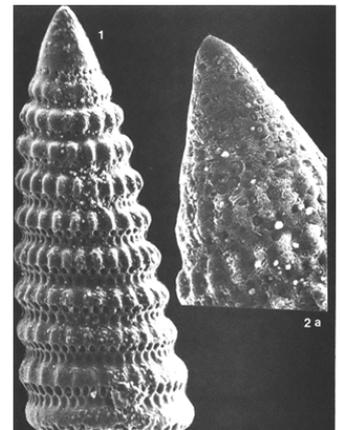
**Gracilis**  
(Albien sup. au Turonien)



**Pseudomacrocephala**  
(Albien supérieur au Turonien moyen)



**Majuroensis**  
(Cénomaniens moyen à Turonien)



**Carpatia**  
(Valanginiens-Turonien)

**Figure 23. Radiolaires identifiés dans la radiolarite de la séquence ophiolitique d'Oman.**

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question III.16.** Vous préciez quelles sont les précautions à prendre pour que l'âge obtenu soit représentatif de celui de la croûte ophiolitique ?

*Réponse à la question III.16.*

*Pour connaître l'âge du plancher océanique par biostratigraphie, il faut s'assurer :*

- 1 : d'analyser les couches au contact direct de ce plancher*
- 2 : que ce contact soit de nature sédimentaire (et non tectonique)*

**Question III.17.** La **Figure 23** montre les radiolaires dégagés de la roche étudiée. Utilisez les informations données pour en déduire l'âge biostratigraphique de la croûte. Vous complétez la **Figure 24** et décrivez la démarche empruntée.

*Réponse à la question III.17.*

*Afin de connaître l'âge de la radiolarite, il faut déterminer **la période commune** à tous les genres présents dans la roche (voir figure 8). Il s'agit de l'intervalle Cénomaniens moyen-supérieur, soit **un âge de – 94 à -97 Ma environ.***

NOM :

PRENOM :

Salle :

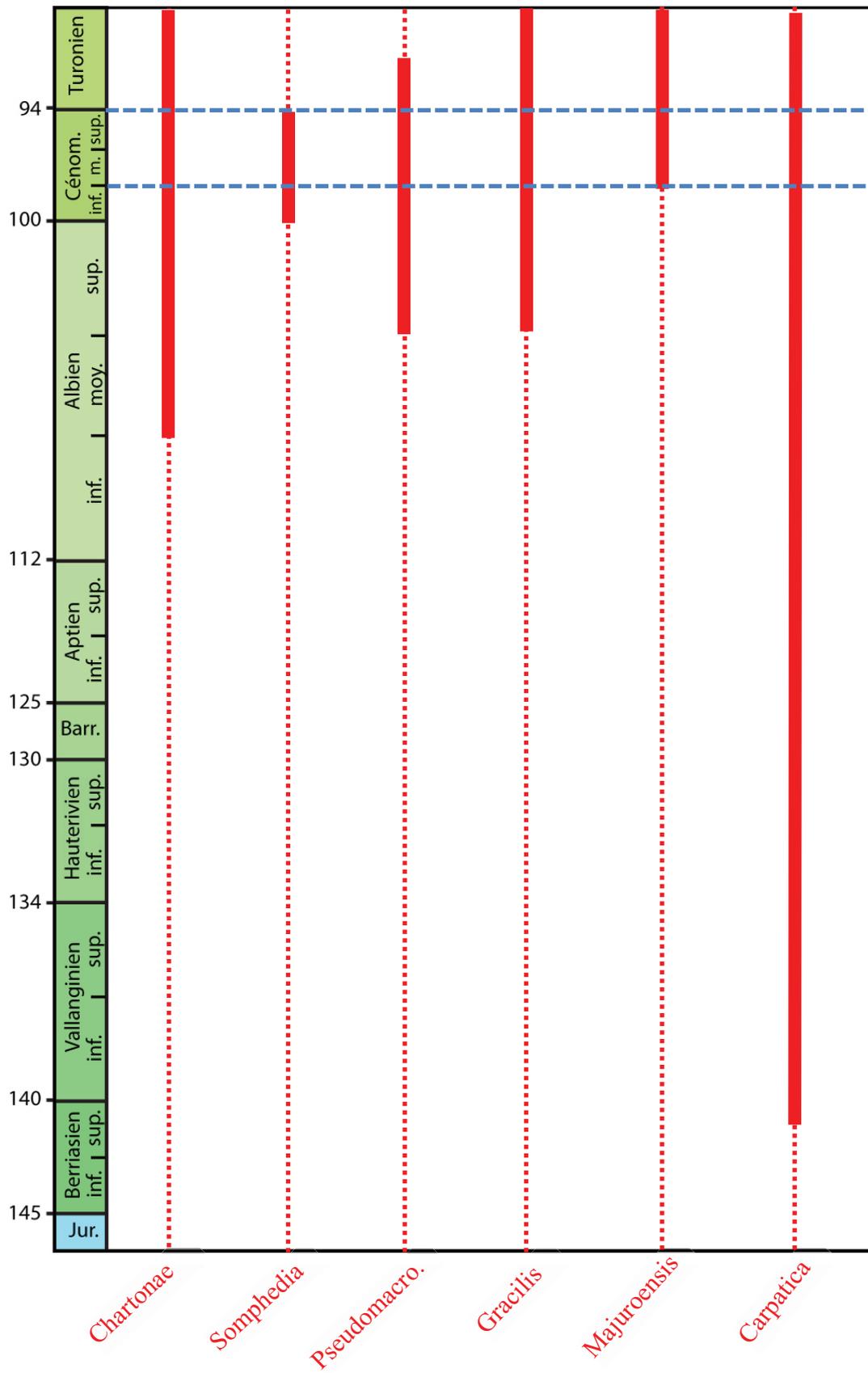


Figure 24. Echelle stratigraphique du Berriasien au Turonien.

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question III.18.** Vous montrerez en quoi les résultats obtenus à la question III.17, associés aux réponses aux questions précédentes, permettent de privilégier l'un des quatre modèles de mise en place de la nappe ophiolitique.

*Réponse à la question III.18.*

*La croûte ophiolitique est donc plus jeune (94-97 Ma) que celle formée au début des modèles 3 et 4 (105 Ma). Cela suggère une nouvelle formation de croûte au cours de la fermeture de l'océan (supra-subduction). Cette chronologie correspond au **modèle 4** (croûte bleu clair, plus récente que celle bleu foncé). Par ailleurs, ce modèle est cohérent avec l'âge de la subduction continentale, daté à -77,4 Ma (voir question III.12). celle-ci est bien plus récente que la phase de supra-subduction océanique (94-97 Ma).*

## 5.4 Épreuve de travaux pratiques de contre-option du secteur A : Sujet et commentaires

L'épreuve de contre-option de travaux pratiques vise à évaluer des compétences manipulatoires simples, telles qu'accessibles avec le matériel disponible dans le secondaire mais aussi à évaluer la compréhension de techniques plus complexes dont les données sont très souvent proposées aux élèves. Il s'agit aussi de tester des compétences organisationnelles pour réussir à couvrir l'ensemble des questions posées. Enfin, il s'agit de vérifier que les candidats connaissent les règles d'hygiène et de sécurité relatives aux manipulations expérimentales qu'ils auront à inculquer à leurs futurs élèves.

Le sujet proposé cette année portait sur les aspects histo-fonctionnels du système nerveux des vertébrés, et était organisé en quatre parties indépendantes.

Dans une première partie, axée sur la mise en évidence du système nerveux, des organes aux cellules qui le composent, les candidats devaient mettre en évidence les éléments céphaliques du système nerveux d'un poisson à tête plate par une dissection. Ils devaient réaliser à partir de cette dissection un frottis de cortex cérébral et une préparation de nerf dilacéré dont l'observation microscopique conduisait à un dessin légendé. Enfin les candidats devaient décrire les types cellulaires composant le tissu nerveux et leurs caractéristiques fonctionnelles. La qualité des dissections, des préparations de même que l'utilisation du microscope n'étaient pas toujours optimales. Pour bon nombre des candidats, les dessins n'étaient pas représentatifs des observations possibles. La connaissance des types cellulaires et leurs caractéristiques étaient trop souvent très succinctes.

La seconde partie consistait en l'étude de l'excitabilité du tissu nerveux, depuis sa mise en évidence jusqu'aux mécanismes moléculaires à l'aide de différentes techniques expérimentales. La plupart des candidats ont été en mesure de tracer une courbe courant-voltage à partir des données fournies dans l'énoncé. En revanche, l'écriture de l'équation de Nernst et le calcul des potentiels d'équilibre ont posé beaucoup de problèmes à de nombreux candidats, et ont de ce fait, été discriminants. Il en était de même pour la définition de l'équation reliant le courant à la conductance et au gradient électrochimique, ainsi que pour le calcul de la conductance unitaire du canal. Dans cette partie, les candidats devaient également interpréter des données expérimentales concernant la maturation et le trafic des canaux ioniques à la membrane plasmique. La plupart des candidats ont été en mesure de désigner le réticulum endoplasmique rugueux comme compartiment auquel sont adressées en premier lieu les protéines possédant une séquence signal. En revanche, les principales étapes moléculaires se déroulant dans le cytoplasme et permettant l'adressage de ces protéines vers la membrane du réticulum endoplasmique rugueux ont été décrites de manière superficielle par un grand nombre de candidats. Il faut également noter que beaucoup de candidats se sont limités à une description des western-blot, sans toutefois en proposer une interprétation, ce qui, là encore, s'est avéré discriminant.

La troisième partie portait sur la communication chimique au sein du système nerveux. Le sujet questionnait les candidats sur un protocole de détection par immunohistochimie de la choline acétyltransférase appliqué sur des coupes coronales de moelle épinière de souris, coupes dont disposaient les candidats. Le sujet comportait les fiches techniques des différents réactifs utilisés, une liste de matériel et un protocole détaillé. Les candidats ont été amenés à décrire les étapes clés du protocole d'immunohistochimie, ainsi que le rôle des réactifs utilisés. Certains candidats n'ont pas été en mesure de décrire le principe du protocole. Ils devaient par

ailleurs indiquer les calculs permettant d'obtenir les solutions à utiliser de même que le matériel utilisé pour les obtenir et les équipements de protection individuelle nécessaire au regard des indications délivrées dans les fiches techniques. Peu de candidats sont parvenus à réaliser l'ensemble des calculs et trop peu de candidats ont tenu compte de façon pertinente des indications présentes dans les fiches techniques. Les candidats devaient par ailleurs préciser les contrôles qui devaient avoir été faits pour s'assurer de la spécificité de l'immunodétection réalisée et observer au microscope une coupe de moelle épinière ayant subi le protocole pour en réaliser un dessin légendé. Ces éléments ont été réalisés de façon approximative par certains candidats. Enfin les candidats devaient préciser ce qu'est un motoneurone (identifié dans la corne ventrale de la moelle épinière par l'immunodétection de la choline acétyltransférase) et le messenger chimique libéré puis décrire les acteurs moléculaires intervenant depuis la réception du messenger chimique au sein de la jonction neuro-musculaire jusqu'à l'effet global observé sur la cellule cible. Ces éléments ont été abordés par de nombreux candidats, mais de manière parcellaire. Peu d'entre eux ont été en mesure de décrire précisément les différentes étapes impliquant les divers acteurs moléculaires.

Le sujet commenté se trouve sur les pages suivantes.

**AGRÉGATION DE SCIENCES DE LA VIE -  
SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS**

**CONCOURS EXTERNE – EPREUVES D'ADMISSION – Session 2025**

**TRAVAUX PRATIQUES DE CONTRE OPTION DU SECTEUR A**

**Candidats des secteurs B et C**

**Durée totale : 2 heures**

**Aspects histo-fonctionnels du système nerveux des vertébrés**

Les 3 parties sont indépendantes :

- Partie I : le système nerveux, des organes aux cellules qui le composent  
*Durée conseillée : 40 minutes — barème indicatif : 30 points sur 100*
- Partie II : l'excitabilité du tissu nerveux, de sa mise en évidence aux mécanismes moléculaires impliqués  
*Durée conseillée : 30 minutes — barème indicatif : 25 points sur 100*
- Partie III : la communication chimique au sein du système nerveux  
*Durée conseillée : 50 minutes — barème indicatif : 45 points sur 100*

**Les réponses aux questions figureront dans les cadres réservés à cet effet.**

**N'oubliez pas d'appeler les examinateurs lorsque cela est demandé.**

**Une lecture du sujet dans son intégralité est fortement conseillée afin de répartir au mieux son temps de travail entre les différentes parties et les différentes manipulations.**

## Partie I : le système nerveux, des organes aux cellules qui le composent

### I.A. étude macroscopique

Vous disposez d'un poisson à tête plate afin de mettre en évidence les éléments de son système nerveux.

#### *Quelques indications de dissection*

1/placer la tête du poisson face ventrale sur le fond de la cuvette ; l'épingler (dans la bouche et en arrière de la tête)

2/découper la peau recouvrant les os du crâne

3/retirer les muscles recouvrant les os du crâne ==> le système nerveux central (encéphale et premiers segments de la moelle épinière) est visible par transparence

4/découper le dessus du crâne de l'arrière vers l'avant sur la droite et sur la gauche ; soulever l'os découpé ==> encéphale visible

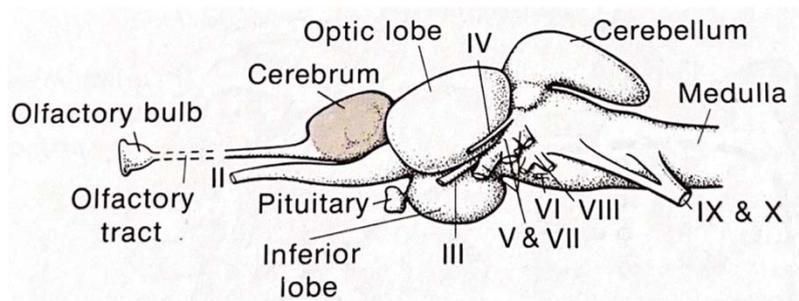
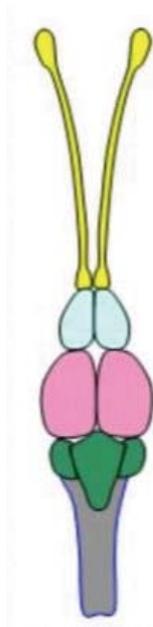
5/enlever délicatement les muscles et les os recouvrant le nerf optique ==> lien anatomique entre les yeux et l'encéphale visible

6/découper délicatement les apophyses dorsales des premières vertèbres cervicales ==> premiers segments de la moelle épinière visibles

A l'issue de votre dissection :

1/présentez votre dissection à l'un des examinateurs de votre salle ;

2/faites en un dessin légendé le plus précis possible.



	lobes olfactifs
	hémisphères cérébraux
	mésencéphale (lobes optiques)
	cervelet

NOM :

Prénom :

Salle N°

### **I.B. étude microscopique**

A partir de votre dissection, prélevez un échantillon de cortex cérébral et un échantillon de nerf. Réalisez un frottis de cortex cérébral (annexe 1) et une préparation de nerf dilacéré (annexe 2) ; observez vos préparations histologiques au microscope.

Pour chacune des préparations histologiques :

1/faites un dessin légendé ;

2/présentez à l'un des surveillants de votre salle la localisation du prélèvement, votre préparation au microscope et le dessin légendé correspondant.

*Plusieurs grossissements et leurs dessins respectifs peuvent être utilisés*

#### -frottis de cortex cérébral

\*prélèvement réalisé en superficie des hémisphères cérébraux (région encéphalique correctement identifiée par le candidat devait être validée par un examinateur)

\*les légendes à indiquer

-corps cellulaire de neurone (=soma)

-noyau

-nucléole

-corps de Nissl

-distinction dendrite/axone selon la présence (dendrites) ou l'absence (axone) de corps de Nissl dans l'émergence du prolongement à partir du soma

-noyau de cellules gliales

#### -préparation de nerf dilacéré

\*prélèvement du nerf optique (ou d'un nerf rachidien lorsque la dissection le permettait)

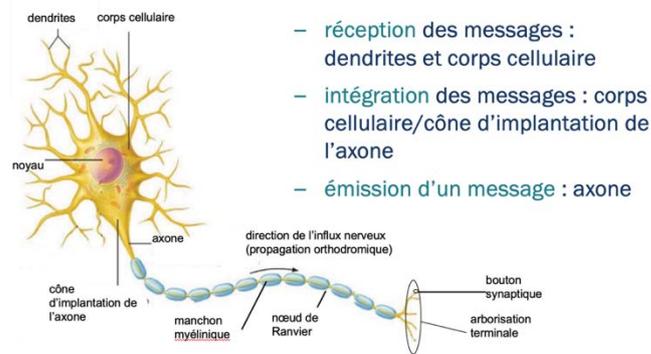
\*les légendes à indiquer

-fibre nerveuse myélinisée

-nœud de Ranvier

Dans le cadre ci-dessous, répondez à la question suivante : quels sont les différents types cellulaires qui composent le tissu nerveux et leurs caractéristiques fonctionnelles ? Organisez votre réponse en tenant compte de la distinction qui est faite entre le système nerveux central et le système nerveux périphérique.

### le neurone, une cellule polarisée

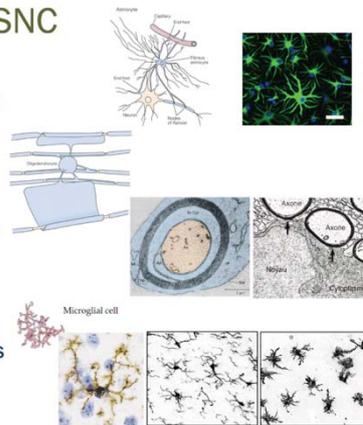


- réception des messages : dendrites et corps cellulaire
- intégration des messages : corps cellulaire/cône d'implantation de l'axone
- émission d'un message : axone

### les cellules gliales du SNC

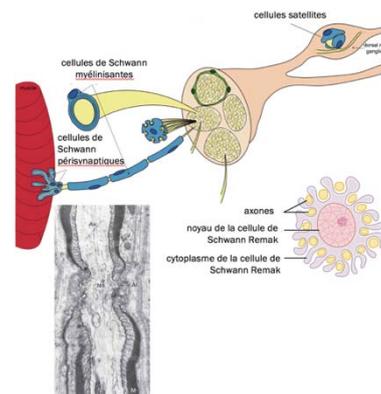
névroglie ou glie du grec ancien gloios (glue ; Rudolf Virchow, 1856)

- astrocytes : régulent l'environnement et le fonctionnement des neurones
- oligodendrocytes : responsables de la myélinisation, un oligodendrocyte établit plusieurs manchons myéliniques
- microglie : propriétés communes avec les macrophages



### les cellules gliales du SNP

- Schwann myélinisante
  - décrites par Ranvier, 1871
  - 1 cellule de Schwann fait 1 manchon myélinique
- Schwann non myélinisantes ou cellules de Schwann Remak
  - décrites par Remak, 1838
  - entourent les axones non myélinisés
- cellules satellites
  - entourent les corps cellulaires dans les ganglions
- cellules de Schwann périsynaptiques
  - ... réparation axones endommagés



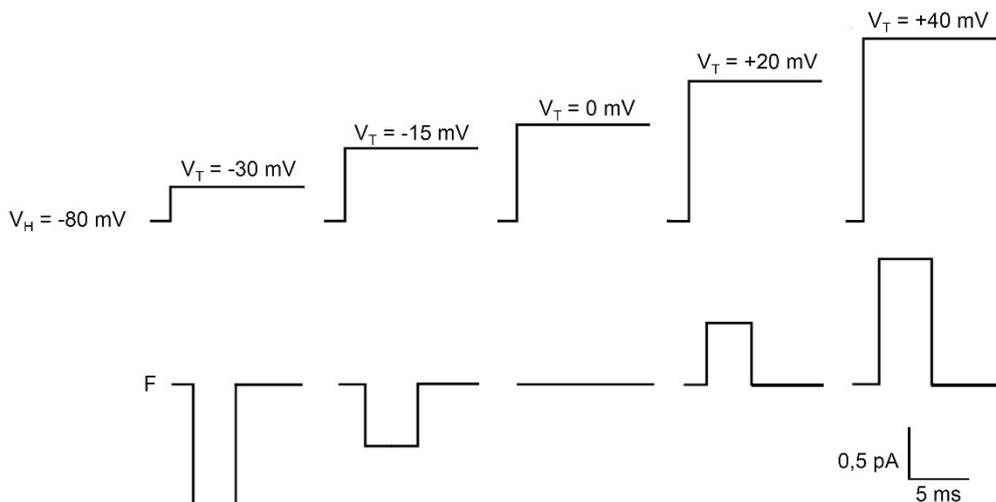
## Partie II : l'excitabilité du tissu nerveux, de sa mise en évidence aux mécanismes moléculaires impliqués

### II.A. Etude des propriétés électrophysiologiques d'un canal ionique à la l'aide de la technique du patch-clamp

On cherche à caractériser les propriétés électrophysiologiques des canaux chlorure exprimés à la membrane plasmique des neurones à l'aide de la configuration de patch-clamp en configuration « *inside-out* » (ou « détachée face interne vers le dehors »).

Pour cela, on a rempli la pipette de patch-clamp avec une solution contenant 140 mM NaCl et 14 mM KCl. La face interne du fragment de membrane est exposée avec une solution contenant 140 mM KCl et 14 mM NaCl.

Des sauts de potentiels à différentes valeurs ( $V_T$ ) sont appliqués à partir de la valeur initiale ( $V_H$ ) de -80 mV. Les courants obtenus aux différents  $V_T$  sont les suivants : -0,6 pA à -30 mV ; -0,3 pA à -15 mV ; 0 pA à 0 mV ; 0,4 pA à 20 mV et 0,8 pA à 40 mV. Le niveau « F » correspond aux périodes où le canal est fermé. Le potentiel du milieu extérieur est pris comme référence.



- 1) Donnez l'expression littérale de l'équation permettant de calculer le potentiel d'équilibre d'un ion. Nommez-la. Calculez le potentiel d'équilibre du potassium, du sodium et du chlorure. On utilisera pour le calcul  $2,3 (RT/F) = 60$  mV.

L'équation permettant de calculer le potentiel d'équilibre d'un ion est appelée l'équation de Nernst. Il est précisé dans l'énoncé d'utiliser pour le calcul du potentiel d'équilibre  $2,3 (RT/F) = 60$  mV. On attend donc que l'équation de Nernst soit exprimée avec un logarithme décimal, et non avec logarithme népérien.

On sait que  $\text{Ln}(x) = \text{Log}(x) \times \text{Ln}(10) = \text{Log}(x) \times 2,3$ .

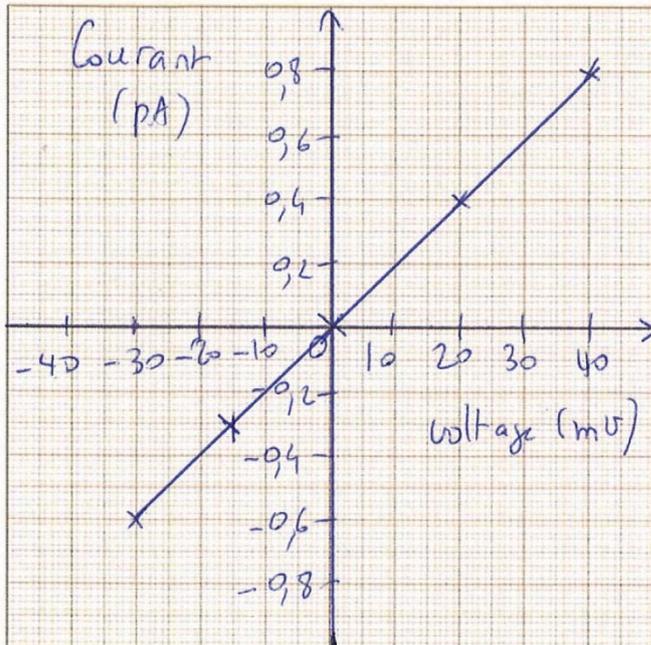
L'équation de Nernst est donc :

$$E_{ion} = 2,3 \frac{RT}{zF} \text{Log} \left( \frac{[ion]_{ext}}{[ion]_{int}} \right) V$$

Ainsi :

$E_{Cl^-} = 0$  mV ;  $E_{K^+} = -60$  mV ;  $E_{Na^+} = 60$  mV

2) Tracez la courbe courant/ $V_T$  correspondante.



3) Ecrivez l'équation reliant le courant à la conductance et au gradient électrochimique, et calculez la conductance du canal.

courant = conductance x gradient électrochimique

$$\text{conductance} = -0,6 \times 10^{-12} / ((-30 - 0) \times 10^{-3}) = 20 \times 10^{-12} \text{ S} = 20 \text{ pS}$$

4) D'après les résultats expérimentaux, à la valeur  $V_T = -15 \text{ mV}$ , quel est le sens (sortant ou entrant) du courant et du flux des ions  $\text{Cl}^-$  correspondant ? Justifiez votre réponse.

Le courant est négatif donc entrant. Le flux des ions  $\text{Cl}^-$  est donc sortant.

**II.B. Etude de la maturation et du trafic des canaux ioniques de la membrane plasmique**

Dans cette partie, on s'intéresse plus particulièrement aux canaux potassiques voltage-dépendants Eag1 (ou Kv10.1) exprimés à la membrane plasmique de plusieurs types cellulaires.

- 1) Comme toutes les protéines transmembranaires localisées à la membrane plasmique, l'ARNm mature du canal potassique Kv10.1 comporte une séquence codant un peptide signal.
  - a) A quel compartiment cellulaire sont adressées en premier lieu les protéines possédant un peptide signal ?

Réticulum endoplasmique rugueux

- b) Décrivez les principales étapes moléculaires se déroulant dans le cytoplasme permettant l'adressage de ces protéines vers la membrane de ce compartiment cellulaire.
  1. Dès que la séquence signal émerge du ribosome, la particule de reconnaissance du signal (SRP) la reconnaît et s'y attache ; la traduction est suspendue.
  2. La SRP escorte le complexe jusqu'à la membrane du RE et s'attache à son récepteur présent sur la membrane du RER.
  3. La SRP est libérée de son récepteur.
  4. Le ribosome se fixe à un complexe membranaire de translocation (translocon) présent sur la membrane du RER.

2) Des lysats provenant de cellules CHO préalablement transfectées avec un plasmide encodant le canal Kv1.10 ont été soumis à un western-blot. Préalablement à cette expérience, une partie des lysats a subi un pré-traitement à l'EndoH ou à la PNGase F dont le mode d'action est présenté sur la figure 1. Les résultats de l'expérience de western-blot sont présentés sur la figure 2. Analysez et interprétez les résultats de la figure 2.

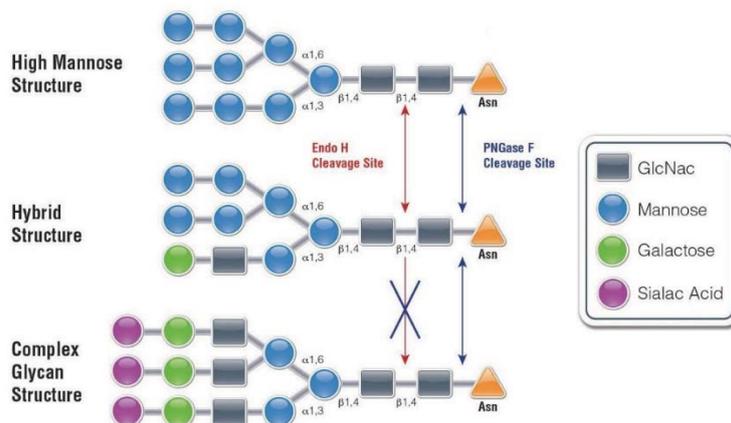


Figure 1. Sensibilité à l'endoglycosidase H (Endo H) et à la N-glycosidase F (PNGase F) des oligosaccharides liés aux glycoprotéines par une liaison N-glycosidique.

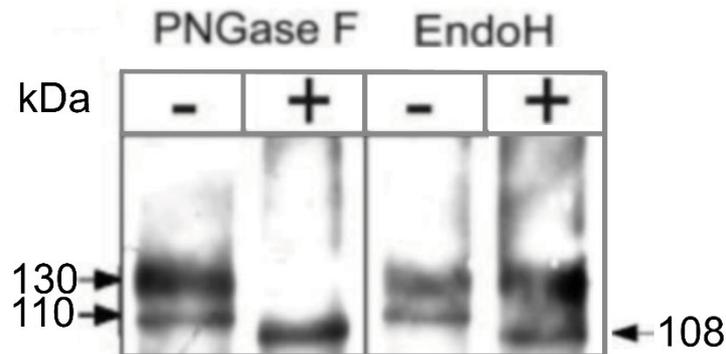


Figure 2. Analyse par western-blot des lysats des cellules CHO pré-traités (+) ou non (-) avec l'Endo H ou la PNGase F. D'après Napp *et al.* 2005.

Sans traitement par l'Endo H ou la PNGase F, le canal potassique Kv10.1 est présent dans les lysats sous deux poids moléculaires : l'une de 130 kDa et l'autre à 110 kDa.

Les protéines de 110 kDa sont sensibles à l'Endo H, et non celles de 130 kDa. D'après la Figure 2, l'Endo H clive des protéines qui possèdent des sucres qui sont rajoutés durant les étapes de la N-glycosylation qui se déroulent dans le réticulum endoplasmique puis dans l'appareil de Golgi. Les protéines de 110 kDa correspondent donc à des formes de protéines N-glycosylées qui transitent dans ces compartiments, et qui présentent d'abord des oligosaccharides riches en mannose, puis hybrides.

Les protéines de 130 kDa et 110 kDa sont sensibles à la PNGase F. D'après la Figure 2, la PNGase F clive des protéines qui possèdent des sucres qui sont rajoutés aux protéines durant les étapes de la N-glycosylation qui se déroulent dans le réticulum endoplasmique et l'appareil de Golgi. Dans la mesure où les protéines de 130 kDa ne sont pas sensibles à l'Endo H, elles correspondent donc formes de protéines N-glycosylées retrouvées dans l'appareil de Golgi, et qui présentent des oligosaccharides complexes. De plus, la forme non glycosylée de la protéine a un poids moléculaire de 108 kDa.

3) Les canaux potassiques Kv1.10 possèdent 6 sites consensus pour la N-glycosylation. Leur séquence est du type NX(S/T), avec X pouvant être n'importe quel acide aminé sauf la proline. Des lysats provenant de cellules CHO préalablement transfectées avec un plasmide encodant un canal Kv1.10 muté ont été soumis à un western-blot. Préalablement à cette expérience, une partie des lysats a subi un pré-traitement PNGase F. Les résultats de l'expérience de western-blot sont présentés sur la figure 3. Analysez et interprétez les résultats de la figure 3.

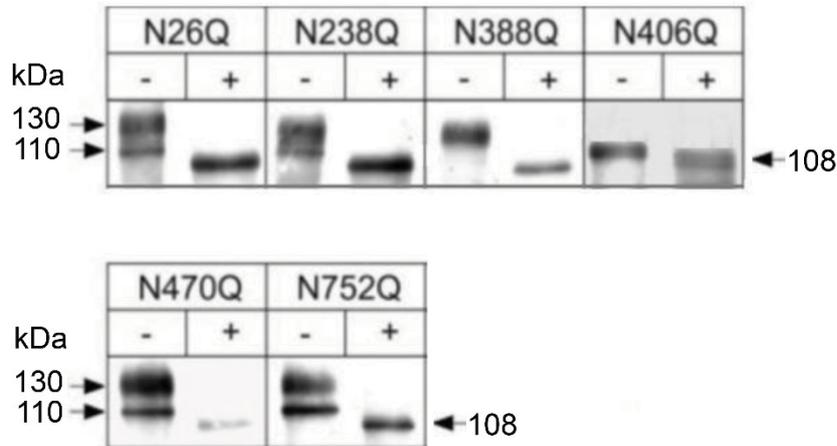


Figure 3. Analyse par western-blot des lysats des cellules CHO pré-traités (+) ou non (-) avec la PNGase F. D'après Napp et al. 2005.

Sans pré-traitement à la PNGase F, les mutants N26Q, N238Q, N470Q et N752Q se présentent sous les mêmes formes que celles observées pour la protéine sauvage (110 kDa et 130 kDa). Comme pour la protéine sauvage, ces formes sont N-glycosylées car elles sont sensibles au pré-traitement à la PNGase qui aboutit à la détection d'une forme non glycosylée de la protéine d'un poids moléculaire de 108 kDa. Ces données démontrent donc que la N-glycosylation ne s'effectue pas sur les asparagines 26, 238, 470 et 752.

Sans pré-traitement à la PNGase F, le mutant N388Q n'est présent que sous la forme de 130 kDa. La forme de 110 kDa n'est pas observée. Comme pour la protéine sauvage, la forme de 130 kDa est sensible au pré-traitement à la PNGase F qui aboutit à la détection d'une forme non glycosylée de la protéine d'un poids moléculaire de 108 kDa. Ce résultat démontre donc que les oligosaccharides riches en mannose et hybrides sont liés à l'asparagine 388.

Sans pré-traitement à la PNGase F, le mutant N406Q n'est présent que sous la forme de 110 kDa. La forme de 130 kDa n'est pas observée. Comme pour la protéine sauvage, la forme de 110 kDa est sensible au pré-traitement à la PNGase F qui aboutit à la détection d'une forme non glycosylée de la protéine d'un poids moléculaire de 108 kDa. Ce résultat démontre que les oligosaccharides complexes sont liés à l'asparagine 406.

4) Des membranes plasmiques provenant de cellules CHO préalablement transfectées avec un plasmide encodant un canal Kv1.10 sauvage ou muté ont été soumises à un western-blot. Les résultats de l'expérience de western-blot sont présentés sur la figure 4. Analysez et interprétez les résultats de la figure 4.

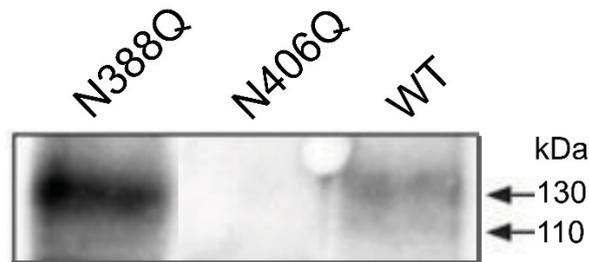


Figure 4. Analyse par western-blot de membranes plasmiques provenant de cellules CHO. Un léger signal à 110 kDa est détectable pour la forme sauvage (WT) du canal Kv1.10. D'après Napp *et al.* 2005.

Le mutant N388Q est exprimé à la membrane plasmique sous une forme de 130 kDa. La forme sauvage est essentiellement exprimée à la membrane plasmique sous une forme de 130 kDa. En revanche, le mutant N406Q n'est pas exprimé à la membrane plasmique.

De ce fait, les oligosaccharides liés à l'asparagine 388 ne sont pas indispensables pour l'expression à la membrane plasmique de Kv1.10. En revanche, ceux liés à l'asparagine 406 jouent un rôle important pour l'expression à la membrane plasmique de Kv1.10.

## Partie III : la communication chimique au sein du système nerveux

Vous disposez de plusieurs coupes coronales de moelle épinière de souris adultes au niveau cervical ou lombaire qui ont été soumises à un protocole d'immunohistochimie sur coupes flottantes.

Pour la réalisation de ce protocole, l'expérimentateur disposait des réactifs et du matériel indiqués dans le tableau ci-dessous.

réactifs (fiches techniques sous le tableau)	matériel
eau déminéralisée	matériel de protection individuel (gants, lunette, blouse)
tampon phosphate salin ( <i>BioLegend®</i> , <i>Phosphate Buffer Salin-PBS</i> , pH 7,4, 1M)	balance de précision (pesée maximum 220g ; pesée minimum 0,01g)
Triton X-100 ( <i>Bio-Rad®</i> )	micropipettes P10000, P1000, P200, P100, P10 et P2
albumine de sérum bovin ( <i>Sigma-Aldrich®</i> , <i>Bovin Serum Albumine-BSA</i> )	réfrigérateur
anticorps dirigé contre la choline acétyltransférase fait chez la chèvre ( <i>Chemicon®-Sigma-Aldrich®</i> , Gt-ChAT)	agitateur de plaques multi-puits
anticorps dirigé contre le fragment constant des anticorps de chèvre couplé à une peroxydase ( <i>Vector Laboratories®</i> , Horse Anti-Goat IgG Antibody (H+L), Peroxidase, 1mg/ml)	tubes de différents volumes
kit de substrats de la peroxydase ( <i>NeoBiotech®</i> , Nickel Enhanced 3,3'-Diaminobenzidine Tetrahydrochloride Substrate kit)	pipettes plastiques jetables

Sigma-Aldrich.

www.sigmaaldrich.com

### FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ

conformément au Règlement (CE) No. 1907/2006

#### RUBRIQUE 1: Identification de la substance/du mélange et de la société/l'entreprise

##### 1.1 Identificateurs de produit

Nom du produit : Gt X ChAT Affinity Purified Polyclonal Antibody

Code Produit : AB144P  
Code produit : 633470  
Marque : Millipore

##### 1.2 Utilisations identifiées pertinentes de la substance ou du mélange et utilisations déconseillées

Utilisations identifiées : Réactif pour le développement et la recherche

##### 1.3 Renseignements concernant le fournisseur de la fiche de données de sécurité

Société : Merck Life Science S.A.S  
80 Rue de Luzals  
F-38297 SAINT QUENTIN FALLAVIER CEDEX

#### RUBRIQUE 2: Identification des dangers

##### 2.1 Classification de la substance ou du mélange

N'est pas une substance ni un mélange dangereux conformément au règlement (CE) No. 1272/2008.

##### 2.2 Éléments d'étiquetage

Pas de pictogramme de danger, pas de mention d'avertissement, pas de mention(s) de danger, pas de conseil(s) de prudence requis

Sigma-Aldrich.

www.sigmaaldrich.com

### FICHE DE DONNÉES DE SÉCURITÉ

conformément au Règlement (CE) No. 1907/2006

#### RUBRIQUE 1: Identification de la substance/du mélange et de la société/l'entreprise

##### Identificateurs de produit

Nom du produit : Albumine de sérum bovin

Code Produit : A9418  
Marque : Sigma  
No REACH : Pas de numéro d'enregistrement disponible pour cette substance car cette substance ou ses usages sont exempts d'enregistrement, le tonnage annuel ne nécessite pas d'enregistrement ou bien l'enregistrement est prévu pour une date ultérieure  
No.-CAS : 9048-46-8

##### Utilisations identifiées pertinentes de la substance ou du mélange et utilisations déconseillées

Utilisations identifiées : Substances chimiques de laboratoire, Fabrication de substances

#### RUBRIQUE 2: Identification des dangers

##### Classification de la substance ou du mélange

N'est pas une substance ni un mélange dangereux conformément au règlement (CE) No. 1272/2008.

##### Éléments d'étiquetage

N'est pas une substance ni un mélange dangereux conformément au règlement (CE) No. 1272/2008.

**SAFETY DATA SHEET**



**1. Identification**

**Product Identifier**

**Product Name** Triton X-100

**Other means of identification**

**Catalog Number(s)** 1610407

**UNID no** UN3082

**Recommended use of the chemical and restrictions on use**

**Recommended use** Laboratory chemicals

**2. Hazard(s) identification**

**Classification**

This chemical is considered hazardous by the 2012 OSHA Hazard Communication Standard (29 CFR 1910.1200)

Acute toxicity - Oral	Category 4
Skin corrosion/irritation	Category 2
Serious eye damage/eye irritation	Category 1

**Hazards not otherwise classified (HNOC)**  
Not applicable

**Label elements**

**Danger**

**Hazard statements**  
Harmful if swallowed  
Causes skin irritation  
Causes serious eye damage

**Appearance** Liquid      **Physical state** Liquid      **Odor** Odorless

**Precautionary Statements - Prevention**  
Do not eat, drink or smoke when using this product.  
Immediately call a POISON CENTER or doctor.  
Wash face, hands and any exposed skin thoroughly after handling.  
Wear protective gloves/protective clothing/eye protection/face protection.

IF IN EYES: Rinse cautiously with water for several minutes. Remove contact lenses, if present and easy to do. Continue rinsing.  
IF SWALLOWED: Immediately call a POISON CENTER or doctor.  
IF ON SKIN: Wash with plenty of water and soap.  
If skin irritation occurs: Get medical advice/attention.  
Take off contaminated clothing and wash it before reuse.  
IF SWALLOWED: Call a POISON CENTER or doctor if you feel unwell. Rinse mouth.

**Safety Data Sheet**



**Identification**

**Product form** : Mixture  
**Product name** : Horse Anti-Goat IgG (H+L), Peroxidase  
**Product code** : PI-9500

**Recommended use and restrictions on use**

**Use of the substance/mixture** : Laboratory chemicals

**Supplier**

Vector Laboratories, Inc.  
6737 Mowry Ave  
Newark, CA 94560  
U.S.A  
T (650) 697-3600 - F (650) 697-0339  
customerservice@vectorlabs.com

**Individual protection measures/Personal protective equipment**

<b>Hand protection:</b>	
Protective gloves	
<b>Eye protection:</b>	
Safety glasses	
<b>Skin and body protection:</b>	
Wear suitable protective clothing	
<b>Respiratory protection:</b>	
In case of insufficient ventilation, wear suitable respiratory equipment	

**Personal protective equipment symbol(s):**



**Information on toxicological effects**

Acute toxicity (oral)	: Not classified
Acute toxicity (dermal)	: Not classified
Acute toxicity (inhalation)	: Not classified
Skin corrosion/irritation	: Not classified
Serious eye damage/irritation	: Not classified
Respiratory or skin sensitization	: Not classified
Germ cell mutagenicity	: Not classified
Carcinogenicity	: Not classified
Reproductive toxicity	: Not classified
STOT-single exposure	: Not classified
STOT-repeated exposure	: Not classified
Aspiration hazard	: Not classified
Viscosity, kinematic	: No data available

**DAB-Ni Substrate Kit**

**Nickel Enhanced 3,3'-Diaminobenzidine Tetrahydrochloride Substrate kit**

**#Cat : NB-23-00151**

**Intended Use**

DAB (3,3'-Diaminobenzidine ) is one of the most commonly used precipitating substrates for peroxidase. Our DAB-Ni substrate Kit is a nickel chloride enhanced DAB system with increased sensitivity and contrast compared to standard DAB. DAB-Ni will develop a black colored deposit upon reacting with peroxidase. The DAB-Ni Substrate Kit requires 5 minutes incubation on slides at room temperature. The color development may be carefully monitored under a microscope. After the appropriate color is observed, gently rinse the slides under tap water for 1-2 minutes to remove excess DAB-Ni substrate. The specimen may be counterstained, dehydrated and permanently mounted (NeoBio Mount Perm, catalog # NB-23-00156) before cover-slipping. All four components in the DAB-Ni kit are provided in concentrated form, which gives laboratories the advantage of easy storage and less shipping cost.

**Kit Components**

Reagent 1	DAB substrate buffer	12ml
Reagent 2	DAB Chromogen	12ml
Reagent 3	Hydrogen peroxide	12ml
Reagent 2	Nickel Solution	24ml

**Recommended Protocol**

Prepare 1ml of distilled water. Add 1 drop of DAB substrate (Reagent 1) into 1ml of distilled water. Mix well.  
Add 1 drop of DAB Chromogen (Reagent 2) and 1 drop of concentrated Hydrogen Peroxide (Reagent 3) to the diluted Reagent. Mix well.  
Add 2 drops of Nickel Solution (Reagent 4) to the mixture. Mix well.  
Incubate the sections with the mixture for 2 minutes (a gray coloration appears). Check under the microscope that this incubation time allows visualization of stained neurons (immunodetection clearly visible against background). Rinse sections with demineralized water.  
Keep away from light during operation and use the prepared DAB-Ni mixture within 5 hours.

**Precaution**

DAB nickel chloride may be carcinogenic. Please wear gloves and take other necessary precautions, such as eye protection, lab coat, and good laboratory procedures. Dispose in accordance with local regulations.



**PBS Concentrate (Previously Covance catalog# SIG-31020)**

<b>Catalog# / Size</b>	926201 / 1000 mL
<b>Regulatory Status</b>	RUO
<b>Other Names</b>	PBS
<b>Previously</b>	Signet Catalog# 1020 Covance Catalog# SIG-31020

**Product Details**

<b>Formulation</b>	1M Liquid Concentrated Buffer Solution, pH 7.4 (+/- 0.1).
<b>Storage &amp; Handling</b>	This product should be stored at room temperature.

Les coupes ont été obtenues à partir d'un échantillon de moelle épinière sectionné au cryostat en coupes de 40  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Elles ont été réparties dans les 24 puits d'une plaque multi-puit ; 3 à 6 coupes par puit dans un volume de 350  $\mu\text{L}$  de PBS 0,1M. Ce volume de 350  $\mu\text{L}$  est sélectionné car il permet à toutes les coupes d'être correctement baignées dans le liquide.

Le protocole ci-dessous a été réalisé :

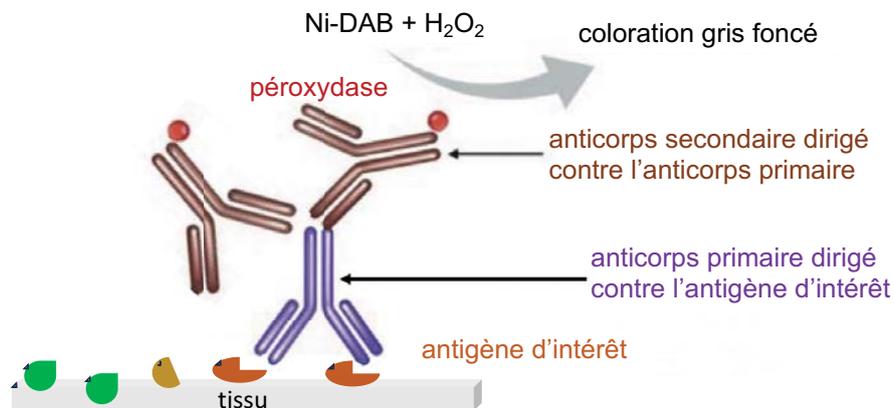
- PBS 0,1M ; 5 min à température ambiante sous agitation ;
- Peroxyde d'hydrogène ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) 3% dans PBS 0,1M ; 30 min à température ambiante sous agitation ;
- PBS 0,1M ; 5 min à température ambiante sous agitation ; x2 ;
- Triton X-100 à 0,3% dans PBS (PBST) ; 5 min à température ambiante sous agitation ;
- Albumine de Sérum bovin (*Bovine Serum Albumin*, BSA) 1% dans PBST ; 45 min à température ambiante sous agitation ;
- Anticorps primaire polyclonal dirigé contre la choline acétyltransférase fait chez la chèvre au 1:1000 dans BSA 1%/PBST (Chemicon®-Sigma-Aldrich®, Gt-ChAT) ; 48h à 4°C ;
- PBS 0,1M ; 5 min à température ambiante sous agitation ; x3 ;
- Anticorps dirigé contre le fragment constant de l'anticorps Gt-ChAT couplé à une peroxydase au 1:500 dans BSA 1%/PBST (Vector Laboratories®, Horse Anti-Goat IgG Antibody (H+L), Peroxidase) ; 2h à température ambiante sous agitation ;
- PBS 0,1M ; 5 min à température ambiante sous agitation ; x3 ;
- Kit de substrats de la peroxydase (*NeoBiotech*®, Nickel Enhanced 3,3'-Diaminobenzidine Tetrahydrochloride Substrate kit) ; 1 à 5 min à température ambiante sous agitation ;
- eau déminéralisée ; 2 min à température ambiante sous agitation ; x3.

Expliquez le principe du protocole d'immunohistochimie qui a été réalisé en décrivant et schématisant les étapes clés dans le cadre ci-dessous et en indiquant le rôle de chacun des réactifs utilisés dans le tableau ci-dessous.

#### Les étapes clés :

- inactivation des peroxydases endogènes par l' $\text{H}_2\text{O}_2$
- rinçage pour éliminer surplus  $\text{H}_2\text{O}_2$
- perméabilisation des membranes avant incubation avec des réactifs qui doivent pouvoir passer les membranes cellulaires : incubation avec une solution contenant le détergeant Triton X-100
- renforcement de la spécificité du marquage en limitant l'accès des anticorps au tissu de façon à ce que seules les liaisons spécifiques anticorps/antigène puissent occasionner une liaison des anticorps résistant à un rinçage : 1/incubation avec une solution contenant la BSA avant incubation avec les anticorps et 2/incubation des anticorps dans une solution contenant de la BSA
- incubation avec l'anticorps primaire
- rinçage pour éliminer le surplus d'anticorps primaire et éliminer les liaisons non spécifiques
- incubation avec l'anticorps secondaire
- rinçage pour éliminer le surplus d'anticorps secondaire et éliminer les liaisons non spécifiques
- incubation avec le kit substrat de la peroxydase

-rinçage pour stopper la réaction enzymatique et éliminer le surplus de réactifs



<u>réactifs</u>	<u>rôles</u>
PBS	mise en solution des différents réactifs et rinçage entre incubations avec les différents réactifs permettant de limiter le bruit de fond en enlevant les résidus perturbateurs ;
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	la réaction de détection utilisée dans ce protocole met en jeu une peroxydase. Or les tissus contiennent en quantité plus ou moins importante des peroxydases endogènes qui peuvent donc générer un bruit de fond non désiré. Ce bruit de fond peut être évité en incubant les tissus avec une solution d'H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> qui va inactiver les peroxydases endogènes.
Triton X-100	c'est un détergeant utilisé pour perméabiliser les membranes cellulaires ==> permettre l'entrée des réactifs dans les cellules ;
BSA	protéine utilisée comme agent de blocage qui empêche les liaisons non spécifiques des anticorps
anticorps Gt-ChAT	anticorps primaire utilisé à une concentration déterminée pour une fixation spécifique sur l'antigène d'intérêt, ici la choline acétyltransférase
anticorps Horse Anti-Goat IgG Antibody Peroxidase	anticorps secondaire pour amplification de l'immunomarquage ==> plusieurs anticorps secondaires fixés sur le fragment constant de l'anticorps primaire ==> plusieurs peroxydases pour un antigène donné
Kit de substrats de la peroxydase	solution de substrats de la peroxydase (DAB et H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ) ==> ici DAB réhaussée avec du Nickel obtention d'un précipité gris foncé

NOM :

Prénom :

Salle N°

Indiquez dans le tableau ci-dessous les calculs permettant d'obtenir les solutions à utiliser pour la réalisation du protocole d'immunohistochimie dans les 24 puits d'une plaque multi-puits. Pour cela, on vise à préparer les volumes de solutions nécessaires et suffisants. Indiquez le matériel utilisé pour la réalisation des mesures de volumes inférieurs à 15mL. Précisez les précautions en termes d'équipement de protection individuelles (EPI) nécessaires.

Volume nécessaire pour chaque étape du protocole : 24 puits x 350 $\mu$ L = 8400 $\mu$ L (8,4 mL)

solutions à préparer	justification du volume nécessaire	préparation de la solution
		si nécessaire, matériel utilisé pour la réalisation des mesures de de volumes inférieurs à 15mL
		si nécessaire, précaution(s) EPI
solution de PBS 0,1M	<p><u>les besoins :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-pour les rinçages : 9 rinçages</li> <li>-pour la préparation de la solution d'H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> à 3% : 1 incubation</li> <li>-pour la préparation de la solution de PBST utilisée seule ou avec la BSA : 4 incubations</li> </ul> <p>Donc</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>-PBST seul et avec BSA --&gt; 4x8,4=33,6 mL</li> <li>-PBS seul pour rinçages --&gt; 9x8,4=75,6mL</li> <li>-PBS pour solution H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> --&gt; 8,4mL</li> </ul> <p>==&gt; volume total nécessaire = 117,6mL, arrondi à 120mL</p>	<p>préparation à partir de la solution 1M disponible 12mL de PBS 1M +108mL d'eau déminéralisée</p>
		matériel mesure volume(s)<15mL micropipette P10000 pour mesure des 12mL
		précaution(s) EPI blouse
solution d'H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> 3%	-besoin uniquement pour étape d'inactivation des peroxydases endogènes --> 8,4mL	préparation 840 $\mu$ L d'H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> à 30% + 7,56mL de PBS 0,1M
		matériel mesure volume(s)<15mL -micropipette P10000 ou P1000 pour mesure des 840 $\mu$ L -micropipette P10000 pour mesure des 7,56mL
		précaution(s) EPI blouse et gants
solution de PBST 0,3%	-besoin pour la préparation de la solution de PBST utilisée seule ou avec la BSA (4 incubations) -->4x8,4=33,6 mL, arrondi à 34mL	préparation 102 $\mu$ L de Triton X-100 + 33,9mL de PBS
		matériel mesure volume(s)<15mL -micropipette P200 ou P1000 pour mesure des 102 $\mu$ L
		précaution(s) EPI blouse, gants et lunettes
solution de BSA 1%	-besoin pour l'étape de blocage des sites non spécifiques et pour les incubations des anticorps primaires et secondaires --> 3x8,4=25,2 mL, arrondi à 26mL	préparation 0,26g de BSA dans 26mL de PBST 0,3%
		matériel mesure volume(s)<15mL ####
		précaution(s) EPI blouse, gants et lunettes

NOM :

Prénom :

Salle N°

solution d'anticorps anti-ChAT au 1 :1000	-besoin pour étape incubation anticorps primaire --> 8,4mL	préparation 8,4µL d'anticorps +8,3916mL de BSA 1%/PBST 0,3%
		matériel mesure volume(s)<15mL -micropipette P10 pour mesure des 8,4µL -micropipette P10000 pour mesure des 8,392 mL de BSA 1%/PBST 0,3%
		précaution(s) EPI blouse, gants et lunettes
solution d'anticorps anti-chèvre couplé à une peroxydase	-besoin pour étape incubation anticorps secondaire --> 8,4mL	préparation 16,8µL d'anticorps +8,3832mL de BSA 1%/PBST 0,3%
		matériel mesure volume(s)<15mL -micropipette P100 pour mesure des 16,8µL -micropipette P10000 pour mesure des 8,383 mL de BSA 1%/PBST 0,3%
		précaution(s) EPI blouse, gants et lunettes
solution de substrats de la peroxydase	-besoin pour révélation immunodétection --> 8,4mL ... selon fiche technique, préparation par mL --> 9mL	préparation selon fiche technique, dans 9 mL d'eau déminéralisée, ajouter 9 gouttes du réactif 1, mixer (obtention tampon), ajouter 9 gouttes réactif 2 (substrat, chromogène, DAB), 9 gouttes réactif 3 (substrat H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ), mixer, ajouter 18 gouttes Nickel (ion métallique qui augmente le contraste du produit coloré résultant de la réaction d'oxydation de la DAB)
		matériel mesure volume(s)<15mL -P10000 pour mesure des 9mL
		précaution(s) EPI blouse, gants et lunettes

Quels contrôles devraient avoir été faits en parallèle de l'immunodétection ayant permis l'obtention des coupes immunomarquées permettant de s'assurer de la spécificité du marquage obtenu et d'apprécier un éventuel marquage non spécifique ?

**-inhibition de l'activité de l'anticorps à l'aide de l'antigène :**

préincuber l'anticorps primaire avec la séquence peptidique utilisée pour produire l'anticorps --> les sites de liaison occupés par l'antigène ne pourront ainsi plus se fixer sur les molécules reconnues dans les tissus ; c'est un test d'inhibition ou de compétition ==> absence de neurones immunomarqués

**-omettre l'anticorps primaire :**

tous les marquages causés par l'anticorps primaire disparaissent et ne persistent que les marquages non spécifiques dus à la fixation non spécifique de l'anticorps secondaire ou à présence dans le tissu de peroxydase endogènes n'ayant pas été suffisamment inactivées ==> absence de neurones immunomarqués

**-omettre le système de révélation :**

soit l'anticorps secondaire, soit la solution de substrats de la peroxydase ==> absence de neurones immunomarqués et absence de bruit de fond

Observer une des coupes dont vous disposez au microscope (annexe 3) et faites un dessin orienté et légendé de votre observation en localisant les motoneurons parmi les populations de cellules immunomarquées.

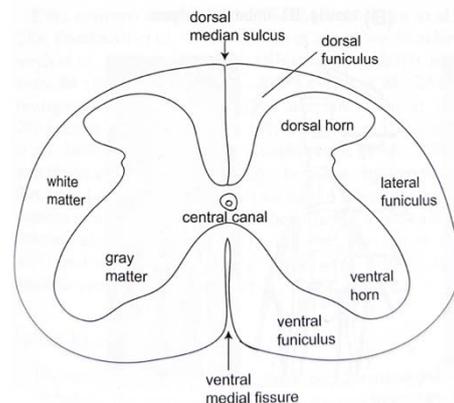
Présentez à l'un des surveillants de votre salle votre observation au microscope et le dessin légendé et orienté correspondant.

**Orientation/légendes du dessin :**

-ventral/dorsal (à repérer par la présence de la fissure médiane ventrale + forme de la substance grise)

-substance grise (régionalisation en corne)/substance blanche (régionalisation en cordon)

-canal central=canal de l'épendyme



**Observation coupe soumise au protocole immunodétection :**

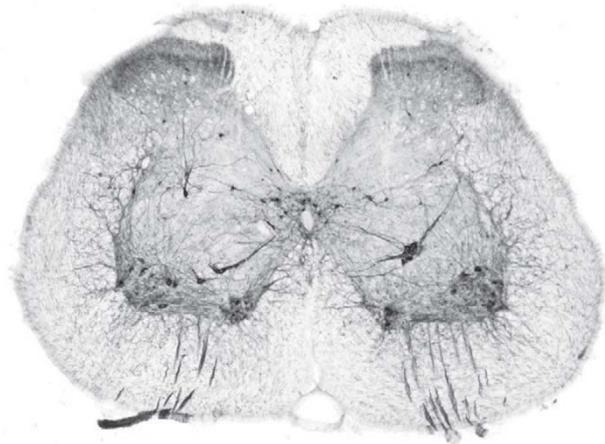
-marquage d'une petite quantité de corps cellulaires de neurones et leurs prolongements

-selon le niveau de coupe, possibilité de visualiser les faisceaux d'axones traversant la substance blanche et formant les racines ventrale (motrices)

-localisation des neurones marqués :

\*dans la corne ventrale (Rexed 9) ==> des motoneurons

\* autour du canal central et dans la corne intermédiaire



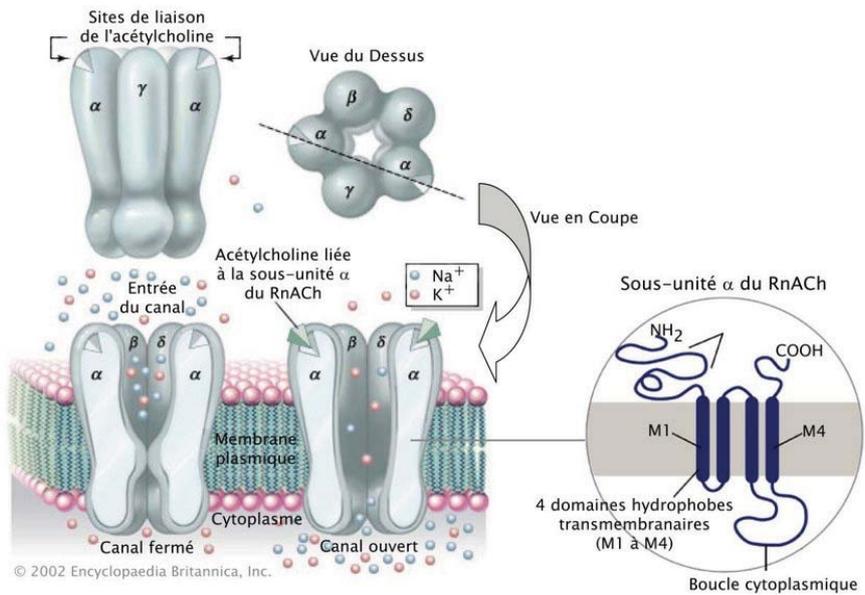
Qu'est-ce qu'un motoneurone ? Quel est le messager chimique qu'il libère ?

- Un motoneurone est un neurone dont l'axone est en lien synaptique avec une fibre musculaire.
- Un motoneurone libère de l'acétylcholine.

Au niveau moléculaire, qu'entraîne la fixation du messager chimique libéré par le motoneurone sur le récepteur présent sur la cellule cible. Développez votre réponse en décrivant les acteurs moléculaires intervenant de la réception du messager chimique au sein de la jonction neuro-musculaire à l'effet global observé sur la cellule cible. *Vous pouvez vous aider de schémas explicatifs.*

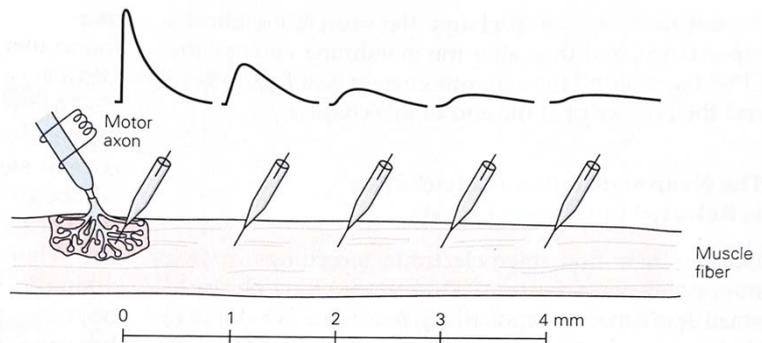
**-fixation de l'acétylcholine sur le récepteur nicotinique présent sur la membrane de la fibre musculaire**

L'acétylcholine libérée (par l'élément présynaptique) se fixe sur un récepteur de type nicotinique (ionotropique ; pentamère : 2 sous-unités alpha, 1 sous-unité beta, 1 sous-unité gamma) présent sur la membrane plasmique (sarcolemme) de la fibre musculaire (élément post-synaptique)



; 2 molécules d'acétylcholine se fixent sur les 2 sous-unités alpha du récepteur ce qui conduit à un changement de conformation du pentamère à l'origine de l'ouverture d'un pore perméable essentiellement aux ions Na<sup>+</sup> et K<sup>+</sup> et également dans une moindre mesure aux ions Ca<sup>2+</sup> et Mg<sup>2+</sup>. Chaque sous-unité du récepteur nicotinique comprend 1 grand domaine extracellulaire en N-terminal, 4 domaines transmembranaires (M1-M4 ; hélices α ; le canal est délimité par les sous-unités M2 de chaque sous-unités) et 1 court domaine extracellulaire en C-terminal.

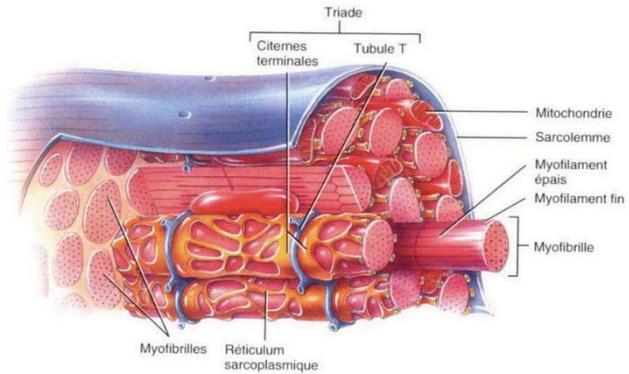
Les gradients de concentration des ions impliqués conduisent à une forte entrée de Na<sup>+</sup> et une faible sortie de K<sup>+</sup> ==> dépolarisation appelée potentiel de plaque motrice qui se propage le long de la membrane de façon électrotonique (diminution de l'amplitude de la dépolarisation en fonction de la distance parcourue).



Rq, l'acétylcholine estérase présente dans la fente synaptique dégrade l'acétylcholine ce qui met fin aux effets du messager chimique.

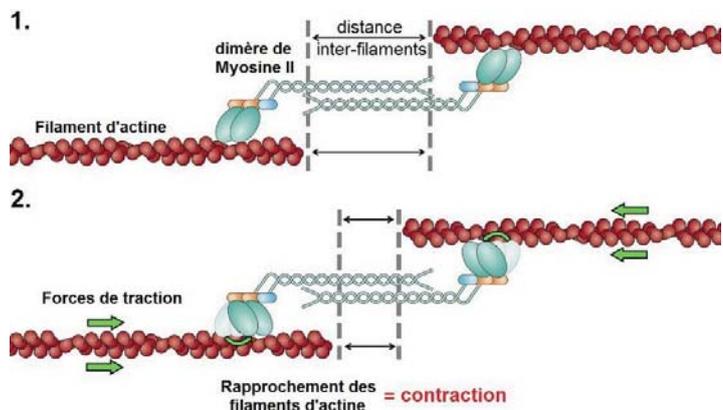
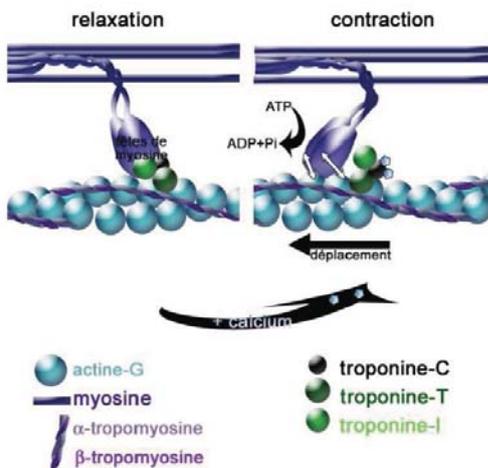
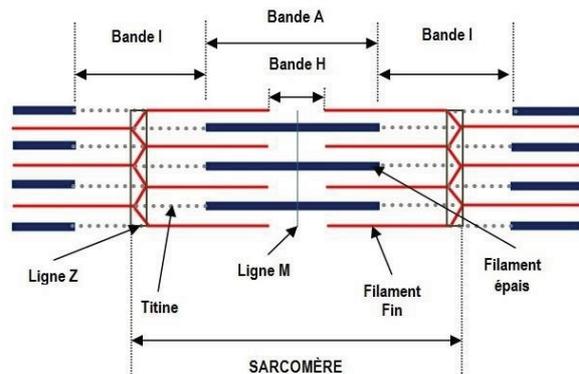
**-du potentiel de plaque motrice à la contraction musculaire.**

Si l'amplitude du potentiel de plaque motrice est importante (= dépasse un seuil critique), des canaux  $Na^+$  voltage-dépendant situés sur la membrane postsynaptique s'ouvrent et induisent la genèse d'un potentiel d'action musculaire. Ce potentiel d'action se propage à l'ensemble du sarcolemme, y compris le long des tubules transverses (tubules T), atteignant les triades



(structure formée d'un tubule T entouré de réticulum sarcoplasmique de part et d'autre). Au niveau de ces triades, l'arrivée du potentiel d'action conduit à la libération de  $Ca^{2+}$  stockés dans le réticulum sarcoplasmique ; la membrane des tubules T contient des récepteurs à la dihydropyridine (DHP) mécaniquement liés à des canaux  $Ca^{2+}$  situés sur le réticulum sarcoplasmique (également appelé récepteur à la ryanodine) ==> sortie de  $Ca^{2+}$  du fait du gradient de concentration.

L'augmentation de  $Ca^{2+}$  intracellulaire permet la contraction par glissement des filaments épais de myosine sur les filaments fin d'actine au sein de chaque sarcomère. La troponine L ne démasque les sites de fixation de la myosine sur l'actine que lorsque la troponine C a lié du  $Ca^{2+}$  et change de conformation. Une fois la tropomyosine déplacée avec le complexe troponine, la myosine accède à son site de fixation sur l'actine. L'hydrolyse d'une molécule d'ATP permet le relâchement de la tête de myosine qui vient s'associer avec l'actine. La libération de l'ADP provoque le mouvement de la tête de myosine vers l'extérieur du sarcomère, ce qui raccourcit la myofibrille et réalise la contraction musculaire. Au repos, la myosine est liée à une molécule d'ATP.



**Annexe 1**

- prélever à l'aide d'une aiguille lancéolée ou de la pointe d'un scalpel une petite quantité de cortex cérébral ;
- étaier le tissu prélevé sur une lame en verre ;
- déposer 1 à 2 gouttes de colorant sur le tissu étalé ; laisser agir 2 minutes ;
- déposer 1 à 2 gouttes d'eau délicatement ;
- recouvrir d'une lamelle.

**Annexe 2**

- prélever un nerf sur la distance la plus longue possible ;
- déposer le nerf prélevé sur une lame en verre ;
- maintenir une des extrémités du nerf avec une pince ;
- peigner plusieurs fois le nerf avec une aiguille de l'extrémité maintenue par la pince à l'autre extrémité ;
- déposer 1 à 2 gouttes de colorants ; laisser agir 2 minutes
- recouvrir d'une lamelle.

**Annexe 3**

- déposer une coupe de moelle épinière sur une lame en verre à l'aide d'un pinceau ;
- déposer quelques gouttes d'eau sur la coupe ;
- recouvrir d'une lamelle.

## 5.5 Epreuve de travaux pratiques de contre-option du secteur B : Sujet et commentaires

### Présentation générale

L'épreuve de travaux pratiques sur les connaissances générales du secteur b portait sur l'étude d'un organisme, l'Abeille domestique *Apis mellifera* (aussi appelée Abeille européenne). L'objectif était à la fois d'aborder des aspects variés du programme (écologie, reproduction, histologie, anatomie, génétique) ainsi que des compétences diverses comme la réalisation de coupes histologiques, avec ou sans coloration, le suivi de protocoles expérimentaux, la réalisation de calculs ou la présentation de résultats et leur analyse.

Une grande liberté a été laissée aux candidats pour présenter et valoriser leur exploitation du matériel biologique fourni, et toute présentation pertinente était valorisée dès lors que la communication écrite ou graphique était de qualité et montrait une compréhension de la part du candidat.

La première partie s'appuyait les relations interspécifiques de l'abeille. Il s'agissait tout d'abord de reconnaître quelques espèces susceptibles d'être présentes dans l'environnement de l'abeille, et d'indiquer le type de relation interspécifique entretenue avec l'abeille. Une étude anatomique (montage de trachée thoracique) permettait de déterminer si un échantillon fourni était ou non parasité par un acarien, *Acarapis woodi*.

La seconde partie, la plus longue, traitait de l'abeille dans le cadre de la pollinisation. Il s'agissait en premier lieu de savoir quel type de pollen était susceptible d'être transporté par des insectes, avant de s'intéresser spécifiquement à l'abeille. Les candidats devaient présenter des adaptations morphologiques au transport du pollen, utiliser une vidéo pour faire le lien entre la danse des abeilles et la localisation d'une source de nourriture, réaliser des calculs de surface pollinisée par une abeille et calculer des indices de biodiversité de l'écosystème à partir de l'étude de pollens. Les candidats devaient ensuite, à partir de divers échantillons, montrer que les abeilles prélèvent avec leurs pièces buccales dans leur environnement du nectar mais aussi du miellat.

Enfin, une troisième partie plus théorique permettait aux candidats de discuter des facteurs génétiques à l'origine du déterminisme du sexe chez l'abeille.

L'espèce choisie, l'abeille, est un organisme courant dans l'environnement mais également dans le débat public, et le jury insiste sur l'importance de connaître la biologie fondamentale

de cette espèce si souvent évoquée. Par ailleurs, sa petite taille et sa relative abondance en font un organisme de choix dans un cadre pédagogique. Le jury espère que ce sujet permettra aux enseignants et futurs enseignants de proposer des manipulations à leurs élèves et étudiants.

## **Présentation détaillée et commentaires**

L'épreuve était longue et peu de candidats ont pu tout traiter, ce dont le jury a bien sûr tenu compte. Toutefois, le jury rappelle l'importance de prendre connaissance de l'ensemble du sujet au début de l'épreuve et d'organiser son temps en conséquence. Une coloration carmino-vert nécessite par exemple des temps d'incubation minimum et ne peut être commencée trop tardivement.

### Première partie

Le jury rappelle qu'une culture naturaliste de base est essentielle à l'enseignement des SV-STU. Les reconnaissances d'espèces ayant globalement été peu réussies, les interactions avec l'abeille l'ont en conséquence également été. Deux espèces étaient à reconnaître par leur chant : la Mésange charbonnière ainsi que le Pinson des arbres. Le jury s'étonne que moins de 5% des candidats sachent reconnaître ces deux espèces pourtant largement abondantes dans de nombreux milieux. Il est regrettable que la culture naturaliste se restreigne à une capacité de reconnaissances « sur photo », et le développement d'outils numériques et d'applications d'identification d'espèces ne doit pas remplacer une culture naturaliste fondamentale.

Pour déterminer si l'abeille était infectée par un acarien dans une trachée, il était nécessaire d'ouvrir l'animal et d'observer une trachée au microscope. Les préparations de trachées n'ont que trop rarement été effectuées, les candidats réalisant souvent un simple décollement de la cuticule mettant en évidence les muscles alaires. Le jury regrette que le matériel optique adéquat à l'échelle étudiée soit rarement utilisé (confusion microscope / loupe binoculaire). De plus, le jury rappelle que l'épreuve est muette et qu'une explication orale venant pallier une absence de légende sur la production écrite ne peut être valorisée.

### Seconde partie

Une dissection florale de Poacée était demandée, à mettre en lien avec le type de pollinisation. Si les candidats ont dans l'ensemble bien identifié la famille de la plante, les légendes étaient globalement incorrectes. Une *dissection* florale n'est pas une *formule* florale, ni un *diagramme* floral, et il n'était pas utile de réaliser ce qui n'était pas demandé. Trop peu de candidats ont mis en évidence et expliqué le rôle (pourtant demandé) des pièces florales.

Quant aux ressemblances entre les pollens de familles différentes, le jury a relevé dans une seule copie (!) le terme « d'homoplasie » aux dépens du terme de « convergence ». Le jury rappelle que les deux termes ne sont pas synonymes et que, en l'absence d'informations supplémentaires, il convient d'utiliser « homoplasie » plutôt que « convergence ».

Les adaptations anatomiques à la récolte du pollen ont plutôt été bien réussies par les candidats, mais avec une vision du processus de pollinisation (l'abeille utilise ses pattes une fois arrivée sur la fleur) qui n'incluait que trop rarement le vol en lui-même.

L'atelier permettant de retrouver la localisation des fleurs à partir d'une danse d'abeille a été bien réussi par les candidats.

Il s'agissait ensuite de calculer la surface pollinisée par une abeille, la ruche constituant le point central, et la distance de butinage (le rayon) étant donnée. Le jury s'étonne qu'environ 60% des candidats ne connaissent pas la formule d'un disque ( $\pi \times R^2$  – programme de cycle 3 en mathématiques) et ne sache pas ensuite l'appliquer, les valeurs étant données. L'énoncé demandait explicitement de « *Calculer* une surface », et toutes les réponses non quantifiées qui expliquaient textuellement le comportement des abeilles n'ont pu donc être valorisées. Le jury rappelle qu'il est important de tenir compte des verbes d'action pour identifier les attendus du sujet.

Les indices de biodiversité à *calculer* (à nouveau) à partir de l'analyse de pollens ont donné lieu à seulement quelques réponses satisfaisantes. Le jury rappelle que les indices de Shannon et Simpson sont explicitement au programme de l'agrégation SV-STU. Les candidats ont néanmoins globalement bien critiqué l'utilisation du miel comme outil de mesure de la biodiversité dans l'écosystème.

Les candidats devaient ensuite étudier une fleur de Sauge et la disséquer afin de mettre en évidence des structures en lien avec la pollinisation. Il était explicitement demandé que la dissection florale réponde à une question et que certains organes soient mis en évidence et leur rôle expliqué. Sur la forme, le jury rappelle qu'une dissection se présente sur un support propre et pas directement sur la table ou sur la vitre de la loupe. Une feuille par exemple permet de fixer les parties de la fleur, de les légenter, en s'attachant uniquement aux légendes pertinentes dans le cadre de la question biologique posée. Globalement, les attendus d'une dissection florale sont rarement maîtrisés : présentation d'une partie des pièces seulement, position de l'ovaire et soudure peu ou mal montrée, et les légendes attendues en lien avec le mode de pollinisation sont rares bien que demandées. De nombreux candidats ont également confondu l'organisation de la fleur des Lamiacées avec celle des Fabacées.

La coupe d'aiguille de pin et la coloration carmino-vert associée ont été techniquement plutôt bien réussies, mais de nombreuses confusions ont été réalisées entre canaux résinifères et phloème.

Enfin, l'exercice sur les pièces buccales a été plutôt moyennement réussi. Il était à nouveau demandé d'explicitier le rapport structure/fonction de ces pièces, ce qui a rarement été réalisé. L'extraction des pièces buccales de l'abeille a été souvent tentée avec des résultats mitigés (extractions partielles ou fragmentées).

### Troisième partie

Les caryotypes mâles et femelles ont été bien déterminés, mais l'explication de l'origine de ces caryotypes était parfois réduite à des mots-clefs (« parthénogenèse », « arrhénotoquie »...) alors qu'un schéma avec des formules chromosomiques était plus judicieux.

L'explication de l'origine et de la proportion des mâles aux yeux blancs supposait de réaliser des tableaux de croisement ; ceux-ci ont souvent été réalisés, mais les conclusions restent incomplètes sur les proportions des différents génotypes associés à leurs phénotypes.

Enfin, probablement par manque de temps, la dernière question relative aux mâles diploïdes n'a pas toujours été traitée, ou alors de manière globale en termes de probabilité.

Dans les pages suivantes, le sujet est présenté avec des éléments de correction apparaissant **en bleu**.

# AGRÉGATION DE SCIENCES DE LA VIE – SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2025

TRAVAUX PRATIQUES DE CONTRE OPTION DU SECTEUR B  
CANDIDATS DES SECTEURS A ET C

Durée totale : 2 heures

## L'Abeille domestique

Ce TP est organisé en **trois parties indépendantes**. Certaines parties contiennent des manipulations, prévoyez donc votre **organisation en conséquence**. Un planning de passage est prévu pour les ateliers.

<b><u>PARTIE I : ORIGINE EVOLUTIVE ET RELATIONS INTERSPECIFIQUES D'APIS MELLIFERA (DUREE CONSEILLEE : 15 MINUTES)</u></b> .....	<b>6</b>
1.1. DETERMINATION DE QUELQUES ESPECES ET DE LEUR RELATION INTERSPECIFIQUE AVEC L'ABEILLE DOMESTIQUE .....	6
1.2 L'ABEILLE ET L'ACARIOSE .....	6
<b><u>PARTIE II : APIS MELLIFERA, UNE BUTINEUSE (DUREE CONSEILLEE : 1H30)</u></b> .....	<b>6</b>
2.1 POLLENS ET MODES DE POLLINISATION .....	6
2.2 COMPORTEMENT DE BUTINAGE D'APIS MELLIFERA.....	7
2.3 BUTINAGE ET DIVERSITE DE L'ECOSYSTEME.....	9
2.4 APIS MELLIFERA, UNE BUTINEUSE DE MIELLAT ET DE NECTAR .....	11
<b><u>PARTIE III : DETERMINISME DU SEXE CHEZ APIS MELLIFERA (DUREE CONSEILLEE : 15 MINUTES)</u></b> .....	<b>13</b>

L'évaluation de plusieurs manipulations et de leur exploitation sera réalisée pendant l'épreuve par un examinateur avec lequel il ne vous sera pas possible de communiquer oralement. La mention **« Appelez l'examineur pour évaluation »** vous invite ainsi à présenter sur votre paillasse vos croquis et autres analyses par écrit sur des feuilles blanches mises à votre disposition puis à appeler un examinateur.

**Les réponses aux questions figureront dans les cadres réservés à cet effet.**

**N'oubliez pas d'appeler les examinateurs lorsque cela est demandé.**

**AVANT DE REMETTRE VOTRE DOSSIER, VÉRIFIEZ QUE VOUS AVEZ BIEN INDIQUÉ VOS NOM, PRÉNOM ET NUMÉRO DE SALLE EN TÊTE DE TOUS LES DOCUMENTS.**

**Vous devez rendre la totalité des feuilles du dossier.**

## Partie I : Origine évolutive et relations interspécifiques d'*Apis mellifera* (durée conseillée : 15 minutes)

### 1.1. Détermination de quelques espèces et de leur relation interspécifique avec l'Abeille domestique

- Complétez l'**annexe 1** à la fin du dossier. Vous **remplirez** le tableau le plus précisément possible en nommant les espèces fournies, en indiquant quelques critères permettant de les positionner dans l'arbre du vivant. Vous donnerez enfin le type de relation interspécifique le plus fréquent que les individus de ces espèces entretiennent avec *Apis mellifera*.

### 1.2 L'abeille et l'acariose

- Les abeilles domestiques sont parfois parasitées par un acarien (*Acarapis woodi*) qui se loge à l'intérieur des trachées thoraciques des individus. À l'aide d'une présentation judicieusement réalisée, déterminez si l'abeille dont vous disposez est infectée ou non par cet acarien.  
**Appelez l'examineur pour évaluation.**  
Il s'agissait ici de valoriser tout candidat ayant réalisé un montage de trachée thoracique judicieusement présentée et légendée.

## Partie II : *Apis mellifera*, une butineuse (durée conseillée : 1h30)

### 2.1 Pollens et modes de pollinisation

- Donnez, sans justification, la famille des plantes A, B et C.  
Les plantes A et B étaient des Poacées et la plante C une Plantaginacée.
- **Réalisez** une dissection florale de la plante A en mettant en évidence les organes en lien avec la pollinisation. **Annotez** votre croquis de façon à éclairer votre démarche.  
**Appelez l'examineur pour évaluation.**  
Il était ici attendu que le candidat présente des adaptations anatomiques à l'anémogamie : fleurs « discrètes » à périanthe réduit facilitant l'exposition des pièces fertiles, absence de nectaire.
- **Comparez** les pollens (i) des plantes A, B et C d'une part et (ii) d'une des pelotes (P) de pollen prélevée sur une abeille d'autre part. **Mettez en relation** la différence des caractéristiques morphologiques des grains de pollen issus de la pelote et ceux des plantes A, B et C et les modes de pollinisation.  
Les plantes A, B et C, à pollinisation anémogame, ont des grains de pollen globalement plus petits (plus fort rapport surface/volume) et moins ornementés que ceux de pelote, d'une plante donc entomogame.

- **Nommez** le processus évolutif ayant conduit aux similarités morphologiques entre les pollens des espèces A, B et C.  
**Il s'agit d'une homoplasie.**

## 2.2 Comportement de butinage d'*Apis mellifera*

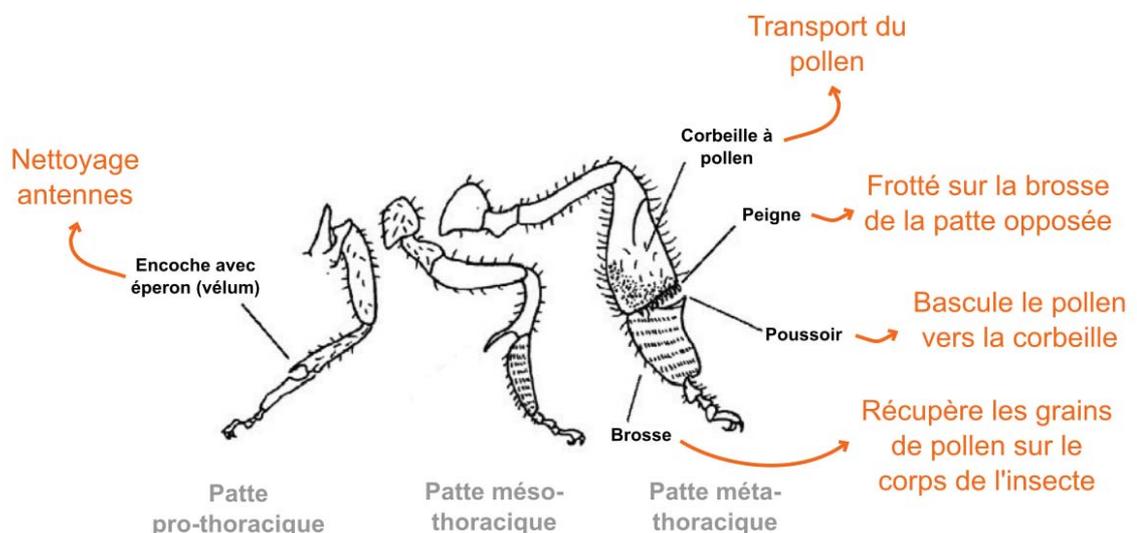
- **Justifiez** quel est le comportement de butinage de l'Abeille domestique à partir de l'analyse du contenu d'une pelote de pollen (P) fournie.  
**Les grains de pollen sont tous identiques : lors d'une sortie, une abeille butineuse ne visite qu'une seule espèce de plante.**

- **Présentez**, selon la méthode de votre choix, les adaptations morphologiques au transport du pollen de l'Abeille domestique.

**Appelez l'examineur pour évaluation.**

**Quelques adaptations :**

- au niveau des pattes :
  - **Patte postérieure avec :**
    - corbeille à pollen sur la face externe du tibia
    - brosse sur le premier article du tarse
  - **Patte antérieure avec une encoche permettant de broser les antennes**
- Au niveau des ailes : des crochets sur l'aile postérieure (hamuli) permettant un couplage mécanique des ailes antérieure et postérieure qui augmente l'efficacité énergétique du vol



Patte antérieure



Patte postérieure



- En utilisant la vidéo fournie (**Atelier 2**) et le texte explicatif associé, **positionnez** aussi précisément que possible la source de nourriture sur la figure ci-dessous. Un chronomètre est fourni. Vous expliquerez sommairement votre raisonnement.

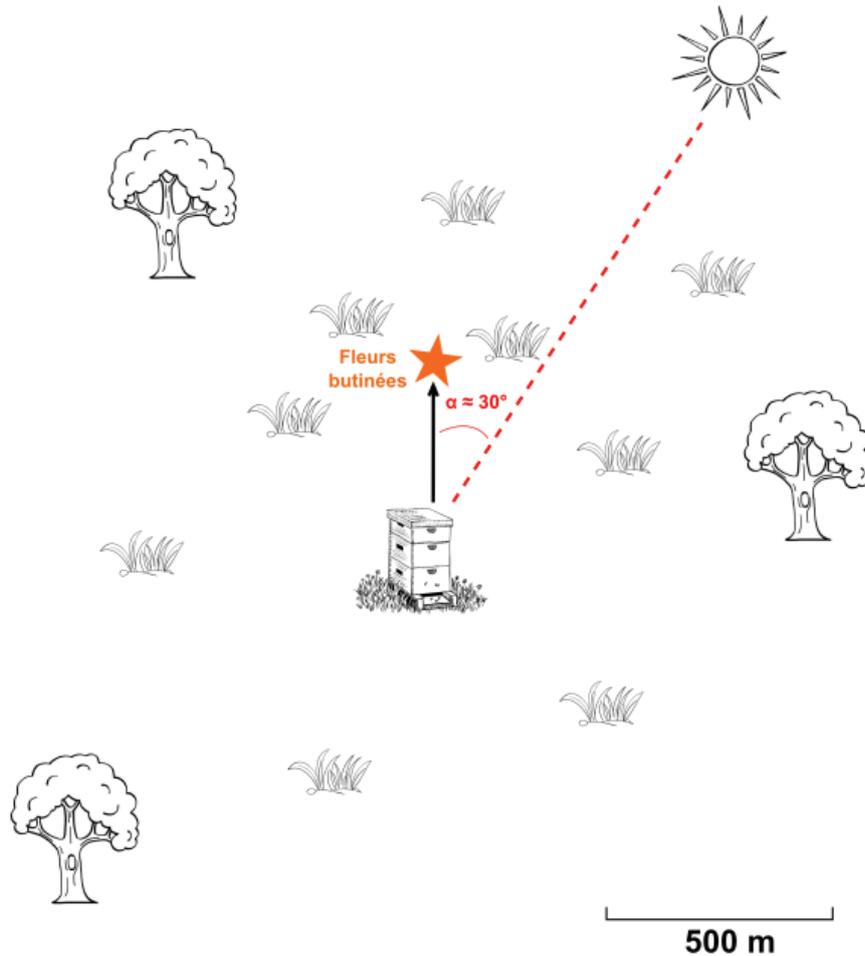
**1 - La direction de la source de nourriture correspond à l'angle effectué lors du segment central en rouge :**

- si la source de nourriture est dans la direction du soleil, l'abeille va se diriger verticalement de bas en haut de cette portion
- si la source se trouve à 30° à droite par rapport à la direction du soleil, le segment qu'elle décrira sera incliné de 30° à droite par rapport à la verticale, elle la parcourra de bas en haut.
- Si la source est à l'opposé du soleil, son trajet se fera alors de haut en bas.

**2 – La distance de la source de nourriture correspond au temps pour effectuer ce segment central (1 seconde correspond à environ 1 km)**

**3 – La qualité de source de nourriture correspond à la fréquence des frétillements sur le segment central ainsi que la vitesse avec laquelle l'abeille revient par les segments latéraux**

**Dans l'extrait fourni, il y avait un angle d'environ 20-30° vers la gauche, avec une abeille allant de bas en haut, et remontant le long du segment central en environ 300 ms.**



### 3.1 Butinage et diversité de l'écosystème

- **Justifiez** que l'étude du contenu pollinique du miel puisse être intéressante dans le cadre de l'étude de la biodiversité autour de la ruche. **Calculez** la surface médiane pouvant être parcourue par une abeille ainsi que la surface maximale.  
*On précise que la distance médiane de butinage est d'environ 1000 m, bien que des variabilités saisonnières existent. La distance maximale parcourue est en moyenne de 3000 m.*

La surface d'un disque est donnée par  $\pi \cdot R^2$ .

La surface médiane est ici  $S_{\text{med}} = \pi \cdot R_{\text{med}}^2 = 3,14 \cdot 1^2 = 3,14 \text{ km}^2$ .

La surface maximale est ici  $S_{\text{max}} = \pi \cdot R_{\text{max}}^2 = 3,14 \cdot 3^2 = 28,26 \text{ km}^2$ .

- À partir d'une analyse du contenu pollinique des 2 miels M1 et M2 récoltés à la même date, **caractérisez** la biodiversité des deux écosystèmes en termes d'équitabilité et de richesse spécifique.

Le miel M1 contient 2 pollens différents en quantité équivalente (proportions d'environ 1/2 de chaque). Le miel M2 contient également 2 types de pollens, mais l'un d'eux est largement majoritaire (environ 3/4 vs. 1/4). On a donc une richesse spécifique équivalente mais une équitabilité différente. Celle-ci pourrait être calculée par l'indice de Shannon :

$$H = - \sum_i^s p_i \log_2(p_i)$$

$$H_{M1} = -1/2 \cdot \log_2(1/2) - 1/2 \cdot \log_2(1/2) = 1$$

$$H_{M2} = -3/4 \cdot \log_2(3/4) - 1/4 \cdot \log_2(1/4) = 0,8$$

Ou par l'indice de Simpson, également au programme :

$$D = 1 - \sum_i^s p_i^2$$

$$D_{M1} = 1 - (0,5^2 + 0,5^2) = 0,5$$

$$D_{M2} = 1 - (0,75^2 + 0,25^2) = 0,375$$

Quel que soit l'indice choisi par le candidat, l'équitabilité est plus forte pour le miel M1.

➤ **Critiquez** ce type d'étude.

Toute proposition pertinente était acceptée. Par exemple :

- Détermination de l'espèce pas toujours possible à partir du seul pollen
- L'abeille ne pollinise pas toutes les fleurs et a des préférences
- Toutes les espèces ne fleurissent pas au même moment
- On échantillonne indirectement seulement les espèces d'angiospermes entomogames
- ...

### 3.2 *Apis mellifera*, une butineuse de miellat et de nectar

- **Réalisez** la dissection de la fleur FL et **mettez en évidence** des structures impliquées dans l'interaction avec l'Abeille domestique. **Proposez**, en argumentant, un type de relation interspécifique entre FL et l'Abeille domestique.

**Appelez l'examineur pour évaluation.**

**Il s'agissait ici de mettre en évidence :**

- **Les pétales colorés attirant l'insecte**
- **Les étamines à pédales qui assurent le dépôt du pollen sur le dos de l'insecte**
- **Les stigmates à l'entrée de la feuille au niveau desquels le pollen est déposé**
- **Le nectaire (lié à l'ovaire) produisant le nectar**

**La relation interspécifique ici impliquée est une relation mutualiste de type coopération : la fleur nourrit l'abeille et l'abeille assure la dispersion du pollen d'une fleur à l'autre.**

Les Abeilles domestiques prélèvent également dans leur environnement un liquide sucré appelé "miellat" et excrété par certains insectes "piqueurs-suceurs".

- **Précisez** la nature du liquide sucré prélevé par ces insectes dans des aiguilles de pin.

**Il s'agit de sève élaborée circulant dans le phloème.**

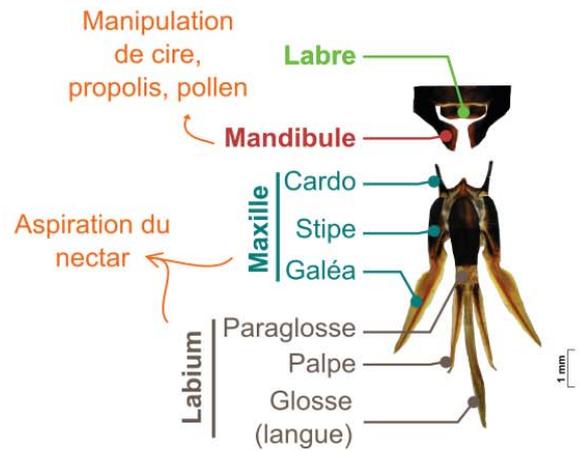
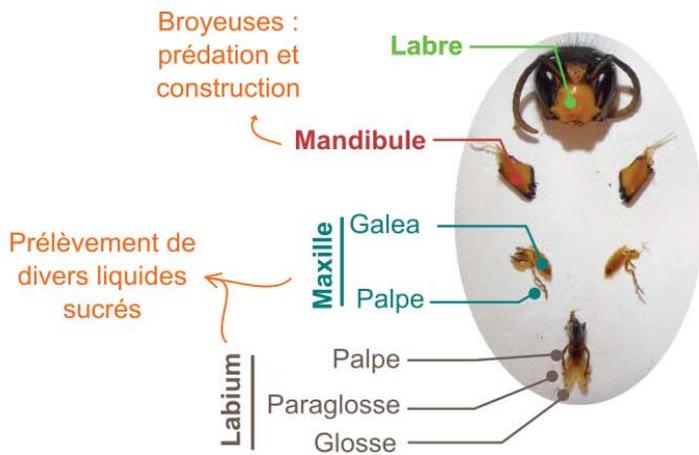
- À partir d'une coupe fine de la feuille FE fournie et d'une coloration au carmino-vert, **présentez** le tissu correspondant au lieu de prélèvement de ce liquide sucré.

**Appelez l'examineur pour évaluation.**

**La coupe devait permettre la mise en évidence du phloème.**

- **Annotez** le document ci-dessous en dégagant les relations « structure – fonction » des pièces buccales présentées (en bas celles d'un frelon asiatique *Vespa velutina nigrithorax* et en haut celles d'une abeille domestique). L'avant de l'animal est à gauche.  
Source de l'image d'abeille : modifié d'après JJ Auclair.

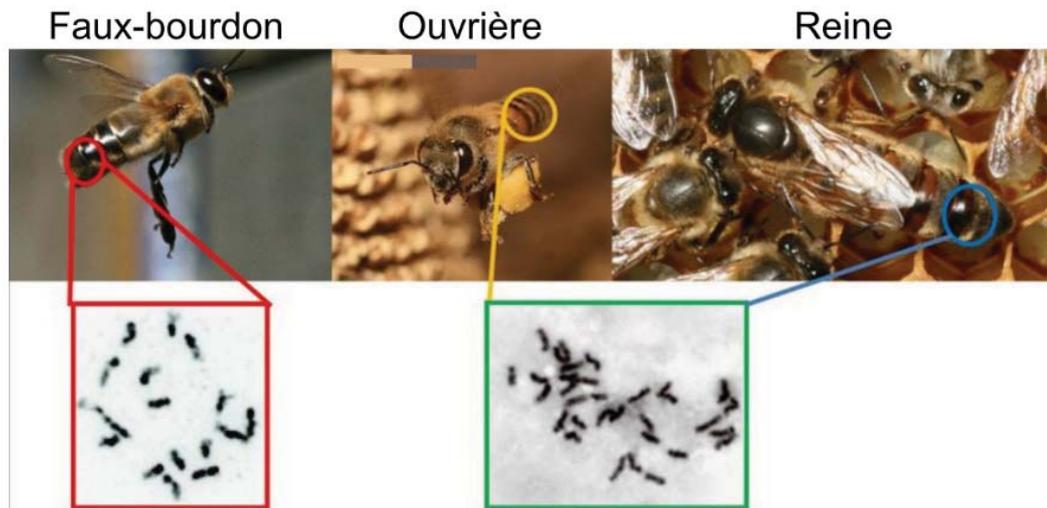
Les deux espèces ont des pièces buccales de type « broyeur-lécheur ».



- **Disséquez** les pièces buccales de l'abeille fournie.

**Appelez l'examineur pour évaluation.**

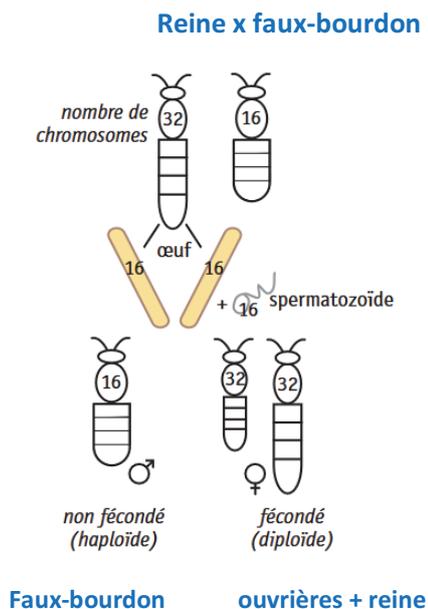
**Partie III : Déterminisme du sexe chez *Apis mellifera* (durée conseillée : 15 minutes)**



**Document III-1.**

Caryotypes de mâle (faux-bourdon) et femelles (ouvrière et reine). *D'après Accès ENS Lyon.*

- À partir du document III-1, **donnez** la formule chromosomique des types d'individus présents dans une colonie d'abeille.  
**Ouvrières et reine ont le même caryotype diploïde  $2n = 32$**   
**Mâles faux-bourdons haploïdes  $n = 16$**
- **Expliquez** l'origine de la diversité des caryotypes des individus d'une ruche.



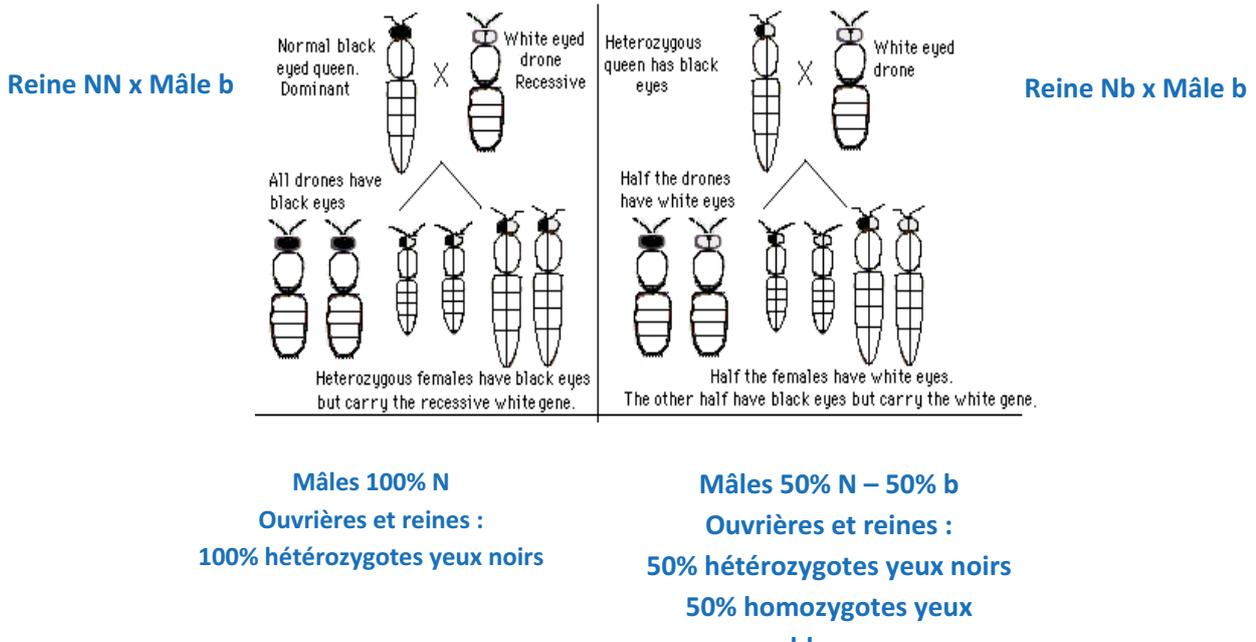
On trouve parfois, dans certaines colonies d'abeilles, des faux-bourçons aux yeux blancs (document III-2).



**Document III-2.**

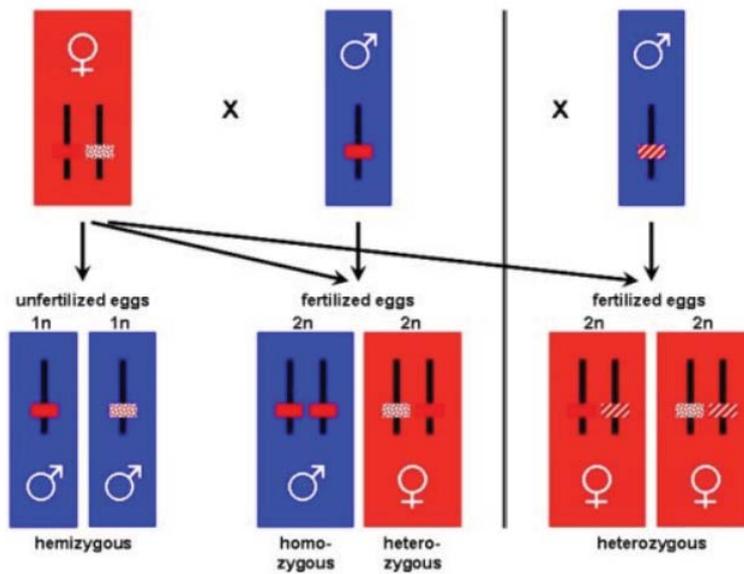
Faux-bourçon aux yeux blancs (flèche rouge). Source : Apistory.

- En considérant qu'un seul gène contrôle le caractère « couleur des yeux », et qu'il n'existe que deux allèles pour ce gène, **donnez** les conséquences de la fécondation d'une reine par un seul mâle présentant ce phénotype. On considèrera les différents génotypes possibles de la reine et on supposera que l'allèle « noir » est dominant. Vous présenterez vos investigations en incluant des tableaux de croisement



Des études ont montré que le déterminisme du sexe chez les abeilles dépend d'un gène appelé CSD, très polymorphe. La possession d'un seul allèle de ce gène conduit à la formation d'un individu mâle, alors que tout embryon hétérozygote donnera un individu femelle. Enfin, un embryon homozygote donnera un mâle diploïde.

- **Expliquez** comment des mâles diploïdes peuvent apparaître dans une colonie et pour quelle raison cet évènement est relativement rare sachant que l'on connaît aujourd'hui une centaine d'allèles du gène GSD.



D'après : Tanya Gempe et al. : [Sex determination in honeybees](#). Nature Education (2009)

Résultats d'accouplement d'une reine avec deux mâles possédant un allèle différent du gène CSD. L'un des mâles possède un allèle de CSD identique à l'un des allèles de la reine. Sur la ligne du bas, à gauche devenir d'ovules non fécondés de la reine, au centre et à droite, devenir d'ovules fécondés.

C'est le polymorphisme important du gène CSD qui limite la probabilité d'une homozygotie et donc des mâles diploïdes. On peut considérer en 1<sup>ère</sup> approximation que lors de la fécondation, une reine hétérozygote aurait une chance sur 50 de féconder un ovocyte avec un spermatozoïde ayant le même allèle. Un œuf fécondé sur 50 serait donc un mâle diploïde.

ANNEXE 1

Ressource	Nom de l'espèce	Position systématique	Type de relation interspécifique la plus fréquemment réalisée avec l'Abeille domestique
	<p>Frelon européen <i>Vespa crabro</i></p>	<p>Insecte Hyménoptère Vespidé</p>	<p>Prédation</p>
	<p>Mante religieuse <i>Mantis religiosa</i></p>	<p>Insecte Mantidae</p>	<p>Prédation</p>
	<p>Fausse teigne de la cire <i>Galleria mellonella</i></p>	<p>Insecte Lépidoptère</p>	<p>Parasitisme</p>
	<p>Epeire diadème = Araignée des jardins ou Araignée porte-croix <i>Araneus diadematus</i></p>	<p>Chélicérate Arachnide Aranéide</p>	<p>Prédation</p>

 <p>1 mm</p>	<p><b>Varroa</b> <i>Varroa destructor</i></p>	<p><b>Chélicérate</b> Acarien</p>	<p><b>Parasitisme</b></p>
 <p>10 cm</p>	<p><b>Guêpier d'Europe</b> <i>Merops apiaster</i></p>	<p><b>Vertébré</b> Aves = oiseaux</p>	<p><b>Prédation</b></p>
<p>Enregistrement audio n°1 <b>Cf. ordre de passage Atelier 1</b></p>	<p><b>Mésange charbonnière</b> <i>Parus major</i></p>		<p><b>Prédation (occasionnelle, en hiver surtout)</b></p>
<p>Enregistrement audio n°2 <b>Cf. ordre de passage Atelier 1</b></p>	<p><b>Pinson des arbres</b> <i>Fringilla coelebs</i></p>		<p><b>Neutralisme</b></p>

## 5.6 Epreuve de travaux pratiques de contre-option du secteur C : Sujet et commentaires

NOM :

PRENOM :

Salle :

# AGRÉGATION DE SCIENCES DE LA VIE - SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2025

## TRAVAUX PRATIQUES DE CONTRE OPTION DU SECTEUR C

Candidats des secteurs A et B

Durée totale : 2 heures

### Géologie du triangle de l'Afar : un aperçu du grand rift Est africain

Les différentes parties sont indépendantes. Certaines questions nécessitent des observations (échantillons macroscopiques et lames minces). Un ordre de passage, affiché au tableau, vous permettra d'accéder aux postes de travail. Organisez-vous en conséquence. **Cependant, la réalisation des ateliers ne conditionne pas la finalisation des différentes parties.**

#### Partie I. Géodynamique

p. 2 à 9

*Durée conseillée : 35 minutes —> 30% des points*

#### Partie II. Pétrologie

p. 10 à 16

*Durée conseillée : 45 minutes —> 37% des points*

ATELIER 1 (5 mn) – 2 échantillons de roches (macroscopiques)

ATELIER 2 (15 mn) – 2 échantillons de roches (lames minces)

#### Partie III. Chronostratigraphie et paléontologie

p. 17 à 26

*Durée conseillée : 40 minutes —> 33% des points*

Les réponses aux questions figureront dans les cadres réservés à cet effet. Vous pouvez disposer d'une calculatrice non programmable.

**AVANT DE REMETTRE VOTRE DOSSIER, VÉRIFIEZ QUE VOUS AVEZ BIEN INDIQUÉ VOS NOM,  
PRÉNOM ET NUMÉRO DE SALLE EN TÊTE DE TOUS LES DOCUMENTS.**

**Vous devez rendre la totalité des feuilles du dossier**

### *Commentaire général*

*Le thème général du TP portait sur la géologie du triangle de l'Afar. Des éléments très diversifiés de la géologie de cette région du rift Est Africain (géodynamique, pétrologie magmatique et sédimentaire, stratigraphie, paléontologie) étaient à analyser dans trois parties indépendantes qui pouvaient être traitées dans le désordre. La seconde partie contenait deux ateliers permettant d'évaluer les compétences pratiques des candidats dans des domaines aussi variés que la pétrologie sédimentaire, la micropaléontologie et la pétrologie magmatique.*

*Le sujet était long, et la réussite de cette épreuve nécessitait une bonne gestion du temps. Un nombre significatif de candidats n'a pu traiter que partiellement au moins une des trois parties du sujet. En revanche, le fait qu'un créneau (horaire et durée imposés) ait été planifié pour les deux ateliers a conduit à ce qu'ils soient systématiquement traités.*

*Dans la première partie, les candidats devaient rappeler les grandes lignes de la géodynamique de la région à partir des données disponibles dans les documents. On remarque que de nombreux candidats connaissent à peu près le contexte de la région mais n'utilisent pas les documents pour soutenir leur argumentation.*

*Dans la deuxième partie, l'objectif était d'évaluer les candidats sur leur capacité à étudier et reconnaître des échantillons de roches en macro et microscopie puis à en analyser le contexte de formation.*

*Dans la troisième partie, les candidats devaient utiliser des données radio-isotopiques et magnétostratigraphiques issues d'une coupe sédimentaire continentale d'âge Pliocène levée dans la région de l'Afar. L'exercice visait à utiliser ces données pour dater deux horizons sédimentaires ayant livré des hominines fossiles de l'espèce Australopithecus afarensis. Il était demandé aux candidats de faire preuve d'un regard critique sur ces datations. Un exercice de paléontologie des vertébrés, réalisé à partir photographies de restes osseux de mammifères collectés dans cette coupe était également proposé. Beaucoup de candidats, pris par le temps, n'ont que partiellement abordé cette dernière partie, probablement parce qu'ils ont choisi de traiter les parties du sujet dans l'ordre de l'énoncé.*

Le sujet propose d'étudier sous plusieurs aspects une zone géologiquement remarquable de la planète appelée « Triangle de l'Afar », point de jonction triple entre les plaques nubienne à l'ouest, somalienne au sud et arabique au nord-est.

**Partie I - Géodynamique**

**Question I.1** – A partir des données fournies dans le **Tableau 1** :

- Déterminez les vitesses de déplacement des quatre stations GPS proposées. Pour ce faire, du papier calque millimétré vous est fourni.
- Sur la carte de la **Figure 1**, représentez les vecteurs vitesse de déplacement des quatre stations. Vous prendrez pour échelle sur la carte 1mm = 1mm/an

Réponse à la question I.1. Répondre directement dans le Tableau 1 et la Figure 1.

**Le calque millimétré est à rendre avec votre copie**

Stations GPS	NAMA	YIBL (mm/an)	BDAR (mm/an)	ROBE (mm/an)
<b>Déplacement latitudinal</b>	<p>Time series for NAMA.</p>	31,7	17,4	13,4
<b>Déplacement longitudinal</b>		33,4	22,2	28,6
<b>Vitesse de déplacement (mm/an)</b>	45,1	46,0	28,2	45,1

**Tableau 1 – Déplacements latitudinaux et longitudinaux de quatre stations GPS : NAMA, YIBL, BDAR et ROBE (à compléter)**

NOM :

PRENOM :

Salle :

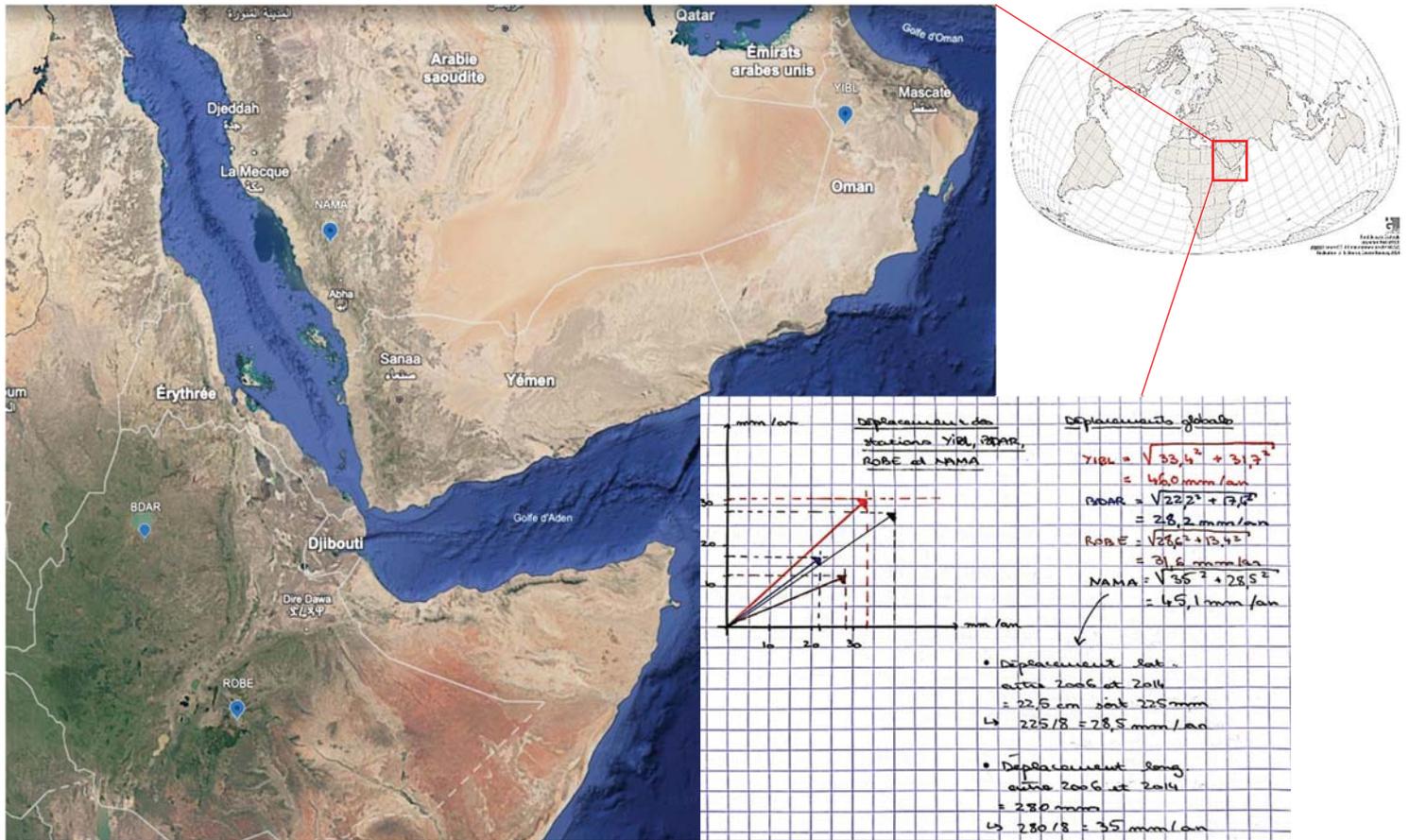


Figure 1 – Emplacements des stations GPS BDAR, YIBL, NAMA et ROBE sur fond de carte topographique

**Question I.2** – Conclure sur le contexte géodynamique de la zone étudiée. Exploitez la **Figure 1** en plus des données GPS pour argumenter votre réponse.

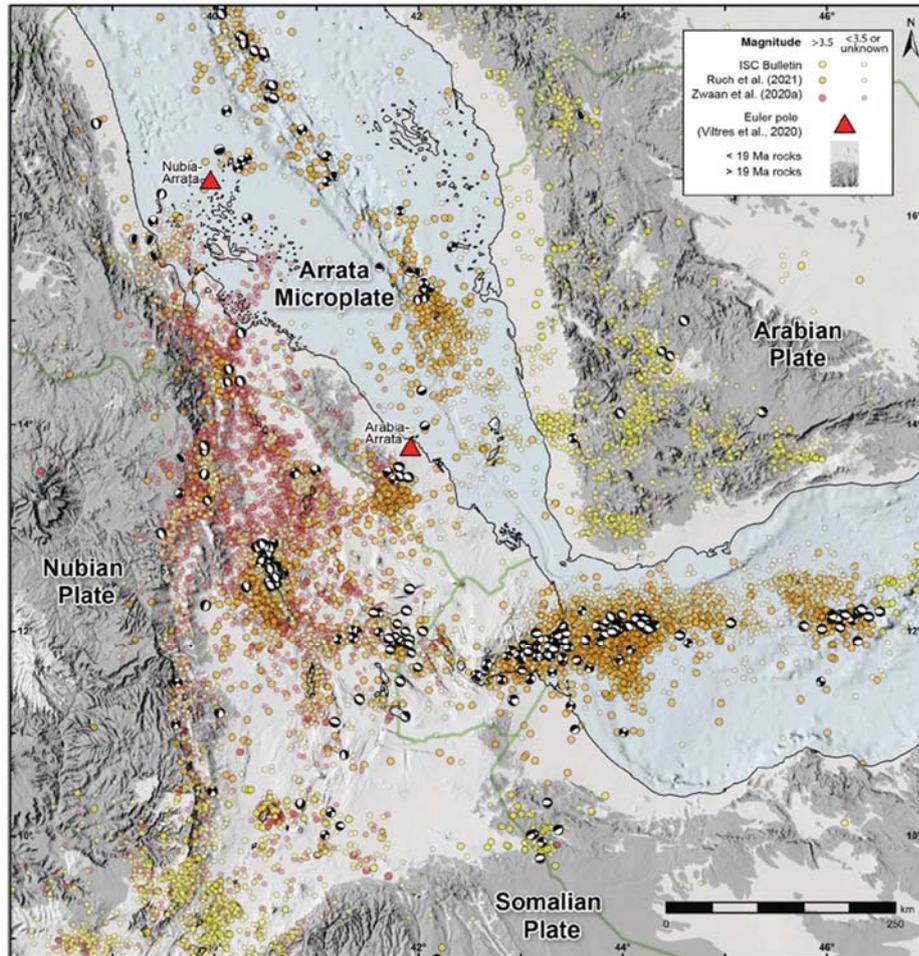
Réponse à la question I.2

Arabie et Afrique se déplacent toutes deux vers le NE mais l'Arabie plus rapidement que l'Afrique : la région est donc dominée par un **mouvement de divergence**.

L'observation du relief océanique en mer rouge et dans le golfe d'Aden semble indiquer des ouvertures océaniques via **des dorsales** ce qui corrobore le contexte géodynamique proposé précédemment.

Beaucoup de candidats ont perdu énormément de temps à effectuer leurs calculs et représenter leurs vecteurs dans les bonnes directions, ce qui a abouti trop souvent à des plaques Arabie et Afrique convergentes.

**Question 1.3** – Quelle(s) information(s) supplémentaire(s) l'étude de la **Figure 2** apporte-t-elle à votre réponse précédente ? Justifiez votre réponse. Vous prendrez soin de rappeler ce que représentent les cercles noirs et blancs de la **Figure 2**.



**Figure 2 – Carte de la région de l'Afar montrant des séismes et mécanismes au foyer**

Réponse à la question 1.3

La carte sismotectonique montre une forte densité de séismes autour de la mer Rouge et du rift Éthiopien qui confirme une activité tectonique intense liée à l'extension (contexte de rifting actif).

Les cercles blanc et noir sont des mécanismes au foyer, ils représentent l'orientation de la faille à l'origine d'un séisme et la direction de son glissement.

La majorité marque des failles normales  associées à un contexte extensif ce qui confirme la zone de divergence proposée à la question 1.

Quelques mécanismes  montrent des failles décrochantes le long des dorsales

Question globalement bien traitée, les mécanismes au foyer sont connus des candidats.

**Question I.4 –** Rappelez le principe de la méthode de tomographie sismique utilisée en **Figure 3**.

Réponse à la question I.4

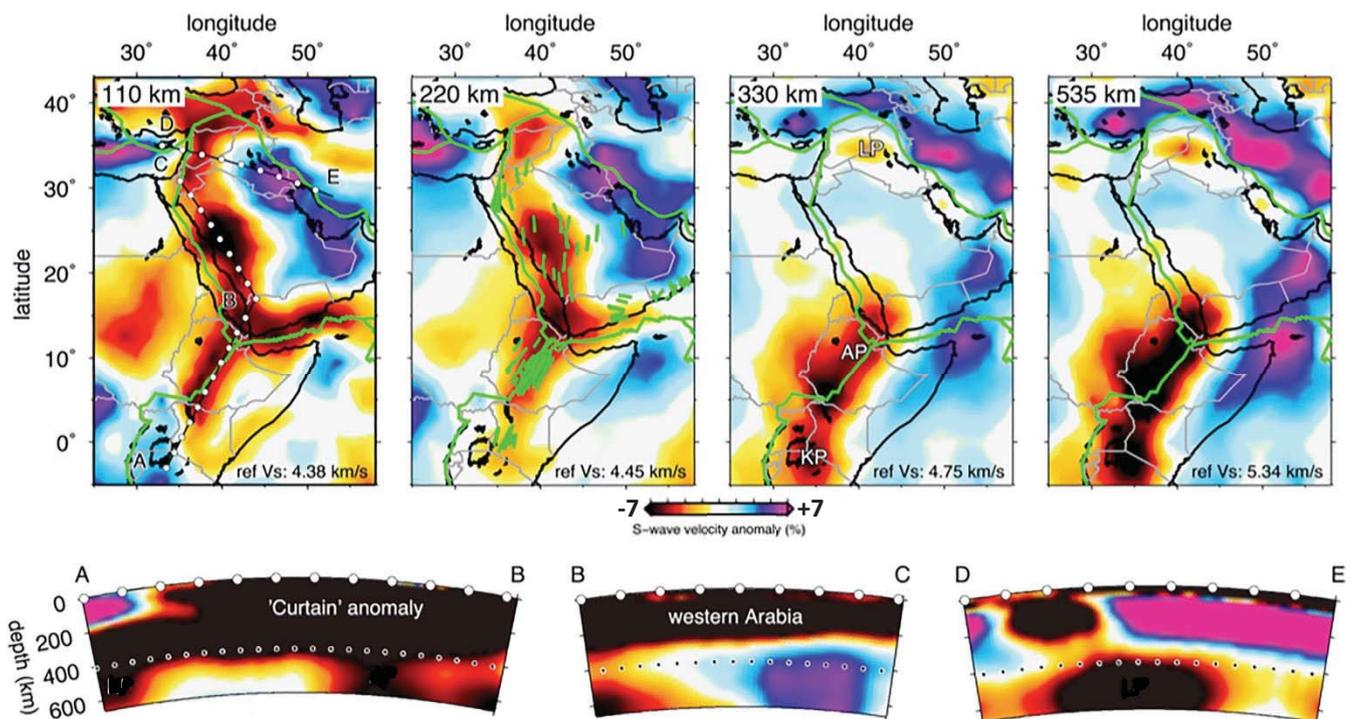
La tomographie sismique consiste à comparer les temps d'arrivée des différentes ondes sismiques les unes relativement aux autres et à différents endroits du globe, il est ainsi possible de calculer les vitesses de propagation de ces ondes et leurs variations à l'intérieur du globe terrestre.

Les variations de vitesse dans l'espace sont ensuite interprétées comme des variations de température locale ou de composition de la roche (chimique ou minéralogique). La tomographie sismique sert ainsi à cartographier les hétérogénéités du manteau terrestre.

Des anomalies de vitesse positive (par rapport au modèle Prem) supposent des roches plus denses et plus froides (bleu à violet sur le document).

Des anomalies de vitesse négative (par rapport au modèle Prem) supposent des roches moins denses et plus chaudes (jaune rouge à noir sur le document).

Idem question précédente



**Figure 3 –** Modèle de tomographie sismique dans la région du rift est africain (région de l’Afar) en carte (en haut) et en coupe (en bas). Les transects A-B, B-C et D-E sont localisés sur la carte de gauche (Civiero et al., 2022)

**Question I.5 – Interprétez les mécanismes présentés en Figure 3.**

Réponse à la question I.5

Les 4 cartes représentent la région à différentes profondeurs.

A 110km, on voit des anomalies négatives le long de la mer Rouge dans le rift de l'Afar indiquant une asthénosphère anormalement chaude et peu profonde liée à une remonté mantellique.

A 220-230km l'anomalie persiste et s'étend vers le sud suggérant l'existence d'une plume mantellique profonde alimentant le rift.

A 535 km l'anomalie s'atténue mais persiste ce qui confirme l'origine profonde du panache.

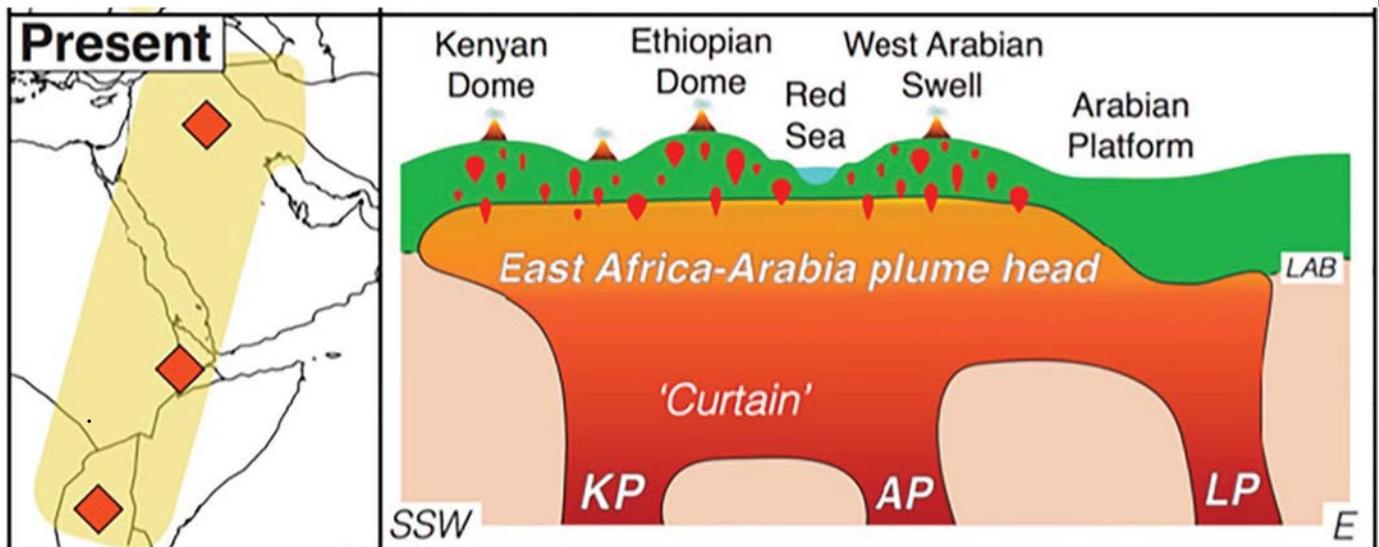
Les coupes verticales confortent cette idée de plume mantellique mais suggèrent qu'il s'agirait de 3 branches ascendantes et non pas d'une seule (Kenyan plume ; Afar plume ; Levant plume : leurs noms n'étaient bien sûr pas exigibles !).

Analyse des tomographies maîtrisée par les candidats mais beaucoup ont eu du mal à combiner les informations des 3 tomographies.

**Question I.6 – D'après votre réponse à la Question I.5, proposez une interprétation schématique en coupe selon un transect passant par les points KP, AP et LP\* (localisation sur la 3<sup>ème</sup> carte [330 km] de la Figure 3).**

\*la connaissance de la signification des abréviations des trois points KP, AP et LP n'est pas nécessaire pour répondre à la question.

Réponse à la question I.6



LAB : lithosphere-asthenosphere boundary

Question très peu traitée ou avec des schémas généraux de point chaud ne correspondant pas à la région étudiée. Il manque quasi systématiquement des échelles verticales.

**Question I.7** – En quoi les mécanismes illustrés par les données tomographiques (**Figure 3**) participent-ils à la compréhension du contexte géodynamique de la région ?

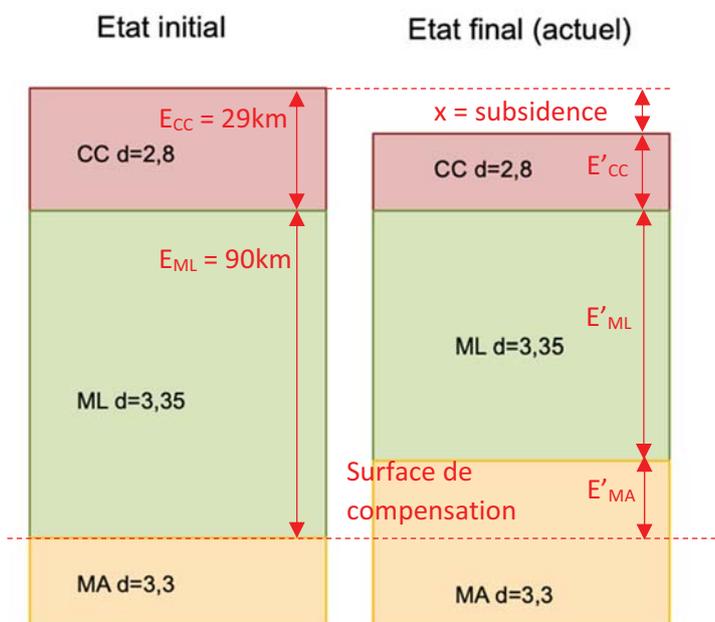
Réponse à la question I.7

*Ce panache est une remontée de matériel chaud provenant du manteau profond. Il réchauffe la base de la lithosphère la rendant plus ductile et moins résistante ce qui favorise l'amincissement crustale : **il initie ou renforce l'extension dans la région.***

*Bien que la divergence soit aussi causée par la dynamique des plaques, le panache ajoute une force de soulèvement et accélère le processus d'ouverture comme observé dans la région (mer Rouge).*

**Etude générale et simplifiée de la dépression de l'Afar.**

Dans un contexte de divergence, la lithosphère continentale s'amincit par étirement. Pour chaque enveloppe, on définit un coefficient d'étirement  $\alpha = E_i/E_f$  où  $E_i$  et  $E_f$  sont respectivement les épaisseurs initiale et finale de l'enveloppe considérée. On considèrera dans cet exercice une lithosphère à l'état initial formée de 29 km de croûte et 90 km de manteau lithosphérique (attention la **Figure 4** n'est pas à l'échelle).



**Figure 4 – Densité des enveloppes et représentation schématique de l'épaisseur de la croûte continentale et du manteau lithosphérique (état initial et état actuel) dans la dépression de l'Afar.**  
  
**CC** : croûte continentale ; **ML** : manteau lithosphérique ; **MA** : manteau asthénosphérique ; **d** : densité

On peut poser :

$$\alpha = \frac{E_{cc_i}}{E_{cc_f}} = \frac{E_{ml_i}}{E_{ml_f}}$$

**Question I.8** – Calculez la subsidence d'une lithosphère continentale étirée d'un coefficient  $\alpha = 1,3$ . Cette valeur d'étirement peut correspondre à la dépression de l'Afar et est valable tout à la fois pour la croûte et le manteau.

Réponse à la question 1.8

**Equilibre :**  $E_{CC} \times d_{CC} + E_{ML} \times d_{ML} = E'_{CC} \times d_{CC} + E'_{ML} \times d_{ML} + E'_{MA} \times d_{MA}$

$$\Leftrightarrow (E_{CC} - E'_{CC}) d_{CC} + (E_{ML} - E'_{ML}) d_{ML} = E'_{MA} d_{MA}$$

**on en sait que**  $\alpha = \frac{E_{CC}}{E'_{CC}} = \frac{E_{ML}}{E'_{ML}} \Leftrightarrow E'_{CC} = \frac{E_{CC}}{\alpha}$  et  $E'_{ML} = \frac{E_{ML}}{\alpha}$

Donc  $(E_{CC} - \frac{E_{CC}}{\alpha}) d_{CC} + (E_{ML} - \frac{E_{ML}}{\alpha}) d_{ML} = E'_{MA} d_{MA}$

$$\Leftrightarrow E_{MA} = (1 - \frac{1}{\alpha}) \frac{E_{CC} d_{CC} + E_{ML} d_{ML}}{d_{MA}}$$

$$\text{et } x = E_{CC} + E_{ML} - E'_{CC} - E'_{ML} - E'_{MA}$$

$$\Leftrightarrow E'_{MA} = E_{CC} + E_{ML} - E'_{CC} - E'_{ML} - x$$

Alors :  $x = \frac{(E_{CC} + E_{ML})(1 - \frac{1}{\alpha})}{E_{CC} + E_{ML} - E'_{CC} - E'_{ML}} - \frac{(E_{CC} d_{CC} + E_{ML} d_{ML})(1 - \frac{1}{\alpha})}{d_{MA}}$

$$x = (1 - \frac{1}{\alpha}) \left( \frac{E_{CC} + E_{ML}}{E_{CC} + E_{ML} - E'_{CC} - E'_{ML}} - \frac{E_{CC} d_{CC} + E_{ML} d_{ML}}{d_{MA}} \right)$$

$$= 1 - \frac{1}{\alpha} \left( E_{CC} \left( 1 - \frac{d_{CC}}{d_{MA}} \right) - E_{ML} \left( 1 - \frac{d_{ML}}{d_{MA}} \right) \right)$$

**Application numérique :**  $x = (1 - \frac{1}{1,3}) \left( 29 \times \left( 1 - \frac{2,8}{3,3} \right) - 90 \left( 1 - \frac{3,35}{3,3} \right) \right)$   
 $= 0,7$  km soit 700 m.

Question peu traitée. Malgré quelques essais, de trop nombreux candidats aboutissent à des résultats incohérents (jusqu'à 700 km de subsidence). Il n'y a pas de recul critique sur ces réponses incohérentes.

**Partie II – Pétrologie****ATELIER 1 : ANALYSE MACROSCOPIQUE DE ROCHES ( ! attention ! l'atelier 1 est accessible une seule fois, durant maximum 5 minutes consécutives).**

Deux échantillons macroscopiques de roches vous sont fournis. Ils ont été collectés dans la région du triangle de l'Afar à Djibouti :

- l'échantillon 1 au niveau du lac d'Asal
- l'échantillon 2 dans une carrière de la vallée de Gobaad.

Les points de collecte de ces deux échantillons ont été photographiés et sont présentés en **Figures 5 et 6** par des flèches rouges.



**Figure 5 – Photographie du lac d'Asal dans la dépression de l'Afar à Djibouti**



**Figure 6 – Photographie de la carrière où a été prélevé l'échantillon 2 (vallée du Gobaad, Djibouti) ©PSPCA**

**Question II.1** – Identifiez chacune de ces deux roches en justifiant par des éléments diagnostiques pertinents et discutez brièvement de leur habituel contexte de formation.

Réponse à la question II.1

**Echantillon 1** : échantillon constitué de cristallisations en couches à fibres parallèles, qui ne fait pas effervescence à HCl, à éclat satiné, rayé par l'ongle (indice 2 dans l'échelle de Mohs) => **gypse fibreux**.

Le gypse est une espèce minérale composée de sulfate de calcium déshydraté, de formule chimique  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Il désigne également une roche évaporitique constituée principalement du minéral gypse, qui précipite notamment quand l'évaporation provoque une augmentation de la concentration en sulfates de calcium dans l'eau de mer, qui devient trop élevée pour rester en solution. C'est l'empilement de ces cristaux dans la stratigraphie qui conduit à la formation de la roche gypse.

**Echantillon 2** : échantillon de roche tendre faiblement consolidée qui s'émiette facilement en fine poudre blanche à grise, et qui ne fait pas effervescence à HCl. L'échantillon est caractérisé par sa grande légèreté (la roche est très peu dense et poreuse). Il s'agit de **diatomite**, composée de silice biogène.

La diatomite est une roche sédimentaire formée entièrement de squelettes siliceux de diatomées (frustules). Les frustules de ces algues unicellulaires marines (diatomées centrales) ou lacustres (diatomées pennales) peuvent s'accumuler sur le fond pour former des boues à diatomées. Après compaction, ces boues peuvent conduire à la formation de la roche diatomite. Les diatomites sont principalement des roches sédimentaires lacustres du Néogène et du Quaternaire (elles sont alors constituées de frustules de diatomées pennales).

Les candidats avaient 5 minutes pour l'analyse pétrologique des deux échantillons macroscopiques. L'échantillon 1 a été généralement bien analysé et interprété. L'identification de l'échantillon 2 s'est révélée souvent plus difficile, de nombreux candidats proposant les diagnostics erronés. Pour les deux échantillons macroscopiques, une démarche démonstrative était attendue avec des diagnostics reposant sur l'aspect, la dureté, la densité, le comportement vis-à-vis des outils à disposition (HCl, plaque de verre, clou en acier). Les contextes de formation attendus pour le gypse et la diatomite ont souvent été trop partiellement explicités.

**Question II.2** – Quelle structure géomorphologique observez-vous sur la photographie de la **Figure 5** ? Expliquez succinctement comment une telle structure peut se mettre en place. Vous pourrez illustrer votre réponse par un schéma.

Réponse à la question II.2

L'objet observé est une butte témoin qui se forme par érosion différentielle. On les retrouve principalement dans des zones en surrection, ce qui interroge la présence de celle-ci dans un environnement subsidiant. Comme vue à la question précédente, la roche formant la butte est un gypse qui s'est donc formé dans le lac sous un climat sec. L'altitude de la butte témoin reflète le niveau maximal du lac.

Hypothèses :

- Située sur une épaulement du rift ?
- Lac Asal < niveau marin – niveau de base local qui varie / climat spécifique

Toutes les hypothèses cohérentes ont été valorisées.

**Attention**, les questions II.3 à II.8 ci-dessous reposent sur l'analyse de deux lames minces (lame n°1 et lame n°2 à étudier sur l'Atelier 2). Vous ne pourrez accéder à l'observation de ces deux lames qu'une seule fois pendant 15 minutes consécutives.

A quelques centaines de kilomètres au sud de la ville de Djibouti, le paysage est principalement composé de roches sédimentaires dans lesquelles la **lame n°1 de l'Atelier 2** a été réalisée.

Dans ce secteur, à proximité du village d'Ali Addé, l'affleurement proposé dans la **Figure 7** dénote. Il est daté du Miocène (19-9,5 Ma), et il repose sur les roches sédimentaires de la lame n°1. La **lame n°2 de l'Atelier 2** a été réalisée à partir d'un échantillon prélevé sur cet affleurement.

**Question II.3** – Décrivez et proposez une interprétation de l'affleurement photographié en **Figure 7**. Comment un tel affleurement se met-il en place ? Vous pourrez illustrer votre réponse par un schéma.



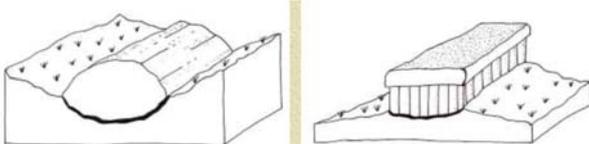
**Figure 7 – Photographie d'un affleurement de la région d'Ali Addé dont est issue la lame mince n°2**

Réponse à la question II.3

*L'affleurement présente des coulées volcaniques prismées (orgues volcaniques). Ce type de géométrie peut s'observer lorsque la lave refroidit dans une vallée (par exemple) en couche épaisse et le refroidissement différentiel progressif entre l'extérieur et l'intérieur de la coulée permet la mise en place d'orgues en base de coulée. Les orgues se forment par rétraction de la lave en fin de refroidissement. Il y a alors diminution de volume liée à la solidification totale de la coulée.*

*La prismation qui se forme s'effectue perpendiculairement aux surfaces de refroidissement. Il en résulte des orgues verticaux pour une coulée horizontale.*

**A gauche** : mise en place dans une vallée ; **A droite** refroidissement plus érosion



*La roche présentée est volcanique et peut être de nature diverse : basalte, phonolite, trachyte, andésite, rhyolite, trachyte... Au vu du contexte extensif on peut pencher pour du basalte ou de la rhyolite si le magma à l'origine s'est différencié dans une chambre volcanique par exemple.*

*Presque tous les candidats ont reconnu des prismes mais concluent trop vite à des orgues basaltiques sans proposition d'arguments.*

## **ATELIER 2 : ANALYSE DE ROCHES EN LAME MINCE ( ! attention ! l'atelier 2 est accessible une seule fois, durant au maximum 15 minutes consécutives).**

La lame n°1 a été réalisée dans une roche sédimentaire d'âge indéterminé qui fait effervescence à froid à HCl. La lame n°2 a été réalisée dans un échantillon de roche d'âge Miocène (affleurement photographié en **Figure 7**), reposant sur les roches sédimentaires de la lame n°1.

**Question II.4** – Réalisez un dessin d'observation de la lame n°1 et caractérisez la roche dont elle est issue en justifiant votre réponse. Vous indiquerez ensuite le contexte de formation et l'âge de cette roche en justifiant votre réponse.

*Réponse à la question II.4 (lame n°1)*

*Roche sédimentaire dont la texture est formée de grains liés par de la boue carbonatée (micrite). La micrite constitue moins de 10% de la cimentation. Les éléments figurés ne se sont pas liés ensemble pendant la phase de dépôt. Il s'agit d'un **packstone**.*

*Les éléments figurés sont majoritairement des éléments organisés en loges multiples, de microstructure agglutinée. Ce sont des tests de foraminifères benthiques agglutinés. Certaines sections sont circulaires, d'autres de forme triangulaire. Il s'agit respectivement de sections transversales et axiales de foraminifères à croissance sériée. De l'extérieur vers l'intérieur de la coquille, les sections axiales montrent de fines cloisons dont certaines sont prolongées par des lames épaisses et ondulées, qui se rejoignent au centre de la coquille. Ces foraminifères sont des **Orbitolines**.*

*D'autres foraminifères, beaucoup moins abondants, sont visibles. Ce sont des foraminifères à microstructure porcelanée et croissance pelotonnée. Il s'agit de milioles. Enfin, certains grains sont des fragments de coquilles de mollusques, bivalves notamment.*

*De par la présence d'Orbitolines et de milioles, cette roche sédimentaire carbonatée s'est formée dans un contexte de plateforme, plutôt agitée compte tenu du microfaciès sédimentaire. La présence d'Orbitolines indique qu'elle s'est déposée au Crétacé (Barrémien à Cénomaniens).*

*Les candidats avaient 15 minutes pour l'analyse pétrologique et micropaléontologique des deux lames minces (questions II.4 et II.5).*

*Concernant la lame 1, les candidats ont fait beaucoup d'erreurs tant dans l'identification taxinomique des éléments figurés que dans l'analyse du microfaciès sédimentaire. Si les rares milioles présentes dans la lame ont été généralement correctement identifiées, les Orbitolines, qui constituaient la grande majorité des éléments figurés et qui étaient importantes pour le diagnostic chronologique, ont été plus rarement reconnues (beaucoup de confusions avec les Nummulites, les Alveolines, les Orbitolites voir même souvent avec des coraux, des gastéropodes, des diatomées ou coccolithophoridés). Les candidats n'ont quasiment jamais proposé de démarche démonstrative dans l'identification taxinomique des foraminifères (caractéristiques microstructurales et géométriques des tests). Les dessins d'observation proposés ne rendent que trop rarement compte du microfaciès sédimentaire et des caractéristiques microstructurales (agglutinée pour les Orbitolines, porcelanée pour les milioles) et géométriques des foraminifères. Les candidats ont généralement proposé un schéma plutôt qu'un dessin d'observation. L'interprétation paléoenvironnementale s'est révélée souvent très incomplète voir incohérente avec le contenu micropaléontologique et le microfaciès sédimentaire.*

**Question II.5** – Réalisez un dessin d'observation de la lame n°2 et caractérisez la roche dont elle est issue en justifiant votre réponse.

Réponse à la question II.5 (lame n°2)

Minéraux à repérer :

- Biotites (bonus : dont de nombreux sont chloritisés)
- Quartz
- Feldspaths alcalins
- (Quelques oxydes ; noirs en LPA)
- Matrice : verre

Roche magmatique à texture microlithique = volcanique

La présence de cristaux de quartz indique une roche acide, ce n'est donc pas du basalte comme proposé précédemment mais plutôt une rhyolite.

Le temps d'observation et de production d'un dessin était court, les candidats ont été valorisé sur leur capacité à représenter efficacement les éléments permettant la diagnose de la roche. A noter que beaucoup de candidats proposent un nom de roche sans diagnose préalable.

La composition chimique de la roche de la **lame mince n°2** (affleurement de la **Figure 7**) est disponible ci-dessous dans le **Tableau 2**.

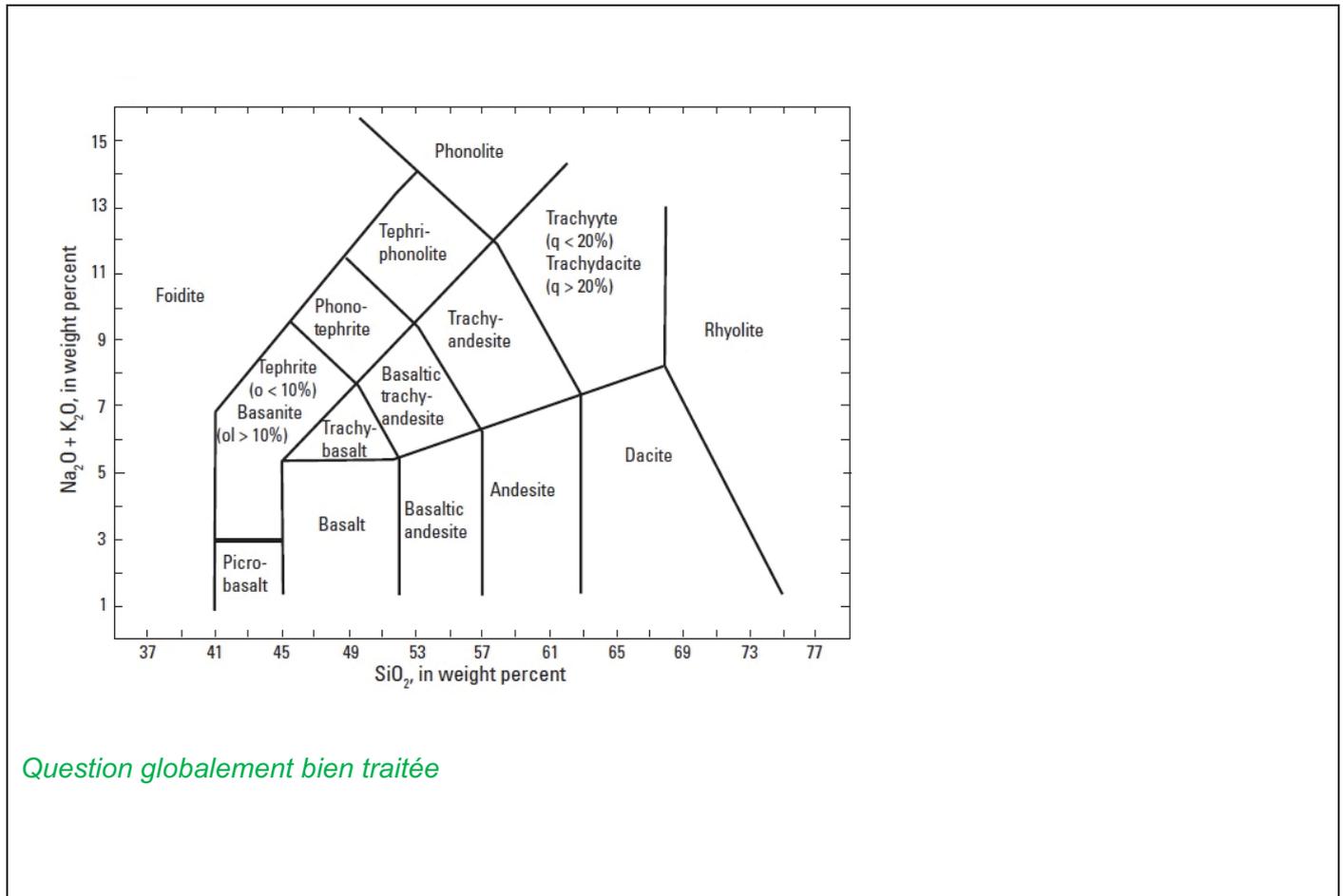
% oxydes	Roche du poste 2, affleurement II.2
SiO <sub>2</sub>	73,66
TiO <sub>2</sub>	0,22
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,45
Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	1,25
FeO	0,75
MnO	0,03
MgO	0,32
CaO	1,13
Na <sub>2</sub> O	2,99
K <sub>2</sub> O	5,25
H <sub>2</sub> O	0,78
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,07

**Tableau 2 – Composition chimique de la roche de l'Atelier 2 (lame n°2) et de l'affleurement de la Figure 7.**

**Question II.6** – A l'aide de vos connaissances, commentez la composition de la roche dont est issue la **lame mince n°2** et confirmez ou infirmez votre réponse à la **Question II.5**.

Réponse à la question II.6

En s'aidant d'un diagramme TAS on peut affirmer que la roche est une rhyolite car %SIO2 > 70%. Les basaltes ont des %de SIO2 < à 53%. Cela confirme notre erreur à la question II.3 mais confirme l'identification à la question II.5.



Question globalement bien traitée

A partir de la composition chimique en poids d'oxyde, une composition normative de la roche a été calculée, les résultats sont présentés dans le **Tableau 3**.

Minéraux	Quartz	Corindon	Orthose	Albite	Anorthite	Diopside	Hyperstène	Magnétite	Ilménite	Hématite	Apatite
%	34,18	1,49	20,07	32,12	4,31	0	0,5	2,97	0,19	3,26	0,11

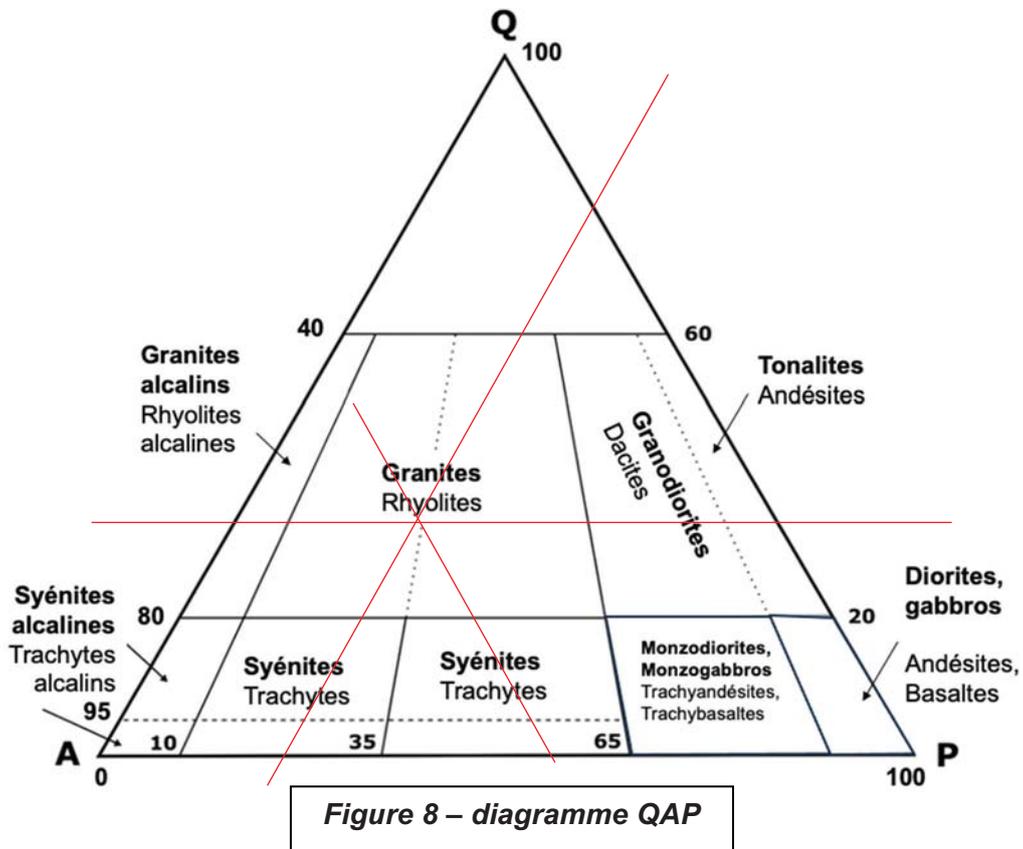
**Tableau 3 – Norme CIPW de la roche étudiée**

**Question II.7** – Rappelez très brièvement la différence entre une composition modale et normative.

Réponse à la question II.7

La composition modale d'une roche correspond aux minéraux effectivement présents dans la roche alors que la composition normative est une composition théorique calculée à partir de l'analyse chimique de la roche (minéraux que la roche aurait pu former si la cristallisation s'était faite dans les conditions standardisées).

**Question II.8** – A l’aide de la composition normative, placez la roche de la **lame n°2** dans le diagramme de QAP de la **Figure 8**. Cela corrobore-t-il vos précédentes interprétations ?



Réponse à la question II.8. La réponse est en partie attendue sur la Figure 8.  
 Il faut éliminer les minéraux non cardinaux et recalculer les proportions de quartz, feldspaths alcalins et plagioclases sur une base de 100.

Q = 38%  
 A = 22%  
 P = 40%

Cette dernière vérification permet de conclure que l'on a bien affaire à une rhyolite

Question peu traitée.

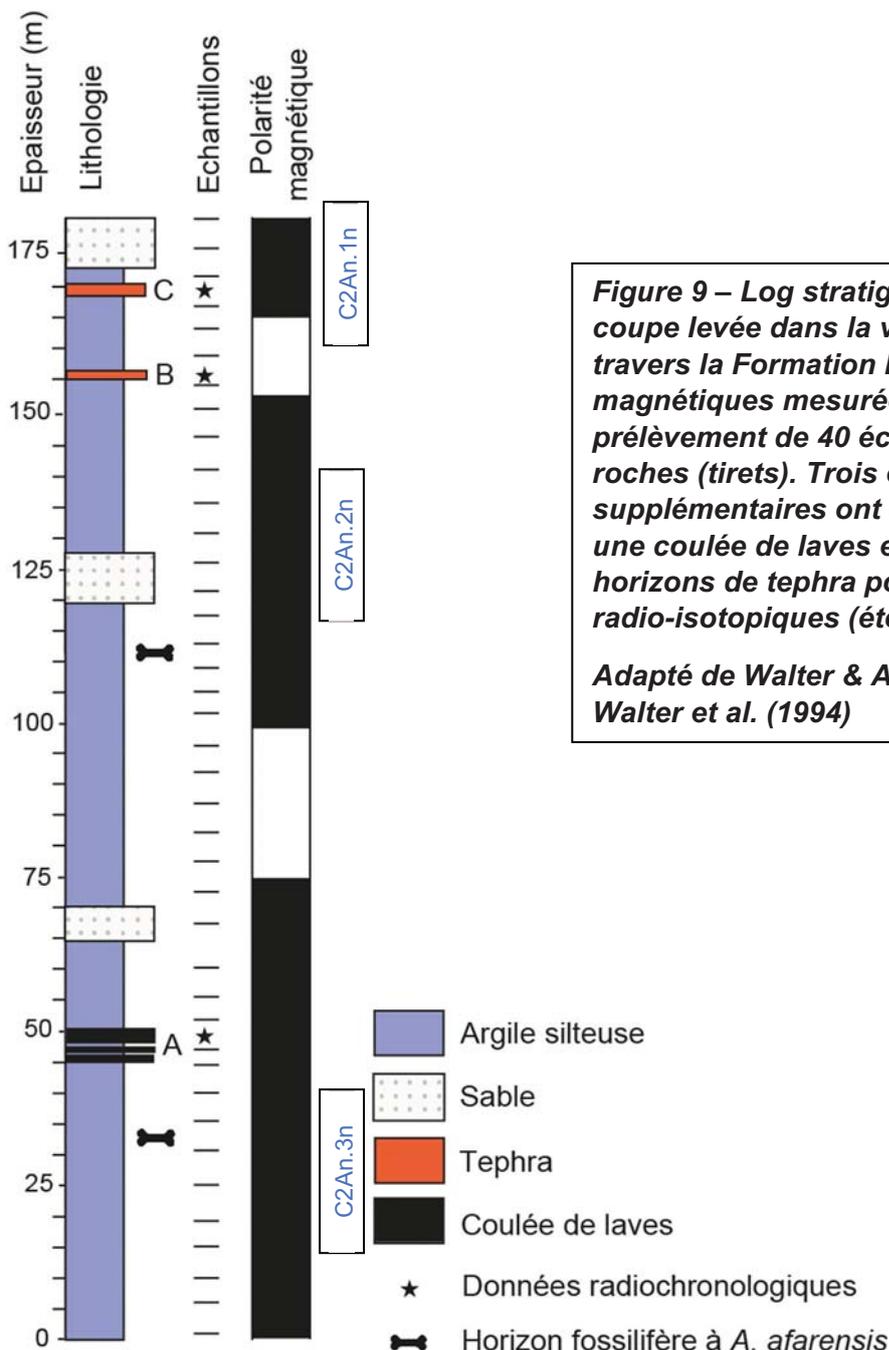
### Partie III. Chronostratigraphie et paléontologie

*Australopithecus afarensis* est une espèce éteinte d'hominine bipède ayant vécu en Afrique de l'Est (principalement en Ethiopie, Kenya, Tanzanie) au Pliocène\*. La Formation Hadar dans la région de l'Afar a livré les fossiles les plus abondants et les plus complets d'*A. afarensis*. Plusieurs niveaux de tephra et une coulée de laves sont intercalés dans les sédiments de cette formation sédimentaire.

Dans cet exercice, vous devez réaliser une interprétation chronostratigraphique d'une coupe levée dans la Formation Hadar dans la basse vallée de l'Awash et dater les fossiles qui y ont été collectés.

La **Figure 9** présente le log stratigraphique de la coupe levée dans la Formation Hadar et les résultats d'une étude magnétostratigraphique réalisée à partir du prélèvement et analyse de 40 échantillons de roches (tirets horizontaux sur la **Figure 9**). Sur le log stratigraphique, sont positionnés 3 horizons (une coulée de laves A et deux tephtras B et C) ayant fait l'objet de datations radio-isotopiques (étoiles noires sur la **Figure 9**).

*\*L'époque Pliocène est comprise entre 5,3 et 2,6 Ma*



**Question III.1** – D'après la **Figure 10**, déterminez le temps de demi-vie du  $^{40}\text{K}$  et du  $^{14}\text{C}$ . Vous rappellerez ce qu'est le temps de demi-vie d'un nucléide radioactif.

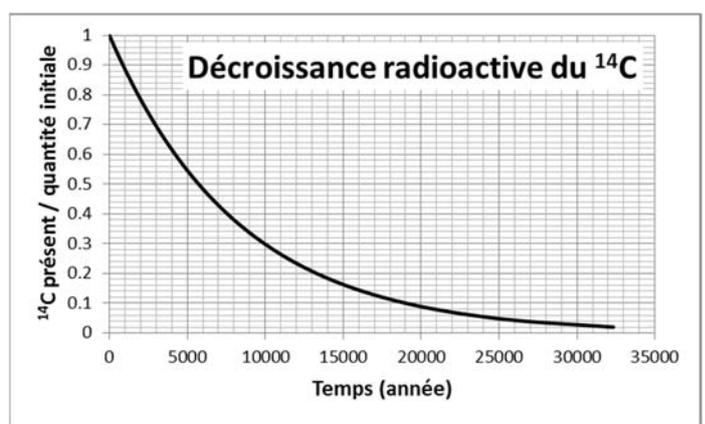
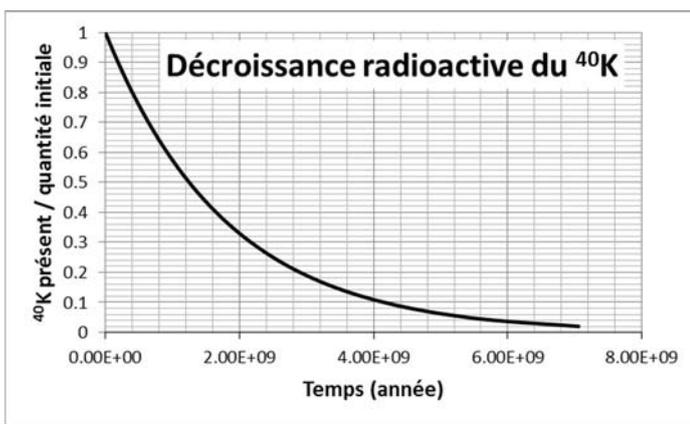
Réponse à la question III.1.

Le temps de demi-vie d'un isotope radioactif est la durée nécessaire pour que la moitié des noyaux de cet isotope initialement présents se désintègrent naturellement. Lorsque la moitié de l'isotope père a été désintégrée, la quantité restante est égale à la moitié de la quantité initiale. Sur la figure 10, le rapport présent / quantité initiale est donc de 1/2. Il suffit donc de lire directement sur le graphique le temps correspondant au rapport 0.5 pour le  $^{40}\text{K}$  et le  $^{14}\text{C}$ . Cette valeur est la demi-vie et donne une idée de la vitesse de décroissance radioactive.

Pour  $^{40}\text{K}$  : ~1,2 Ga (milliards d'années)

Pour  $^{14}\text{C}$  : ~5700 ans

Cette question a été généralement très bien traitée.



**Figure 10** – Courbes de décroissance radioactive du  $^{40}\text{K}$  (à gauche) et du  $^{14}\text{C}$  (à droite).

**Question I.2** – D'après vos connaissances et les **Figures 9 et 10**, déterminez si chacune des deux méthodes basées sur le  $^{40}\text{K}$  et le  $^{14}\text{C}$  est applicable à la datation des échantillons A, B et C. Vous justifierez votre réponse en énumérant l'ensemble des raisons qui permettent de répondre à la question posée.

Réponse à la question III.2.

La méthode basée sur le  $^{14}\text{C}$  n'est pas applicable car :

- elle est fondée sur la mesure de l'activité radiologique du  $^{14}\text{C}$  contenu dans la matière organique. Or les échantillons analysés dans la Formation Hadar sont des laves et téphras, démunis de matière organique.
- d'après la courbe de décroissance radioactive du  $^{14}\text{C}$  (Figure 10), on voit qu'en quelques dizaines de milliers d'années il ne reste quasiment plus de  $^{14}\text{C}$ . Or les téphras et laves de la Formation Hadar sont interstratifiés dans des roches sédimentaires du Pliocène et se sont donc déposés entre 5,3 et 2,6 Ma.

La méthode basée sur le  $^{40}\text{K}$  est au contraire applicable car :

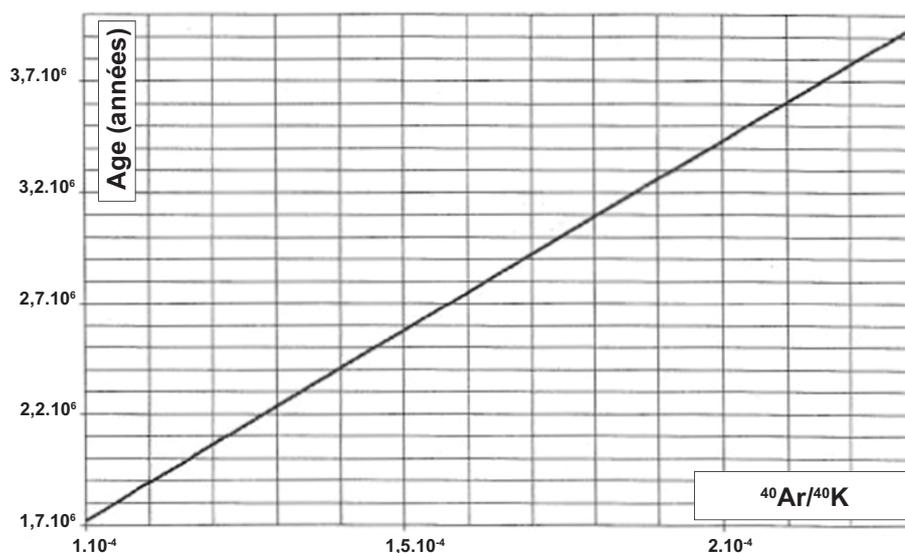
- le potassium est abondant dans de nombreux minéraux de roches magmatiques, y compris les coulées de laves et les téphras.
- le  $^{40}\text{K}$  se désintègre très lentement (Figure 10). Un échantillon du Pliocène contiendra donc encore une grande quantité de  $^{40}\text{K}$ .

Cette question a été globalement bien traitée. De nombreux candidats ont pu fournir une explication complète justifiant du choix du  $^{40}\text{K}$  pour la datation des échantillons A, B et C.

**Question III.3** – La **Figure 11** présente la relation entre la valeur du rapport  $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$  et l'âge d'un échantillon silicaté (cristaux de feldspaths, amphiboles, micas). Les rapports  $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$  mesurés dans les échantillons collectés dans la coulée de laves A et les deux téphras B et C (**Figure 9**) sont donnés ci-dessous dans le **Tableau 4**.

	Roche	Rapport $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$
Echantillon A	Coulée de laves	$2,04 \times 10^{-4}$
Echantillon B	Tephra	$1,81 \times 10^{-4}$
Echantillon C	Tephra	$1,74 \times 10^{-4}$

**Tableau 4 – Rapports  $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$  mesurés dans les échantillons A, B et C de la coupe levée dans la Formation Hadar**



**Figure 11 – Relation entre les valeurs mesurées de  $^{40}\text{Ar}/^{40}\text{K}$  et l'âge d'un échantillon**

A l'aide de la **Figure 11**, déterminez l'âge des échantillons A, B, C.

Réponse à la question III.3.

La lecture de la Figure 11 permet de déterminer les âges de dépôt de la coulée de lave et des téphras.

Echantillon A (coulée de lave) : 3,5 Ma

Echantillon B (téphra) : 3,1 Ma

Echantillon C (téphra) : 3,0 Ma

Cette question a été très bien traitée.

**Question III.4** – Dans le cas du couple K-Ar, l'équation de décroissance radioactive est complexe car K se désintègre en Ar (avec une constante de désintégration notée  $\lambda_1$ ) mais également en Ca (constante de désintégration notée  $\lambda_2$ ).

NOM :

PRENOM :

Salle :

L'équation de désintégration s'écrit :

$$t = \frac{\ln \left( 1 + \frac{^{40}\text{Ar}}{^{40}\text{K}} \times \frac{\lambda}{\lambda_1} \right)}{\lambda}$$

avec  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$  ;  $\lambda_1 = 0,581 \times 10^{-10} \text{ an}^{-1}$  ;  $\lambda_2 = 4,962 \times 10^{-10} \text{ an}^{-1}$

A partir de l'équation, calculez les âges des échantillons A, B et C. Vous arrondirez vos résultats à deux décimales. Comparez avec le résultat de la **Question III.3**.

Réponse à la question III.4.

Echantillon A (coulée de lave) : **3,51 Ma**

Echantillon B (téphra) : **3,11 Ma**

Echantillon C (téphra) : **2.99 Ma**

*La moitié des candidats a éprouvé des difficultés dans l'utilisation de la calculatrice scientifique, renonçant aux calculs ou aboutissant à des résultats aberrants.*

**Question III.5** – A partir des âges obtenus pour les échantillons A, B et C, donnez une approximation de l'âge des fossiles d'*Australopithecus afarensis* collectés dans la Formation Hadar de la vallée d'Awash (**Figure 9**). Ces estimations sont-elles cohérentes au regard de vos connaissances sur les hominine fossiles?

Réponse à la question III.5.

*La coupe levée dans la Formation Hadar a livré deux horizons fossilifères à *Australopithecus afarensis*, respectivement à ~33 m et ~112 m (Figure 9).*

*L'horizon fossilifère à ~33 m est situé sous la coulée de lave A. L'âge des fossiles d'*A. afarensis* récoltés à ~33 m est donc **plus ancien que 3,51 Ma**.*

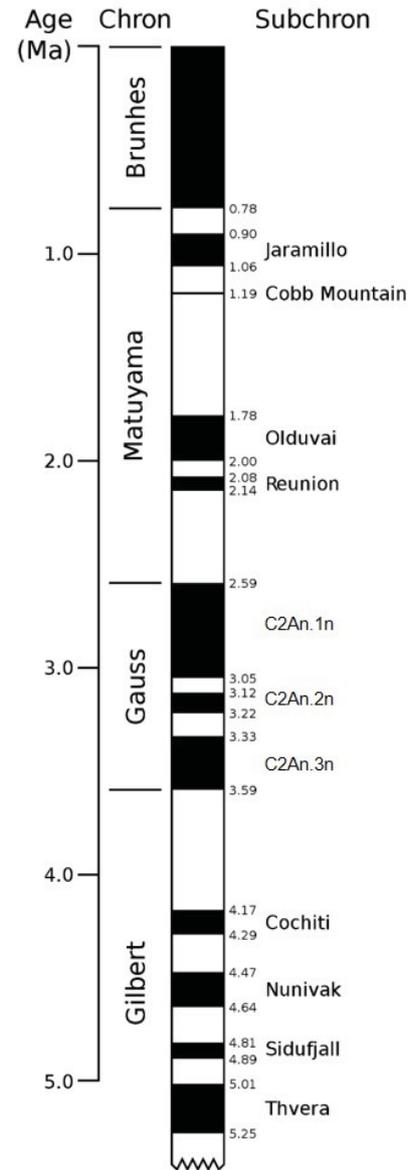
*L'horizon fossilifère à ~112 m est situé entre la coulée de lave A et le tephra B. L'âge des fossiles d'*A. afarensis* récoltés à ~112 m est donc compris **entre 3,51 et 3,11 Ma**.*

*Ces estimations sont cohérentes avec l'histoire des hominine fossiles, le genre *Australopithecus* ayant vécu en Afrique entre ~4,2 Ma (Pliocène supérieur ; *A. anamensis*) et ~2 Ma (Pléistocène inférieur ; *A. sediba*). Elles sont également cohérentes avec l'histoire de l'espèce *Australopithecus afarensis*, dont fait partie « Lucy », documentée pour avoir vécu au **Pliocène supérieur** de ~3,9 Ma à ~2,9 Ma.*

*Cette question a suscité beaucoup de difficultés. Si des candidats ont réussi à fournir une estimation des âges des deux horizons à *A. afarensis*, très peu ont été capables d'expliquer pourquoi ces âges étaient cohérents avec l'histoire des hominine fossiles.*

Une échelle magnétochronologique des inversions magnétiques est fournie en **Figure 12** pour les 5 derniers millions d'années (Pliocène à Actuel).

**Figure 12 – Echelle des polarités magnétiques pour les 5 derniers millions d'années (Gradstein et al. 2020). Les polarités magnétiques normales et inverses sont respectivement figurées en noir et en blanc). A gauche sont indiqués les noms des Chrons. A droite sont indiqués les noms des Sous-chrons de polarité normale.**



**Question III.6** – Rappelez brièvement comment cette échelle des polarités magnétiques a été établie et comment ont pu être datées les inversions magnétiques entre Chrons et Sous-chrons.

*Réponse à la question III.6.*  
 Des anomalies magnétiques sont observées depuis la surface des océans. Elles apparaissent sous formes de « bandes » alternativement positives et négatives, parallèles les unes aux autres, symétriques par rapport à l'axe des dorsales. Ces anomalies sont issues de l'acquisition par le magma basaltique remontant à l'axe de la dorsale et refroidi au contact de l'eau de mer d'une aimantation thermorémanente dirigée selon le champ magnétique terrestre. Cette aimantation est si intense qu'elle perturbe le champ magnétique terrestre à la surface même de l'océan. Les âges des inversions magnétiques entre Chrons et Sous-chrons peuvent être calculés en faisant l'hypothèse de vitesses d'expansions océaniques constantes pour une dorsale. Un contrôle paléontologique de la chronologie des inversions magnétiques peut être réalisé soit en datant biostratigraphiquement la base des colonnes de sédiments pélagiques forés/carottés recouvrant les basaltes, soit en déterminant la polarité magnétique de sédiments émergés très bien datés par l'intermédiaire des fossiles et/ou interstratifiés avec des roches magmatiques datables radio-isotopiquement.  
 Cette question n'a pas suscité de grandes difficultés chez les candidats, même si les réponses ont été généralement incomplètes.

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question III.7** – A l'aide des **Figures 9** et **12** et en utilisant les âges des horizons A, B et C, proposez une interprétation magnétostratigraphique des polarités magnétiques mesurées dans la Formation Hadar. Vous répondrez en indiquant directement sur la **Figure 9** les noms des Sous-chrons de polarité magnétique normale enregistrés sur cette coupe.

Réponse à la question III.7. Directement sur la Figure 9.

Chron GAUSS, Sous-Chrons C2An.3n, C2An.2n et C2An.1n (voir Figure 9).

*Cette question a été plutôt bien traitée, mais de nombreux candidats ont interprété les polarités normales comme caractérisant celles du Pléistocène.*

**Question III.8** – Comment votre interprétation magnétostratigraphique (**Question III.7**) permet-elle de mieux contraindre l'âge des fossiles d'*A. afarensis* collectés dans la Formation Hadar de la vallée de l'Awash ? Proposez une nouvelle estimation des âges des fossiles d'*A. afarensis*.

Réponse à la question III.8.

L'horizon fossilifère à ~33 m est situé dans un intervalle sédimentaire de polarité magnétique normale correspondant au Sous-chron C2An.3n. L'âge des fossiles d'*A. afarensis* de cet horizon fossilifère est donc compris entre **3,59 Ma (âge de la base du Sous-chron C2An.3n)** et **3,51 Ma (âge du niveau de lave A)**.

L'horizon fossilifère à ~112 m est situé dans un intervalle sédimentaire de polarité magnétique normale correspondant au Sous-chron C2An.2n. L'âge des fossiles d'*A. afarensis* de cet horizon fossilifère est donc compris entre **3,22 Ma (âge de la base du Sous-chron C2An.2n)** et **3,12 Ma (âge du sommet du Sous-Chron C2An.2n)**.

*Les candidats ayant réussi leur interprétation magnétochronologique (questions III.7) ont globalement bien réussi à traiter cette question.*

**Question III.9** – Calculez, en  $\text{cm.k}^{-1}$  (centimètres par millier d'années), un taux de sédimentation moyen dans un premier temps pour l'intervalle de polarité magnétique normale compris entre 100 et 153 m, et dans un second temps pour l'intervalle de polarité magnétique normale compris entre 0 et 50 m. Vous arrondirez vos résultats à une décimale.

Réponse à la question III.9.

L'intervalle de polarité magnétique normale compris entre 100 et 153 m s'est déposé entre 3.22 et 3.12 Ma (âges des inversions magnétiques correspondant Sous-Chron C2An.2n). 53 m (5300 cm) de sédiments se sont donc déposés en 0,1 Ma (100 ka).

Le taux de sédiment moyen pour cet intervalle est donc de **53.0  $\text{cm.k}^{-1}$** .

L'intervalle de polarité magnétique normale compris entre 0 et 50 m a pu se déposer entre 3.59 Ma (âge de la base du Sous-chron C2An.3n) et 3.51 Ma (âge de la lave A). 50 m (5000 cm) de sédiments se sont déposés en au moins 0,08 Ma (80 ka).

Le taux de sédiment moyen est au minimum de **62,5  $\text{cm.k}^{-1}$** .

*Question très peu traitée par les candidats. Le calcul du taux de sédimentation dans l'intervalle 100-153 m a été beaucoup mieux réussi que celui de l'intervalle 0-50 m (une seule bonne réponse).*

NOM :

PRENOM :

Salle :

**Question III.10** – En utilisant les résultats des **questions III.9**, calculez les âges en Ma (millions d'années) des fossiles d'*A. afarensis* collectés. Vous arrondirez vos résultats à deux décimales.

Réponse à la question III.10.

La base du Sous-Chron C2n.2n, située à 100 m, a un âge de 3,22 Ma.

Les fossiles d'*A. afarensis* ont été collectés à ~112 m, soit 12 m (1200 cm) au dessus de la base du Sous-chron C2n.2n.

Le taux de sédiment moyen étant de 53.0 cm.ka<sup>-1</sup> dans cet intervalle, les fossiles d'*A. afarensis* sont de 22,64 ka plus jeunes que la base du Sous-chron C2n.2n.

Ils sont donc datés de  $3,22 - 0,022 = \mathbf{3,20\ Ma}$ .

La coulée de lave A, située à 50 m, a un âge de 3,51 Ma

Les fossiles d'*A. afarensis* ont été collectés à ~33 m, soit 17 m (1700 cm) en dessous de la coulée de lave A.

Le taux de sédiment moyen minimum étant estimé à 62,5 cm.ka<sup>-1</sup> dans cet intervalle, les fossiles d'*A. afarensis* sont de 27,2 ka plus anciens que la coulée de lave A.

Ils sont donc datés de  $3,51 + 0,027 = \mathbf{3,54\ Ma}$ .

Attention, l'estimation d'âge des fossiles d'*A. afarensis* récoltés à ~33 m repose sur l'hypothèse que l'intégralité du Sous-chron C2n.3n soit enregistrée dans la coupe de la Formation Hadar (voir ci-dessous question III.11.)

Question très peu traitée par les candidats. Un seul candidat a proposé une réponse juste et complète.

**Question III.11** – Discutez de l'ensemble des limites et incertitudes sur ces estimations d'âges.

Réponse à la question III.11.

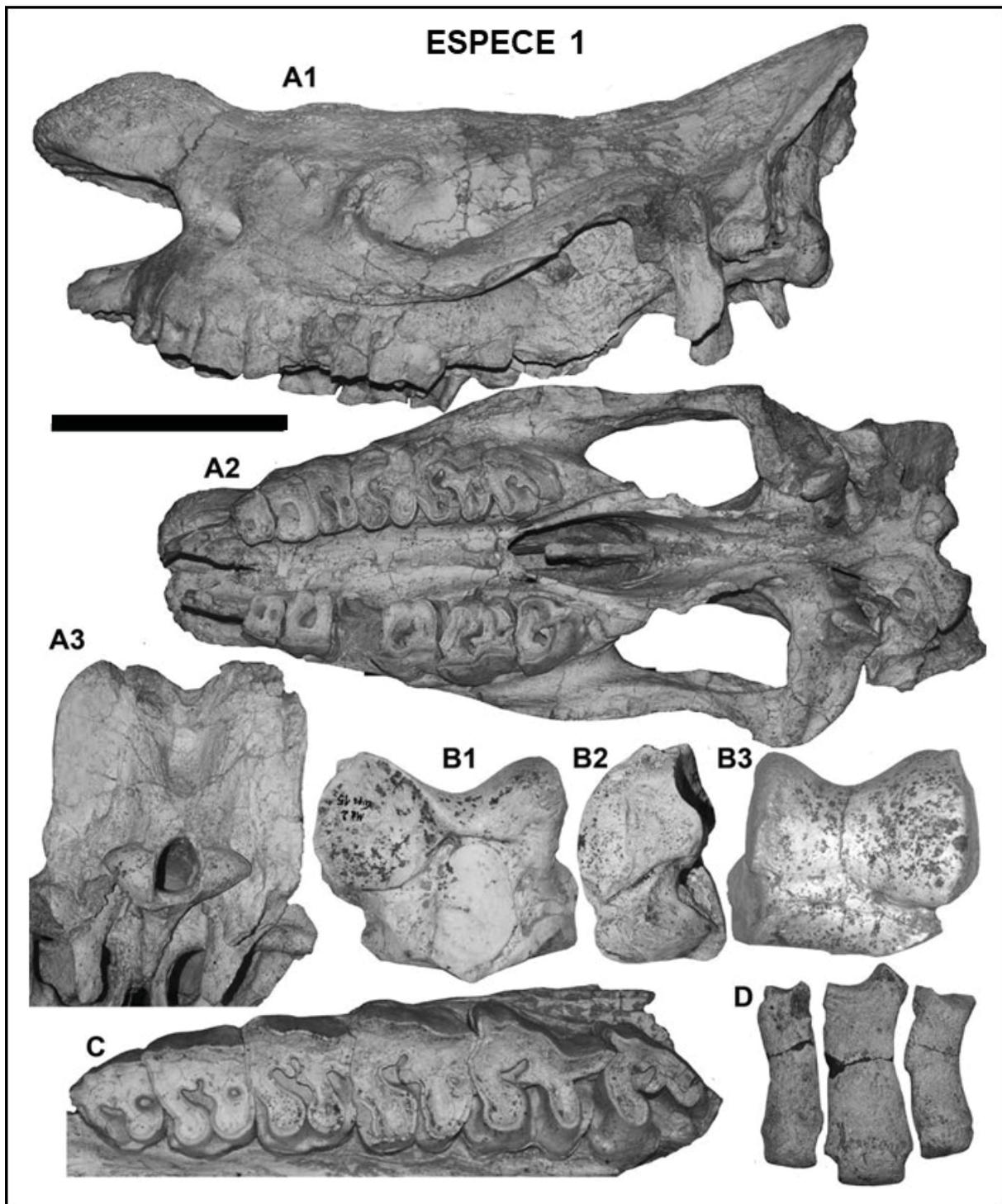
Pour calculer l'âge du plus ancien horizon à *A. afarensis* à ~33 m, on a fait l'hypothèse que l'intégralité du Sous-chron C2n.3n était enregistrée dans la coupe étudiée de la Formation Hadar. Il est probable que la base de la coupe sédimentaire soit plus récente que 3.59 Ma et qu'une partie de ce sous-chron ne soit pas représenté par des sédiments.

Les deux estimations d'âges des horizons à *A. afarensis* reposent sur l'hypothèse que les taux de sédimentations aient été constants entre les points d'ancrage chronologiques utilisés dans les calculs. Il est plus que probable que ces taux de sédimentation aient varié au cours du temps.

L'interprétation magnétochronologique est dépendante de la résolution de l'échantillonnage (espacement stratigraphique entre deux échantillons sufficients prélevés pour la mesure des polarités magnétiques). La magnétostratigraphie reconstituée pour la coupe de la Formation Hadar repose sur l'analyse de 40 échantillons présentant une résolution d'échantillonnage de plusieurs mètres, et qui est variable.

Question très peu traitée par les candidats.

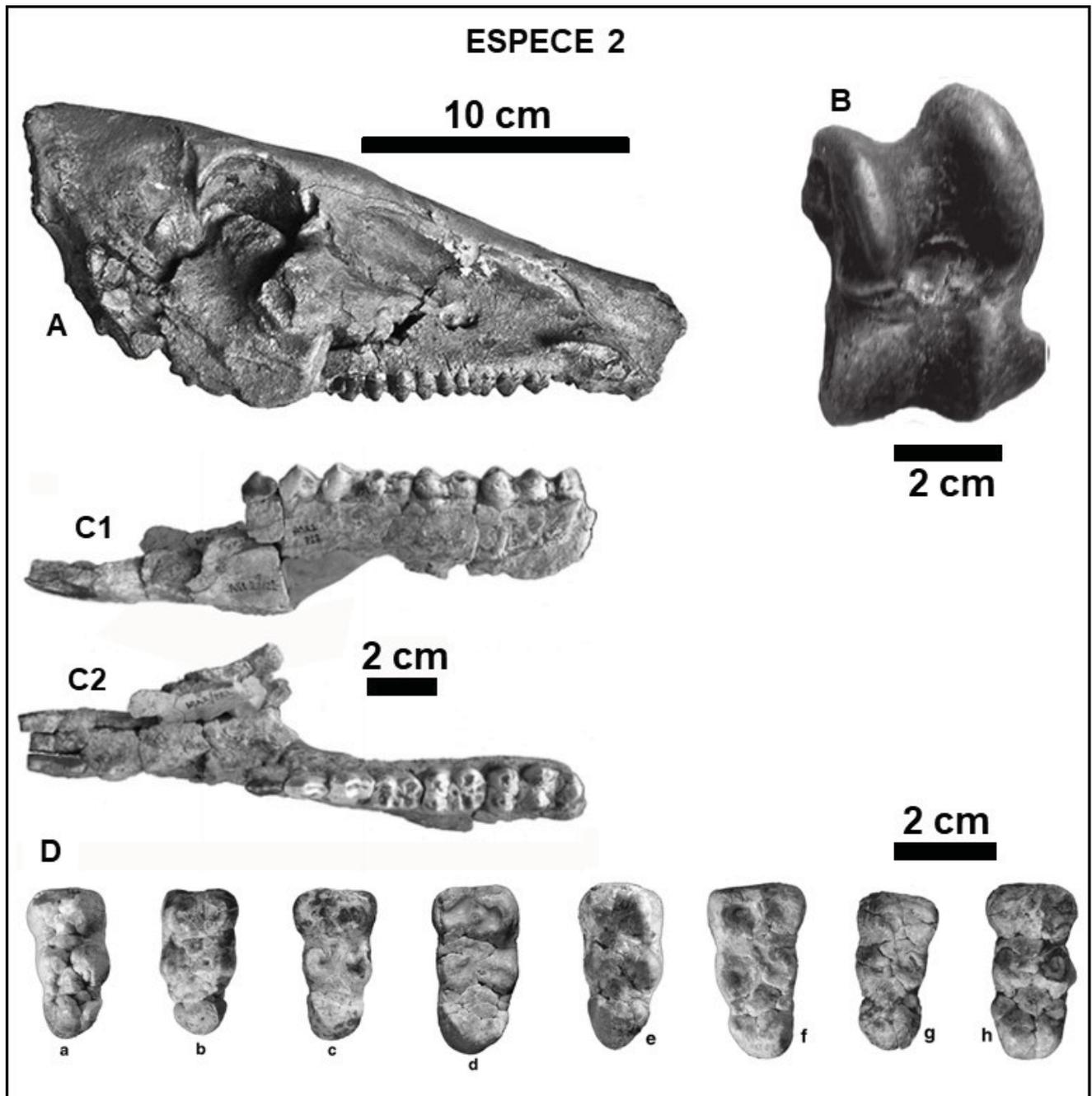
**Question III.12** – Les niveaux fossilifères à *A. afarensis* ont aussi livré de nombreux fossiles d'autres vertébrés. Vous trouverez en **Figures 13** et **14** les photographies de restes fossiles de deux des espèces de vertébrés collectées.



**Figure 13** – Fossiles issus d'une même espèce de vertébré, récoltés dans un des niveaux fossilifères à *A. afarensis* de la Formation Hadar (Fillion et al., 2022).

A = crâne ; B = astragale ; C = maxillaire ; D = métapodes.

Pour A et D, l'échelle mesure 20 cm ; pour B et C, la même échelle mesure 10 cm.



**Figure 14 – Fossiles issus d'une même espèce de vertébré, récoltés dans un des niveaux fossilifères à *A. afarensis* de la Formation Hadar (Fillion et al., 2022).  
A = crâne ; B = astragale ; C = dentaire ; D = dents isolées.**

Déterminez les noms taxinomiques de ces deux espèces de vertébrés aux niveaux de la classe, de l'ordre et de la famille. Vous prendrez soin de justifier chacun de vos deux diagnostics taxinomiques à partir des caractéristiques observées sur les **Figures 13 et 14**.

*Pour l'évaluation de cet exercice, la démarche et les arguments mobilisés pour réaliser les diagnoses des deux espèces fossiles proposées seront tout particulièrement valorisés.*

Réponse à la question III.12.

Espèce n°1 :

La dentition est hétérodonte il s'agit d'un vertébré de la classe des **mammifères**. L'astragale présente une simple poulie ce qui exclue les Artiodactyles. Les prémolaires sont molariformes et le membre est mésaxonien (métapodes II-III-IV avec III dominant). Il s'agit donc d'un **Périssodactyle**.

La taille est très importante (longueur du crâne supérieure à 60 cm). Les tubercules des prémolaires et molaires supérieures forment des crêtes continues et ont une forme de croissant (dents lophosélénodontes) avec crochets dans le trigone. Ce mammifère appartient à la famille des **rhinocerotidés**.

Espèce n°2 :

La mandibule est formée d'une seule pièce osseuse (le dentaire) et la dentition est hétérodonte, il s'agit d'un vertébré de la classe des **mammifères**.

L'astragale présente une double poulie, ce mammifère appartient à l'ordre des **Artiodactyles**.

L'astragale présente une double poulie, les poulies sont désaxées, et sa taille est moyenne (~6-8 cm). Il s'agit d'un suine. Les dents présentent des cuspides arrondis (dents bunodontes) avec une couronne basse (dents brachyodontes) et sont multicuspidées. Ce mammifère appartient à la famille des **suidés**.

Question très peu traitée par les candidats. Tout caractère diagnostique proposé de façon cohérente pour une unité taxinomique de la classification a été valorisé. Trois candidats ont abouti au diagnostique "rhinocerotidé", aucun à celui de "suidé".

# 6. Les Épreuves Orales

Les épreuves orales sont au nombre de deux : une épreuve de spécialité (option) et une épreuve de connaissances générales (contre-option).

**L'épreuve de spécialité (option)** porte sur le secteur choisi par le candidat lors de son inscription au concours (secteur A, B ou C). Elle doit permettre de faire la preuve que le candidat possède des connaissances approfondies dans ce secteur (i.e. du niveau d'un Master 1).

Chaque titre de leçon de spécialité est accompagné d'un nombre limité de documents (classiquement 4 ou 5) qui correspondent à des documents fournis sur clé USB (diagramme, schéma, photo, carte, vidéo...) ou à des échantillons ou des protocoles concrets. Le jeu de documents est conçu de façon à ce que leur analyse/exploitation par le candidat ne dépasse pas 45 minutes et qu'il soit complémentaire des éléments à disposition dans la bibliothèque des ouvrages, documents et matériels. La totalité des documents et matériels imposés doit être intégrée à la leçon (leur ordre de présentation est laissé à l'appréciation du candidat).

**L'épreuve de contre-option** porte sur les domaines autres que la spécialité du candidat. Ainsi un candidat d'option A ou B aura une leçon de contre-option en Sciences de la Terre et de l'Univers, suivie d'une interrogation en Sciences de la Vie (respectivement en b ou a), alors qu'un candidat d'option C aura une contre-option en Sciences de la Vie (secteur a ou b) suivi d'une interrogation dans l'autre secteur des Sciences de la Vie (b ou a). Elle doit permettre d'évaluer les connaissances générales du candidat dans les domaines relevant des Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Univers (i.e. de niveau Licence 3). Il n'y a pas de document ni de matériel imposé par le jury : le candidat doit construire son exposé avec les ouvrages, spécimens et matériels proposés dans la bibliothèque du concours.

## 6.1 Déroulement des épreuves

### 6.1.1 Conditions de préparation

Après avoir pris connaissance du sujet, accompagné des documents imposés par le jury pour les leçons d'option, le candidat dispose de 4 heures pour préparer sa leçon. Après un premier temps de réflexion de 15 minutes, l'accès à la bibliothèque est autorisé. Le candidat remplit une fiche lui permettant d'obtenir les ouvrages, documents et matériels dont il estime avoir besoin. Le jury rappelle qu'il est impératif que le candidat indique correctement sur la fiche prévue à cet effet les ouvrages et le matériel demandés. Aucun matériel d'expérimentation n'est fourni durant les 30 dernières minutes de la préparation, et aucun document ou support n'est fourni durant les 15 dernières minutes de la préparation. Il est rappelé que tous les documents et matériels demandés aux préparateurs doivent être exploités par le candidat lors de sa présentation (le jury vérifie l'adéquation de la présentation à la fiche de demande de matériel lors de l'interrogation).

Durant son temps de préparation, le candidat doit construire sa leçon, réaliser le diaporama, et le cas échéant les montages expérimentaux, qui lui semblent nécessaires à sa démonstration, et analyser-interpréter l'ensemble des documents qui lui ont été fournis pour la leçon d'option.

#### **Le support numérique à l'agrégation de SV-STU**

Les candidats ont à leur disposition un ordinateur équipé avec les logiciels de la suite **Libre Office et une clé USB leur permettant de sauvegarder leur préparation (même si un enregistrement automatique est programmé sur l'ordinateur mis à disposition, il est judicieux d'enregistrer régulièrement l'état de son travail).**

Les documents demandés par le candidat sont fournis par le personnel technique et le candidat les scanne lui-même à l'aide d'un scanner à main présent dans la salle de préparation (mode d'emploi fourni et facile d'usage).

Les documents imposés par le jury pour la leçon d'option sont fournis en version papier et sur la clé USB en format pdf. L'ordre des documents fournis dans le fichier pdf peut être modifié, un même document peut apparaître plusieurs fois au cours de l'exposé.

L'ensemble des documents numériques doivent être vidéoprojetés au cours de la leçon : des maladroites ont parfois été constatées dans leur présentation, notamment la suppression des légendes des figures. Ces imprécisions ont été évaluées dans la rubrique « communication » de la grille du barème.

#### **Quelques principes de base :**

Les divers documents utilisés doivent être intégrés à un diaporama, constitué par le candidat.

L'inclusion des images dans le diaporama permet d'isoler celles-ci et de les exploiter avec les outils bureautiques de base (surlignage, encadrement statique ou dynamique, décomposition d'une image en plusieurs secteurs, délimitation d'une enveloppe, d'une courbe moyenne, mise en valeur de données chiffrées, etc...).

Rappelons quelques conseils de base :

- une diapositive = une idée. Éviter de projeter en même temps plusieurs documents,
- une diapositive doit être vue : veiller à ce que l'image projetée soit lisible.

Quid du plan de la leçon ? S'il doit continuer à être clairement explicité et rédigé, **l'habitude du « plan rédigé au tableau pendant la leçon » peut être abandonnée si le plan en question est déroulé à l'aide du diaporama**. Le candidat gagne ainsi un temps certain, et évite de consacrer de précieuses minutes à l'écriture au tableau de lignes de texte. Le tableau peut ainsi être réservé à d'autres éléments présentés au cours de l'exposé, la confection séquentielle d'un schéma bilan par exemple.

**Au cours de la préparation, le diaporama confectionné doit être régulièrement enregistré sur la clé fournie, pour éviter tout problème lors de la leçon.**

L'utilisation du numérique dans les épreuves orales d'agrégation doit permettre à ces leçons de démontrer la capacité des candidats à utiliser les outils pédagogiques et didactiques du XXI<sup>ème</sup> siècle. Elle doit permettre aux candidats de faire la preuve de la qualité scientifique et pédagogique de leur leçon.

### **6.1.2 Présentation et entretiens de la leçon d'option**

À l'issue des 4 heures de préparation, le candidat dispose de 50 minutes pour présenter sa leçon d'option devant une commission composée de membres du jury de spécialité.

À la fin de son exposé, le candidat est interrogé en deux temps. Dans un premier temps, un entretien d'une durée de 10 minutes est conduit par le concepteur du sujet et porte sur la thématique de la leçon. Lors de cet entretien, le concepteur du sujet peut revenir sur des aspects traités durant l'exposé, sur la façon qu'a eu le candidat de le présenter au jury, la pédagogie mise en place, sur l'exploitation des documents fournis, sur des documents et du matériel présentés durant la leçon, ou encore interroger le candidat sur des aspects non traités du sujet mais liés à la thématique de la leçon. L'objectif de ce questionnement est de s'assurer que le candidat a bien compris les différents volets du sujet proposé et qu'il maîtrise les notions et les connaissances liées à ce sujet.

Dans un second temps, deux entretiens, chacun d'une durée de 7 minutes 30, sont menés par deux autres membres du jury. Ces entretiens portent sur des thématiques relevant du domaine de spécialité du candidat et visent à évaluer les aptitudes et connaissances du candidat sur ce secteur. Ils peuvent ou non débiter par l'étude d'un document ou d'un échantillon proposé par le jury comme document d'appel pour entamer la discussion.

### 6.1.3 Présentation et entretiens de la leçon de contre-option

A l'issue des 4 heures de préparation, le candidat expose pendant 40 minutes devant une commission de quatre membres du jury, deux dans chacune des deux contre-options.

A la fin de l'exposé, l'interrogation a lieu en trois temps :

- un premier échange de 7 minutes, conduit par le concepteur du sujet, porte sur le contenu de la leçon.

- une deuxième interrogation de 9 minutes, menée par un autre membre de la commission, mobilise des connaissances dans le même domaine scientifique. Le questionnement s'écarte du thème de la leçon et explore les connaissances dans des champs du même secteur scientifique.

- enfin, le dernier questionnement de 9 minutes est conduit par un troisième interrogateur et explore les connaissances de la deuxième contre-option.

Lors de la première interrogation, le jury revient sur certains aspects de l'exposé ; cela peut concerner le déroulement d'une expérience, l'explicitation d'un cliché, l'exploitation d'un échantillon présenté, sur un aspect du sujet qui n'a pas été abordé par le candidat ou bien sur certaines erreurs pour déterminer s'il s'agissait d'un lapsus ou non. L'objectif de ce questionnement est de s'assurer que le candidat a acquis une bonne compréhension globale des différents aspects du sujet proposé et de revenir sur la démarche pédagogique mise en œuvre.

La deuxième interrogation s'écarte de l'exposé et explore d'autres domaines du secteur. S'agissant d'une contre-option, le jury ne cherche pas à tester des connaissances de détail mais il veut s'assurer d'une bonne vision intégrée des connaissances du secteur exploré. La troisième interrogation porte sur la deuxième contre-option. Il y a donc changement de secteur.

L'interrogateur peut prendre appui sur un document (échantillon, photographie, résultat d'expérience) pour amorcer le questionnement. Au cours de la discussion qui s'engage, le membre du jury qui interroge explore différents domaines de la contre-option.

L'oral de contre-option est donc une épreuve qui nécessite une concentration permanente, une bonne réactivité et de solides connaissances générales.

## 6.2 Constats et conseils pour les épreuves orales

Les épreuves orales sont des épreuves pour lesquelles le jury se montre exigeant, et attend des candidats une réelle démarche et une rigueur scientifique dans leur démonstration.

Par exemple, lorsque le document présenté est une expérience, il est essentiel de l'analyser, de le décrire, d'indiquer la question posée et la (ou les) hypothèse(s) testée(s), puis d'interpréter le document afin de conclure si l'hypothèse est confirmée ou infirmée par les résultats.

Partir d'un modèle théorique issu d'un ouvrage et essayer de faire coïncider les données expérimentales avec ce dernier est contre-productif et s'apparente non pas à une démonstration mais à une illustration. En revanche l'analyse d'un document peut permettre d'initier la construction d'un modèle, qui peut alors être complété en indiquant clairement ce que le document montre et ce qui n'a pas été démontré et qui est ensuite présenté pour gagner du temps dans l'exposé.

Les éléments détaillés ci-dessous s'appliquent tout d'abord aux leçons d'option mais sont transposables, pour la plupart aux leçons de contre-option, dont la démarche générale est identique.

### 6.2.1 La leçon d'option : une épreuve de haut niveau scientifique visant à répondre à une problématique

Cette épreuve porte sur les différentes rubriques du programme relevant du domaine de spécialité du candidat. Les champs disciplinaires concernés sont ceux qui doivent permettre aux candidats de démontrer leur maîtrise de la démarche scientifique et leurs aptitudes pédagogiques à présenter clairement des notions de haut niveau. Beaucoup de candidats cherchent en 50 minutes à tout dire sur un sujet en survolant les points abordés.

Le jury rappelle encore une fois qu'une contextualisation servant d'appui à la construction de la problématique est nécessaire en introduction. Souvent, elle est artificielle et sans lien avec le reste du sujet ou le plan énoncé par le candidat. Le candidat doit dégager une problématique claire dans son introduction qui sert de fil directeur à sa démonstration, et ce, à partir d'une analyse rigoureuse des

termes de son sujet sans pour autant se contenter d'un catalogue de définitions. Pour rappel, l'objectif est d'apporter des réponses aux questions posées et non se limiter à une présentation de concepts. Ainsi, les documents présentés et les connaissances apportées doivent être au service de la réponse à cette problématique. La présentation doit se terminer par une synthèse des éléments présentés et une ouverture visant à replacer le sujet dans un contexte plus général, tout en évitant une ouverture artificielle sur un autre sujet.

### 6.2.2 Le recul nécessaire pour traiter des thèmes plus ou moins classiques

Le titre de la leçon, que ce soit celle d'option ou de contre-option, renvoie le plus souvent à des thèmes classiques connus de la majorité des candidats mais il peut aussi faire référence à des thèmes *a priori* plus délicats à cerner ou à des synthèses transversales, et pour lesquels les candidats estiment leurs connaissances initiales plus limitées. Paradoxalement, les candidats ont souvent moins de difficultés à traiter des leçons jugées *a priori* ardues que des leçons jugées plus classiques : leurs connaissances plus restreintes les obligent à analyser les documents et à pratiquer une réelle démarche de raisonnement.

La leçon d'option ou de contre-option, est un exercice scientifique avec toutes les exigences de raisonnement et de justification que cela impose. Trop de leçons se limitent à une restitution de connaissances sans raisonnement et ne cherchant pas à répondre à une problématique.

### 6.2.3 L'exploitation des documents imposés dans la leçon d'option

Pour rappel, une analyse rigoureuse des documents fournis par le jury doit aider le candidat à dégager, au moins partiellement, la problématique de sa leçon. Les documents doivent être analysés dans leur globalité. La compréhension des documents doit être aboutie avant le début de la leçon, ce qui évite une perte de temps et une rupture de la fluidité de l'exposé quand un candidat découvre pendant sa présentation ce qui est présenté dans le document et tente alors une interprétation improvisée.

Le jury regrette que certains candidats fassent de trop longues descriptions orales de documents projetés, et qui conduisent bien souvent le candidat à perdre son fil directeur (et donc du temps) au détriment des résultats importants. Les conclusions vagues, sans précision, sont à éviter ("le facteur a un effet", "joue beaucoup", "a un impact", "une influence"...), au profit de termes tels que "activer/stimuler/provoquer/induire" ou "inhiber/ralentir/diminuer", plus précis. Des quantifications sont attendues ("la croissance double", "la prolifération est divisée par 10"...), plutôt que des jugements de valeur vagues ("beaucoup", "drastiquement", "un peu"...). Le jury rappelle qu'une quantification ne correspond pas à une simple paraphrase des valeurs brutes.

L'analyse des documents ne doit pas être séparée du contenu de la leçon, certains candidats ont analysé tous les documents dans un deuxième temps après avoir exposé les notions relatives au sujet. Les documents fournis servent de support à l'argumentation de concepts en lien avec le sujet de la leçon. Le jury a valorisé les candidats qui s'appuient sur une analyse rigoureuse du document pour dégager une notion en lien avec le sujet, et ensuite, éventuellement, généraliser les concepts présentés.

Certains candidats n'hésitent pas à découper les documents fournis pour les incorporer progressivement à leur leçon ; cela est valorisé lorsque la démarche était pertinente.

A de nombreuses reprises, des candidats présentent des corrélations et en déduisent des relations de causalité ou ne prennent pas en compte les analyses statistiques associées, ce qui reste surprenant.

### 6.2.4 Le choix et l'exploitation du matériel au service de la leçon (option et contre-option)

Pour la leçon d'option, comme déjà souligné, les documents proposés par le jury ne couvrent pas tous les aspects du sujet. Ils sont destinés à orienter le candidat dans la construction de sa leçon. Le concepteur du sujet peut également choisir de ne pas aborder, par les documents qu'il propose, certains aspects importants du sujet afin de laisser au candidat l'initiative de certains documents et matériels. Même si tous les documents imposés doivent être intégrés à la leçon et analysés, l'exposé ne peut donc pas être construit exclusivement autour des thèmes que les documents permettent

d'aborder. Il revient donc au candidat de compléter l'illustration de sa leçon par des expérimentations, matériel concret ou documents (y compris de courtes séquences vidéo) complémentaires.

L'exploitation du matériel complémentaire doit faire l'objet de la même rigueur que celle du matériel imposé, et elle est très clairement prise en compte dans l'évaluation de la leçon.

En contre-option, le candidat doit faire lui-même le choix du matériel illustrant sa leçon.

Cette année encore, le jury a valorisé les candidats qui privilégient les observations concrètes à des schémas théoriques qui ne s'appuient pas sur des données expérimentales ou des observations. En revanche, sortir un échantillon juste pour le nommer n'a guère d'intérêt.

Le jury rappelle à cette occasion que l'observation et l'analyse du réel sont fondamentales en Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Univers. Toutefois, le matériel sorti doit être utilisé de façon pertinente et doit apporter une plus-value pour la leçon. Le jury rappelle, une fois encore, que la présentation de matériel concret nécessite la réalisation de schéma(s) interprétatif(s).

### 6.2.5 Une démarche scientifique incontournable

Au cours de la leçon, la démarche scientifique doit s'appuyer sur une analyse rigoureuse des objets proposés par le jury ou apportés par le candidat. Cette démarche doit commencer par une mise en contexte, par exemple la question scientifique et l'hypothèse testée de l'expérience, puis une description des objets, spécimens ou faits expérimentaux, en lien avec la question posée. Une interprétation raisonnée permet alors soit de conclure un paragraphe et donc de répondre à une question, soit donner lieu à une nouvelle question, et sert alors de transition avec la suite de l'exposé. Trop de candidats font encore preuve de démarche inversée, en donnant la conclusion avant l'analyse. Une démarche démonstrative est attendue, en particulier lors de l'analyse des documents imposés.

Le jury invite à nouveau les candidats à réfléchir au statut des modèles et de la modélisation dans leur raisonnement. Un modèle est une construction intellectuelle qui essaie de rendre compte d'une réalité complexe. Il convient donc de s'interroger sur sa place dans la démonstration, sur sa valeur prédictive ou explicative et sur son dimensionnement. Il est important de ne pas confondre les faits avec les modèles. Ces derniers peuvent apparaître sous forme d'un bilan de la leçon ou bien ils peuvent servir à poser des questions critiques lors de la démonstration.

Enfin, le jury rappelle que le finalisme ne constitue en aucun cas une argumentation satisfaisante. Il est important que les candidats bannissent de leur champ lexical les formulations du type "L'objectif du processus est de ..." "Pour que ...".

### 6.2.6 Un véritable travail de synthèse et de choix

Le jury est tout à fait conscient que 40 ou 50 minutes est un temps d'exposé limité. Le candidat sera généralement amené à faire un important travail de synthèse : il devra alors clairement justifier, dans son introduction, les différents aspects du sujet qu'il souhaite traiter et, inversement, les différents aspects du sujet qu'il souhaite délaissier. C'est la rigueur de la démarche qui justifiera la validité de ses choix, et il est impératif que le candidat présente au jury les raisons de ce choix. Si le jury entre en salle avec une idée claire de ce qui doit figurer dans la leçon, il n'arrive pas avec un plan préconçu et est prêt à entendre les propositions que pourra lui faire le candidat et à les accepter pour peu que ces choix assumés soient justifiés au cours de la présentation ou lors de l'entretien.

En fin d'exposé, la conclusion doit mettre en valeur les idées-clés dégagées au cours de la démonstration et déboucher sur une ouverture liée avec la thématique abordée durant la leçon. Elle peut s'appuyer sur un schéma bilan récapitulatif à la condition que celui-ci se justifie et soit réellement construit à partir des éléments de la leçon. Ce schéma bilan n'est en aucun cas une obligation.

### 6.2.7 Une communication d'une qualité suffisante

L'épreuve de leçon est aussi l'occasion d'évaluer par les membres du jury les qualités de communication des candidats et la pédagogie mise en place. Le jury note de nets progrès dans la présentation avec une bonne aptitude pour beaucoup de candidats à s'exprimer. Cependant, certains candidats restent encore trop proches de leurs notes durant leur exposé. Le vocabulaire scientifique doit être employé et explicité de manière appropriée. Le jury insiste sur le fait qu'il s'agit d'une leçon dont le niveau scientifique attendu est celui d'une personne diplômée de l'université à un niveau

master, ce qui implique une maîtrise et un usage adéquat du vocabulaire et des concepts scientifiques. De même, il convient d'éviter une posture dogmatique en tant que futur enseignant. Enfin, le jury apprécie que le candidat utilise le matériel et support mis à sa disposition (vidéoprojecteur, tableau, feuilles de papier) afin de réaliser une présentation projetée et des schémas et/ou dessins de qualité. Ces derniers, lorsqu'ils sont approximatifs, illisibles ou ne reflétant pas les observations microscopiques desservent les candidats.

### 6.2.8 Une indispensable réactivité

Le premier entretien, consécutif à la leçon, a pour but de faire réfléchir le candidat à l'exposé qu'il vient de produire, et à l'aider à revenir sur d'éventuelles omissions, imprécisions ou erreurs. Il sert également à évaluer l'aptitude du candidat à raisonner et à exploiter ses connaissances en temps réel. L'interrogation est ensuite ouverte à d'autres domaines du champ des SV-STU – elle peut revêtir des formes très variables qui visent à évaluer les connaissances du candidat et ses aptitudes à construire un raisonnement logique à la suite d'une question posée. Le jury insiste sur le fait qu'il est important que le candidat construise sa réponse, et qu'une juxtaposition de mots-clés ne peut suffire. L'écoute et la réactivité sont des qualités indispensables pour une bonne réussite de cette partie de l'épreuve qui peut permettre au candidat de montrer que, malgré une leçon plus ou moins réussie, il maîtrise de larges connaissances.

Si le candidat ne connaît pas la réponse à la question posée, il est vivement conseillé qu'il n'essaie pas de gagner du temps en fournissant une réponse hors sujet ou en demandant à l'évaluateur de reformuler sa question. Cette attitude lui sera très préjudiciable. Il est préférable qu'il énonce clairement ne pas connaître la réponse.

Le jury observe souvent une baisse de réactivité très nette au cours des entretiens. Il est donc impératif de rester attentif jusqu'à la fin des entretiens. Il est ainsi important de profiter du temps proposé par le jury pour se désaltérer afin de se réhydrater mais aussi de bien se remobiliser avant de démarrer l'entretien.

### 6.2.9 Les critères d'évaluation des leçons

L'évaluation des leçons est faite autour d'items reprenant ces points fondamentaux :

- qualité de l'introduction, du plan et de la conclusion
- démarche scientifique, qualités pédagogiques/didactiques de la leçon
- maîtrise des concepts, notions et connaissances liées au sujet
- exploitation du matériel imposé (pour les leçons d'option)
- choix et exploitation du matériel complémentaire
- maîtrise des concepts et des connaissances, capacités de réflexion en temps réel aux différents entretiens
- communication, réactivité.

## 6.3 Commentaires particuliers concernant les leçons de secteur A

Cette section vise à compléter les commentaires généraux communs à toutes les leçons par des commentaires spécifiques aux leçons de secteur A.

### 6.3.1. Maîtriser les connaissances

La réussite de cette épreuve nécessite de maîtriser des connaissances dans le secteur A : connaissances de niveau licence pour les leçons de contre-option et de niveau master 1 pour les leçons d'option. Le candidat doit également les mettre en perspective avec ses « fondamentaux » de biologie, qui sont souvent les bases d'une leçon bien construite.

Le niveau des candidats est hétérogène, que ce soit en option ou en contre-option. S'il n'est pas attendu d'un candidat qu'il connaisse parfaitement tous les intermédiaires d'une voie métabolique, ou la liste exhaustive des inducteurs embryonnaires, on rappelle que le niveau requis pour **cette leçon est au minimum d'un niveau de licence SV**. Il n'est pas possible d'acquérir des connaissances et de les

mobiliser sans un travail de fond, d'appropriation, d'organisation, de recherche de sens et de curiosité scientifique.

Le jury s'étonne d'avoir encore rencontré des erreurs récurrentes sur des connaissances simples. Par exemple, de trop nombreux candidats sont incapables de raisonner en termes d'oxydoréduction sur une voie métabolique classique, d'identifier les organites et structures supramoléculaires sur une électrographie, de décrire correctement une division cellulaire, la réplication de l'ADN ou les principes de la régulation de l'expression des gènes, la diversité du monde viral, l'organisation des matrices extracellulaires, les principes fondamentaux de l'excitabilité cellulaire, etc... ou de démontrer les relations entre structure, propriétés et fonctions des molécules biologiques fondamentales. Le jury a également constaté que beaucoup de candidats ont des lacunes dans le domaine de la biologie cellulaire végétale.

Le jury a souvent observé une difficulté des candidats à hiérarchiser les connaissances. Certains candidats placent ainsi au même niveau des mécanismes fondamentaux et des détails de mécanismes biologiques : par exemple, connaître la séquence RGD de la fibronectine tout en étant incapable de décrire simplement la structure d'une lame basale.

### 6.3.2 Intégrer de nouvelles connaissances pendant la préparation de la leçon

Avec la leçon d'option le jury n'évalue pas seulement les connaissances du candidat. Les documents et la bibliographie apportent des informations qui ne sont pas forcément connues initialement du candidat ; celui-ci doit alors démontrer qu'il est capable d'intégrer rapidement ces nouvelles connaissances à son bagage scientifique. Les qualités d'analyse et de raisonnement à partir de ces données sont donc également évaluées.

De façon générale, **il est préférable pour un enseignant scientifique de comprendre et manipuler les notions de base et d'être capable de les compléter** par des détails recherchés dans des ouvrages ou sites Internet.

Que ce soit pour la leçon d'option ou de contre-option, la maîtrise de la bibliothèque mise à la disposition des candidats, dont le contenu est en adéquation avec les attendus du jury, permet de mieux appréhender l'ensemble des sujets posés. Ainsi, le jury a constaté que les candidats qui consultent un grand nombre d'ouvrages généralistes pour un sujet très pointu ont généralement du mal à faire ressortir les éléments essentiels de la leçon. *A contrario*, certains ouvrages plus spécifiques, qui auraient pu aider les candidats à traiter certains sujets, n'ont pas été consultés.

### 6.3.3 Organiser l'exposé

Dans l'introduction, il est conseillé d'exposer avec rigueur les définitions des différents mots du sujet pour ensuite les associer, ce qui amène à proposer une démarche construite. La plupart des problématiques proposées étaient satisfaisantes.

Les plans catalogues qui ne font pas suffisamment ressortir les concepts sont à proscrire. La recherche d'un plan original peut toutefois être contre-productive quand elle aboutit à l'oubli d'un pan majeur du sujet. De la même façon, dans la leçon d'option, lorsque le plan se limite à la succession des documents proposés, il est souvent incomplet. Les documents proposés par le jury doivent être intégrés dans une réflexion d'ensemble et il ne faut pas oublier qu'ils ne recouvrent en général qu'une partie du sujet. Mieux vaut faire la démonstration de sa maîtrise des concepts de base de la biologie dans un plan classique, en particulier quand le sujet n'est pas parfaitement maîtrisé par le candidat.

Au cours de l'exposé, la compréhension du plan par le jury est trop souvent perturbée par des titres de paragraphes annoncés et écrits *a posteriori*, plus souvent du fait d'un oubli du candidat que de sa volonté de ménager le suspense... **Rappelons qu'il n'est pas nécessaire d'écrire le plan au tableau** (ce qui représente une perte de temps pour le candidat et de place au tableau pour illustrer la leçon), **il peut être déroulé au fur et à mesure de la leçon en étant intégré au diaporama**. Si le candidat souhaite mettre en évidence une notion avant de la formaliser, ce qui est tout à fait pertinent, il doit choisir un titre qui le permet et pourquoi pas le compléter par la conclusion dans le plan ou sur un schéma bilan. Le jury a été surpris par l'inadéquation qui existe parfois entre le titre d'un paragraphe et son contenu.

Il n'y a aucun formalisme imposé pour les leçons. Ainsi, un schéma bilan n'est pas exigé, surtout si celui-ci n'apporte rien. Cependant, certains schémas, souvent construits progressivement, peuvent être intéressants s'ils synthétisent les notions développées au cours de l'exposé.

Certaines conclusions, qui ne se bornaient pas à une répétition des grandes lignes du plan, mais qui dégagèrent une idée transversale et mettaient en perspective les notions développées, ont été particulièrement appréciées.

#### 6.3.4 Travailler à toutes les échelles et construire le sens biologique

Dans le programme officiel de l'agrégation, le secteur A est désigné par le titre : « Biologie et physiologie cellulaires, biologie moléculaire ; leur intégration au niveau des organismes ». Les candidats oublient trop souvent cette seconde partie de l'intitulé et se concentrent sur des mécanismes moléculaires précis sans les resituer au niveau physiologique. Par exemple, il est difficile de décrire les mécanismes immunitaires ou neurobiologiques sans les localiser dans les différents organes lymphoïdes ou les différents organes nerveux. On attend des candidats un certain recul sur les notions développées, qui doit leur permettre de les intégrer à différentes échelles et de leur donner du sens biologique.

#### 6.3.5 S'appuyer sur le réel pour illustrer sa leçon

Même si le secteur A n'est pas celui où il est le plus facile de présenter des échantillons biologiques « réels », l'apport de ces éléments augmente fortement la plus-value de la leçon, lorsqu'ils sont bien évidemment utilisés à bon escient et dans une démarche explicative. Ce matériel peut être imposé dans les documents fournis par le jury ou proposés par le candidat pour illustrer les points-clés de son exposé. La liste des ouvrages, matériels, lames histologiques, matériel expérimental est disponible pendant la phase de préparation de la leçon et le candidat est accompagné durant cette phase par l'équipe technique qui lui fournit le matériel complémentaire qu'il souhaite. L'ensemble des documents et matériels, imposés et demandés, doit être intégré à la leçon (le jury vérifie l'adéquation de la liste des demandes du candidat avec le contenu de l'exposé).

Il semble encore nécessaire de rappeler qu'un échantillon ou un document ne doit pas être fourni au jury de façon brute : il doit être accompagné de tous les éléments permettant de rendre sa compréhension aisée (et que pour qu'une dissection soit exploitable, cela implique qu'elle soit recouverte d'eau).

Les préparations histologiques doivent toujours être exploitées/léguées (par tout moyen au choix du candidat : dessin, annotation d'une capture d'image...) afin de démontrer au jury la capacité du candidat à identifier (et retrouver) les structures présentes et à intégrer leur présentation à la problématique. C'est aussi l'occasion de rappeler que l'usage du microscope optique et de la loupe binoculaire doit être parfaitement maîtrisé par les candidats. Plus largement, les différentes échelles d'observation et le principe des différents microscopes doivent être connus. Les électrographies sont des supports trop peu exploités par les candidats.

Quand une manipulation est demandée, elle doit être réalisée au moins en partie devant les membres du jury, sauf si sa réalisation demande beaucoup de temps. C'est le cas de certaines manipulations de type ExAO. On note d'ailleurs que trop peu de candidats proposent spontanément ce type de mesures. Enfin, on rappelle que toute situation expérimentale nécessite d'y inclure des témoins : ils doivent être présentés, ou au moins explicités, lors de la présentation des observations ou des résultats des expériences.

Des manipulations simples de biochimie ou de biologie cellulaire peuvent être appréciées, et ont tout leur intérêt si elles sont réalisées et analysées avec rigueur et que les interprétations sont en adéquation avec les résultats observés et le sujet de la leçon. En cas de résultat imprévu (qui aurait parfois pu être évité par un essai préalable pendant le temps de préparation), il ne faut pas s'arrêter au constat d'échec mais proposer des explications. Le jury y reviendra forcément lors de l'entretien, si cela n'a pas été fait spontanément par le candidat. L'utilisation de programmes de manipulation de modèles moléculaires doit être maîtrisée par les candidats ; elle est parfois imposée par les documents proposés par le jury, qui attend une véritable exploitation des modèles (et non leur simple présentation, qui n'a alors qu'un rôle illustratif).

Au-delà de l'exploitation de matériel réel pour illustrer les leçons, la mise en place d'une démarche démonstrative tout au long de l'exposé est absolument requise. Chaque partie doit être introduite par un questionnement, auquel le candidat doit proposer de répondre par l'observation, avant de dégager des notions générales qui peuvent alors être complétées de données plus théoriques. Cette démarche s'applique particulièrement aux documents fournis par le jury dans le cas de la leçon d'option, mais doit être généralisée à l'ensemble des leçons (y compris contre-option).

S'appuyer sur une approche historique pour exposer l'évolution des connaissances dans un domaine donné peut être pertinent, il ne faut cependant pas en abuser ni y consacrer l'ensemble de la leçon.

### 6.3.6 Adopter une démarche scientifique dans l'exploitation des documents

On rappelle que les documents imposés par le jury pour la leçon d'option sont des supports d'une partie de la démarche que le candidat doit construire. Ainsi, certains aspects du sujet, souvent classiques, peuvent ne pas être abordés dans les documents proposés par le jury mais sont néanmoins attendus.

Que ce soit des documents imposés ou des documents choisis par le candidat, y compris dans les leçons de contre-option, il est judicieux d'introduire le document par un questionnement, et de justifier en quoi le protocole réalisé peut permettre d'y répondre. S'il est inutile de passer du temps à paraphraser le protocole décrit, un schéma expérimental peut parfois être très didactique. On attend que les documents soient analysés et interprétés avec précision. L'analyse proposée par le candidat doit être quantifiée lorsque c'est possible (travail sur des histogrammes, des graphiques, etc.). Indiquer que « tel paramètre mesuré augmente dans telle situation » est beaucoup moins informatif que de préciser que « tel paramètre mesuré est multiplié par 50 dans telle condition par rapport à telle autre ». Le jury a apprécié que certains candidats légendaient intelligemment les documents, c'est-à-dire leur donnent du sens. L'analyse doit se poursuivre par une conclusion clairement explicitée. Là encore, une phrase du type « le paramètre joue un rôle dans... » est imprécise : ce rôle peut être positif ou négatif. Un effort d'interprétation, c'est-à-dire une mise en perspective vis-à-vis de la démarche globale de la leçon, doit être fait. Lorsque cela s'y prête, la formulation d'hypothèses pour expliquer les observations est appréciée, de même que la critique de la démarche expérimentale ou des résultats obtenus.

Pour la leçon d'option, s'il n'y a pas de lien entre les différents documents proposés par le jury, il y a en revanche un lien entre les différentes parties d'un même document : il est donc dans ce cas recommandé de les étudier successivement et d'établir les liens entre les différentes données présentées. Dans certains cas, il peut toutefois être pertinent de faire appel et d'exploiter les différentes parties d'un même document à différentes étapes de la démarche globale de la leçon, pour illustrer différentes notions associées à un même phénomène biologique.

Idéalement, les documents doivent venir apporter des éléments de réponse à un questionnement explicité par le candidat et découlant des parties précédentes de l'exposé. Les documents sont trop souvent présentés dans le plan comme un exemple illustrant une situation particulière, alors que ce n'est pas spécifiquement cet exemple ou ces conditions qui importent mais le mécanisme cellulaire ou moléculaire mis en évidence.

### 6.3.7 Adopter une démarche didactique

La démarche didactique n'est souvent pas assez mise en avant par les candidats. Le candidat ne doit pas oublier que le jury teste ses capacités à faire passer un message clair et compréhensible. Les candidats passent souvent très rapidement sur des mécanismes thermodynamiques, moléculaires ou cellulaires complexes, faisant douter le jury de leur capacité à transmettre ce type de notion à leurs futurs élèves.

### 6.3.8 Maîtriser l'oral

Les candidats ont globalement des qualités de communication satisfaisantes (positionnement de la voix, occupation de l'espace, etc.) et la gestion du temps d'exposé est correcte. Le tableau, souvent délaissé ces dernières années, est de nouveau utilisé abondamment par les candidats pour compléter des schémas en direct, ce qui est positif. Le fait de recopier au tableau certaines voies métaboliques

ou équations bilans à l'aide de ses notes, sans exploitation particulière, n'est toutefois pas judicieux et peut faire perdre un temps précieux pour le traitement de la leçon.

La plupart des candidats ont pris le temps de construire un diaporama, intégrant au fur et à mesure les documents, plus ou moins retravaillés (il ne faut pas hésiter à légender, ou mettre en exergue certaines parties de documents, au service de la démarche démonstrative de l'exposé). Les candidats doivent toutefois veiller à **passer l'affichage en mode « présentation »** au début de la leçon pour un résultat optimal.

Le jury attire l'attention sur des formulations inappropriées qui faussent la compréhension par l'auditoire et peuvent dénoter un problème de logique du candidat, par exemple l'usage du futur qui suggère faussement des successions d'évènements. Le jury note que le finalisme, qui avait quasiment disparu des exposés, a malheureusement fait son retour lors des dernières sessions.

Enfin, rappelons que la conclusion en forme de schéma-bilan n'est pas obligatoire, tout comme les cartes mentales : ces éléments ne sont pertinents dans la conclusion que s'ils apportent à la démarche démonstrative inhérente à l'exposé.

### 6.3.9 Rester mobilisé pour les entretiens

Le jury est conscient que la durée totale de l'épreuve, leçon et entretien compris, est conséquente, mais il tient à souligner l'importance de rester mobilisé pour les entretiens. En effet, quelle que soit la qualité de la leçon présentée, les entretiens jouent un rôle essentiel dans l'évaluation du niveau scientifique et de la capacité de réflexion des candidats, et ont un poids assez important dans la note finale. Ainsi, il peut arriver qu'un candidat ait à traiter une leçon sur laquelle il n'est pas à l'aise, mais puisse tout de même montrer de très bonnes compétences scientifiques lors des entretiens.

Les entretiens permettent d'explorer les connaissances dans des domaines différents de celui de la leçon et sont l'opportunité pour les candidats de montrer leur expertise particulière sur tel ou tel aspect du secteur, indépendamment du sujet traité au cours de la leçon. Lors des entretiens, le jury constate que de trop nombreux candidats ne maîtrisent pas les notions associées aux mots qu'ils utilisent, en particulier des notions de base, et ne sont pas capables d'en proposer des définitions pertinentes. En revanche, il apprécie les candidats qui assument avec honnêteté de ne pas connaître une réponse et qui construisent alors un raisonnement en interagissant avec le jury pour élaborer cette réponse. Il ne faut donc pas se laisser déstabiliser par une discussion qui se ferait à partir d'un support volontairement inconnu : ce qui est alors évalué n'est pas la connaissance de ce support par le candidat mais sa capacité à réfléchir en mobilisant les connaissances appropriées. Les entretiens peuvent également être l'occasion d'estimer la culture scientifique des candidats. **Une bonne réactivité sur des sujets d'histoire des sciences, de santé publique ou d'actualité en lien avec le programme est appréciée.**

## 6.4 Commentaires particuliers concernant les leçons de secteur B

Cette section vise à compléter les commentaires généraux communs à toutes les leçons d'option par des commentaires spécifiques propres aux leçons de secteur B.

### 6.4.1 Des connaissances naturalistes à privilégier sans négliger les connaissances de base

Une formation naturaliste est attendue des candidats pour le secteur B à l'Agrégation externe de SV-STU en tant que futurs enseignants.

Pour les leçons d'option, les dossiers proposés par le jury comprennent souvent du matériel concret comme des échantillons biologiques, des dissections à réaliser, des préparations histologiques ou des coupes à faire, des cartes de végétation ou même de courtes séquences vidéo. L'entretien avec le jury après l'exposé est aussi très souvent amorcé à partir d'un échantillon, d'une photographie ou d'un document.

Que ce soit en leçon de contre-option, et encore plus en leçon d'option, le jury attend un minimum de connaissances sur les organismes classiques de la faune et de la flore française. Plusieurs candidats présentent encore des lacunes importantes dans la diagnose des échantillons, la description de

l'anatomie des organismes, de leur écologie et de leur positionnement dans les classifications phylogénétiques sur des échantillons classiques, y compris de la vie courante.

Les connaissances scientifiques sont à maîtriser au-delà d'une simple définition apprise par cœur. A l'inverse il peut être surprenant de voir certains candidats incapables de définir des termes courants de biologie. Par exemple, le jury s'étonne cette année que le concept de "carpelle" ait posé des difficultés à de nombreux candidats. Un carpelle peut être défini comme une feuille modifiée, portant les ovules, et constitutive du pistil. Le nombre de graines n'est directement lié au nombre de carpelles, de même que le "nombre de pistils".

Toutefois, certains candidats montrent des compétences naturalistes très appréciables ainsi que du recul sur les fondements théoriques des différents domaines. Le jury de secteur B encourage une fois de plus les futurs candidats à travailler leur culture naturaliste en zoologie, botanique, microbiologie, écologie et évolution tout en maîtrisant des connaissances de base en biologie et physiologie. Il veillera à continuer cette évaluation lors de la prochaine session.

#### 6.4.2 Exploitation du matériel et intégration dans l'exposé

##### **L'exploitation du matériel et des documents**

Pour la leçon d'option, le dossier proposé par le jury comporte, souvent des supports concrets et des manipulations. Pour rappel, tous ces supports doivent être exploités. Les documents ne couvrent généralement pas la totalité du sujet et servent seulement, la plupart du temps, à illustrer des notions précises à intégrer dans la démarche ou encore à traiter un point plus complexe, peu illustré dans la bibliographie disponible. Le jury attend une exploitation rigoureuse et approfondie des éléments du dossier. Trop souvent, les documents sont décrits après les concepts, alors que leur analyse doit au contraire permettre de dégager un concept qui peut plus ou moins être généralisé selon les cas. De même, un manque de rigueur persiste dans l'observation, l'expérimentation et l'argumentation. Une démarche scientifique doit s'appuyer sur des faits qui permettent d'envisager des hypothèses dont les plus raisonnables sont testées et validées ou invalidées afin de dégager les notions qui peuvent parfois être généralisées.

Quel que soit le matériel présenté (complémentaire ou non), le jury y est attentif, que ce soit en termes de pertinence ou d'analyse. Cette année encore, ces supports sont simplement intégrés au déroulé de l'exposé sans qu'une réelle démarche scientifique soit adoptée. Le matériel demandé par le candidat doit être utilisé avec le même soin que les supports imposés. Sortir un échantillon ou une photographie juste pour mentionner son nom est peu productif, au contraire d'un échantillon exploité en lien avec le sujet.

D'une manière générale, les matériels doivent être exploités de manière rigoureuse et exploitable. Les échantillons, imposés ou choisis, doivent être utilisés pour illustrer certaines notions dans la leçon. Le jury attend, sauf indication contraire, que les candidats exploitent ces matériels en réalisant des préparations de qualité (dissections, coupes histologiques, colorations...) au service de la leçon et donc des questions scientifiques que le candidat pose en introduction ou au cours de sa démarche.

Les montages doivent être impérativement complétés de dessins légendés (ou de prises de photos projetées) et/ou de fléchages des structures d'intérêt pour le sujet (par exemple pour les dissections) afin de les rendre exploitables. Dans une approche expérimentale, il est nécessaire d'inclure des montages qui servent de témoins et qui permettent de conclure (par exemple des colorations mettant en évidence des réserves...).

##### **L'exposé**

###### **Construction et organisation :**

Si la plupart des candidats enracinent leur exposé sur une problématique scientifique clairement énoncée dans l'introduction, la suite de la leçon est trop souvent une juxtaposition de notions reliées par des transitions artificielles et sans lien avec la ou les questions initialement annoncées. Une mise en contexte n'a de sens que si elle permet logiquement de s'interroger sur les termes du sujet et déboucher sur une problématique cohérente. Le jury rappelle qu'une introduction réduite à une définition des termes et à l'annonce d'un plan ne répond pas aux attentes de l'épreuve : elle doit

déboucher sur une question scientifique apportée avec une certaine cohérence dans les propos. Le jury a apprécié les efforts des candidats qui ont pris le temps de reprendre leur problématique afin d'y répondre dans la conclusion. Le jury insiste sur le fait que le travail de construction d'une leçon est une étape cruciale afin que celle-ci exploite au mieux les différents outils (ceux du dossier imposé, le matériel complémentaire, les ressources collectées dans les ouvrages et les connaissances scientifiques du candidat) dans une progression logique et articulée. Aussi, une approche naturaliste ne se limite pas à la description d'un objet ou l'évocation d'un exemple. Les leçons du secteur B reposent bien évidemment sur une démarche argumentée et une démonstration des concepts, à partir de faits, d'observations et d'expériences.

Les candidats ont accès à un certain nombre d'ouvrages figurant dans la bibliothèque de l'agrégation. Pour de nombreuses leçons, il ne faut pas se contenter des ouvrages généralistes, d'autant plus que certains sujets abordent des écosystèmes précis. Pour rappel, les coordonnées des livres demandés (auteurs et titre et non seulement le code) doivent être clairement indiquées sur une feuille qui est consultée par le jury pendant la leçon. Il faut mieux prendre un nombre limité d'ouvrages pertinents plus qu'une liste de plus de dix ouvrages que le candidat n'aura guère le temps de consulter ou d'assimiler pour illustrer sa leçon. Le jury invite donc les futurs candidats à mieux s'approprier les ouvrages de la liste durant leur préparation.

### **Dimension pédagogique et didactique de l'exposé :**

Au-delà des qualités scientifiques des candidats, le jury prête une attention marquée à leurs capacités à communiquer, à montrer, à expliquer, à la rigueur du vocabulaire utilisé, à l'utilisation du vidéoprojecteur et du tableau.

Les documents projetés doivent permettre aux candidats de faire ressortir par des couleurs, des cadres, ou des légendes complémentaires les éléments importants pour la démonstration. Toute démarche qui a facilité la lecture des documents ou le suivi de la démarche du candidat lors de l'exploitation du matériel, fourni ou demandé, a été valorisé. La communication est une qualité importante attendue d'un enseignant, et ce qui facilite la démarche de compréhension par un élève ou un étudiant est donc une qualité recherchée parmi les candidats. Le jury reste aussi attentif à la tenue du tableau et aux schémas réalisés. Il n'y a pas d'obligation de plan au tableau ni de schéma-bilan. En revanche, des schémas explicatifs de notions extraites des documents, des bilans intermédiaires de parties peuvent se révéler très pertinents. On observe encore des exposés où les schémas bilan sont squelettiques, non finalisés, voire en partie hors-sujet. Certains candidats le dessinent à la place de la conclusion alors qu'il devrait être construit au fur à mesure de l'exposé. Malgré ces réserves, le jury tient à souligner que la majorité des candidats montre des qualités de communication tout en sachant gérer le temps imparti pour les exposés d'option.

### **Les entretiens**

Au cours du premier entretien, le jury revient sur certains points abordés pendant l'exposé pour lever certaines ambiguïtés, permettre au candidat de corriger des erreurs ou obtenir des explications ou des compléments sur des points choisis. Il est important que le candidat reste mobilisé pendant l'entretien et, ce, même s'il perçoit, avec les questions qui lui sont posées, certaines faiblesses de sa leçon. La capacité des candidats à revenir sur d'éventuelles erreurs faites ou à compléter des points restés flous lors de la leçon est une qualité appréciée.

Les autres entretiens permettent d'évaluer les connaissances du candidat dans d'autres domaines du secteur B et de tester ses capacités de raisonnement. Cette interrogation menée successivement par d'autres membres du jury est généralement initiée à partir d'un échantillon (coquilles de mollusque, crânes et squelettes, spécimens empaillés, échantillon végétal...) ou un document (photographie d'une coupe histologique, graphe montrant les résultats d'une expérience, tableaux de données...). Ces approches permettent de valoriser les qualités d'observations, d'analyse des candidats et l'exploitation de savoirs opérationnels au service de l'étude d'un échantillon ou d'un phénomène biologique. L'argumentation est un aspect fondamental des Sciences de la Vie, de la Terre et de l'Univers, et le jury tient à rappeler qu'il attend alors un raisonnement argumenté à partir de l'échantillon ou du document fourni et non un placage de connaissances. L'entretien se poursuit

ensuite par un questionnement suivant un fil directeur orienté par les réponses du candidat. Les réponses attendues doivent être ni trop courtes, ni trop longues de manière à couvrir un champ de connaissances scientifiques suffisant et, lorsque l'échantillon soumis à l'analyse s'y prête, le jury apprécie particulièrement les candidats capables d'en mener une présentation construite, active et rigoureuse en lien avec la biologie, l'écologie, la physiologie ou l'évolution des organismes. Le jury tient à rappeler que ces entretiens, effectués dans des domaines complémentaires du secteur B, peuvent permettre de contrebalancer, dans une certaine mesure, d'éventuelles faiblesses révélées par l'exposé et le premier entretien. Ainsi, comme cela a déjà été dit, les candidats sont encouragés à rester totalement mobilisés pendant toute la durée des entretiens.

## 6.5 Commentaires particuliers concernant les leçons d'option C

Cette section vise à compléter les commentaires généraux communs à toutes les leçons d'option par des commentaires spécifiques propres aux leçons de secteur C.

### 6.5.1 Connaissances scientifiques

Le jury déplore un manque de maîtrise des bases scientifiques en général, non seulement en Sciences de la Terre et de l'Univers mais aussi sur des notions simples de chimie ou de physique : des notions de thermodynamique et de chimie (notamment isotopique) sont requises pour aborder le système Terre. Des connaissances quelquefois pointues sur des sujets d'actualité peuvent être mal valorisées en l'absence d'une culture géologique de base. Il est rappelé que préparer l'agrégation ne se fait pas uniquement au cours de l'année de préparation mais que cela implique d'avoir assimilé les enseignements fondamentaux de niveau Licence. L'application d'une méthode pédagogique standardisée ne suffit pas à remplacer les connaissances fondamentales approfondies.

Les connaissances de bases suivantes posent un problème de manière récurrente aux candidats :

- Les notions faisant appel à une quantification ou une estimation de vitesse, débit, durée ou de la cinématique des processus géologiques ;
- Le principe du fonctionnement du microscope optique et des propriétés utilisées pour la détermination des minéraux (biréfringence, pléochroïsme, réfringence...) ;
- Les principes et acquis fondamentaux de la minéralogie (systèmes cristallins, formules chimiques, classification...) ;
- L'analyse de roches et/ou d'échantillons macroscopiques et de lames minces (confusion entre péridotite-gabbro ; plagioclase-pyroxène ; organismes fossiles ; ciment-matrice) ;
- L'exploitation de diagrammes de phase lors de l'étude de processus magmatiques ;
- La confusion entre les trajets P-T-temps et les gradients, l'absence de lien entre les gradients métamorphiques et le contexte géodynamique ;
- Les relations entre contraintes et déformations ;
- La notion d'anomalie en géophysique (les candidats ne mentionnant souvent pas l'existence d'un modèle de référence et dans le cas particulier de la délimitation latérale des plaques, les anomalies gravimétriques sont quasi-systématiquement oubliées, les candidats ne se référant qu'aux données sismiques et thermiques) ;
- La différence entre géoïde et ellipsoïde ;
- La définition du  $\delta^{18}O$ , de même que la signification de ses variations dans la glace ou dans les organismes calcifiés ;
- La signification des roches sédimentaires et des environnements de dépôts associés, souvent très approximative ;
- Le principe et le fonctionnement des outils expérimentaux les plus classiques (GPS, radar, microsonde électronique, spectromètre) ;
- L'utilisation des cartes géologiques adaptées par les candidats : utilisation correcte des cartes au millionième, au 1/50000 et au 1/250000 ;
- L'utilisation des modèles analogiques (exploité mécaniquement et trop souvent sans compréhension des lois d'échelle, des limites et des biais).

Enfin, les membres du jury du secteur C souhaitent rappeler qu'une solide formation naturaliste est attendue des candidats à l'Agrégation externe de SV-STU. De solides connaissances géographiques sont également exigées en particulier pour situer certaines structures ou régions géologiques remarquables.

### 6.5.2 Organisation de l'exposé / Démarche

Les plans proposés par les candidats sont souvent scolaires et présentent des titres peu démonstratifs ou non homogènes. Si le plan est projeté, il n'est pas nécessaire de l'écrire une seconde fois au tableau. Par contre il reste indispensable de l'énoncer au fur et à mesure de la leçon.

Globalement la problématique est présente, mais il ne faut pas oublier qu'elle doit permettre la construction d'une leçon suivant un fil directeur bien identifié et elle ne doit pas simplement reprendre le titre.

Durant la leçon, un des problèmes majeurs reste que les candidats ne partent pas assez de l'observation et de l'exploitation du matériel et des documents pour construire des notions. Les supports ne doivent pas être de simples illustrations d'un propos mais une base pour discuter des processus, un modèle... Le jury constate que globalement les candidats ne partent pas suffisamment des objets géologiques, mais préfèrent traiter des processus de façon très théorique ; et qu'il y a un gros travail à faire sur la bibliographie, car les ouvrages sortis par les candidats sont souvent trop nombreux, et pas toujours les plus appropriés pour traiter de la leçon.

### 6.5.3 Exploitation des documents fournis et des documents complémentaires

Trop de documents (imposés ou non) ne sont pas exploités ou pas dans le sens de l'intitulé de la leçon. Il faut que le candidat ne perde jamais de vue sa problématique, et exploite les documents afin d'y répondre.

Les documents et objets géologiques (imposés et choisis en option) doivent être placés au cœur de l'argumentation. Concrètement, ils doivent être exploités.

Les recommandations du jury sont ainsi (1) de s'appuyer sur des supports concrets et (2) d'exploiter efficacement les documents sans multiplier de façon exagérée les documents complémentaires. L'exercice de présentation et d'exploitation des documents permet ainsi d'évaluer conjointement les capacités d'analyse scientifique et les qualités pédagogiques.

Les documents proposés par le jury sont souvent des données géophysiques ou géochimiques, des résultats d'expériences, mais cela peut également être des cartes géologiques, des échantillons de roches, des lames minces, des photos d'affleurements... Le candidat doit les présenter au jury, les décrire systématiquement avant de les interpréter. Rares sont les candidats qui pensent à encadrer, souligner les points importants de façon graphique. L'utilisation d'un pointeur ou du curseur n'est pas systématiquement utilisée. Traduire des données fournies (ex : tableau) en graphique est maintenant facile en utilisant un tableur, peu de candidat se sont néanmoins livrés à l'exercice.

Le jury a remarqué que certains candidats ne présentaient pas la globalité des documents imposés en leçon d'option ou occultaient certaines parties de ceux-ci, ce qui les pénalise lors de la notation.

Les échantillons et photos des lames minces sont inégalement exploités ; une présentation complète des échantillons à différentes échelles, accompagnée de schémas et croquis explicatifs soignés est fortement conseillée. Pour une analyse raisonnée d'échantillon, il convient d'utiliser des critères qui permettent de s'orienter vers le type de roche (magmatique, sédimentaire, métamorphique) puis d'affiner les observations afin de conclure sur la nature de la roche et son histoire. Dans cette démarche, l'analyse inclut la texture, la description précise et le nom des minéraux, la caractérisation morphologique des objets. Le vocabulaire qui permet de décrire les échantillons est souvent très approximatif, et on note de nombreuses confusions (matrice pour mésostase, confusion macle/clivage, teinte/couleur/pléochroïsme d'un minéral...).

De même, les cartes géologiques sont souvent présentées de manière trop superficielle sans réelle exploitation : une production autour des cartes est souhaitable (schéma structural, coupe...).

Les échantillons et les cartes utilisés doivent être replacés dans leur contexte géographique et géologique.

Les candidats présentent parfois des modèles analogiques, mais leur utilisation est très fréquemment maladroite. En effet, il ne faut pas confondre modèle et phénomène naturel. Le transfert d'échelle entre les objets naturels et le modèle doit être souligné. L'utilisation d'un modèle doit découler d'un certain cheminement qui pose préalablement une hypothèse. Les limites et les biais des modèles doivent être discutés.

Rares sont les candidats qui cherchent à quantifier les phénomènes par des calculs simples qui s'appuient sur des lois physiques et chimiques. Les ordres de grandeur des vitesses, débits, durées, concentrations ... sont rarement présentés.

#### 6.5.4 Communication

Les candidats maîtrisent de mieux en mieux les différents moyens de communication parfois au détriment d'une bonne utilisation du tableau. L'occupation de celui-ci est souvent mal gérée et il serait bien de ne pas y trouver que le plan à la fin de la leçon.

Rares sont les leçons où le tableau se construit progressivement et à la fin desquelles le candidat présente un schéma de synthèse répondant au sujet ou, une représentation graphique des points forts de la leçon.

Tous les sujets ne se prêtent pas à un "schéma bilan" et il n'est donc pas nécessaire de vouloir à tout prix en réaliser un. Quand il peut être réalisé, ce schéma doit être construit au fur et à mesure de la leçon et présenter un aspect « fonctionnel » (relations de cause à effet, mécanismes de contrôle positif ou négatif). Un schéma qui consiste à écrire des mots clés reliés entre eux par des traits sans signification n'a strictement aucun intérêt et ne pallie pas le manque de connaissances approfondies sur le sujet. Il doit nécessairement présenter l'échelle à laquelle il s'applique (croûte, lithosphère...).

### 6.6. Liste des leçons d'option de la session 2025

#### LECONS OPTION SECTEUR A

Maîtrise de la reproduction dans l'espèce humaine  
La régulation nerveuse et hormonale de la pression artérielle  
Les liaisons faibles intra et intermoléculaires  
L'amélioration des plantes par l'homme  
Le rôle du néphron dans le contrôle de l'équilibre hydro-électrolytique  
Les mécanismes de la cancérogenèse  
Détection et conduction de l'information visuelle chez l'homme  
Les chaînes membranaires de transporteurs d'électrons  
Les oestrogènes  
Les modifications post-traductionnelles des protéines  
Paroi cellulaire et développement végétatif des Angiospermes  
La mise en place des axes de polarité chez les animaux  
Les enzymes du métabolisme énergétique (microbien)  
La glande thyroïde et ses hormones  
Microbiote et santé  
La mort cellulaire  
Qu'est-ce qu'un gène ?  
Les protéines de transport membranaire  
Les cellules souches  
Les hématies  
Les cellules du tissu nerveux  
Les synapses neuronales  
L'exploitation des bactéries et virus en biotechnologies

Enzymes et biotechnologies  
Les ARN non codants  
Les catécholamines  
Les cellules des crêtes neurales  
Protéines G et transduction du signal  
L'adressage des protéines dans la cellule animale  
Modifications physiologiques et régulations hormonales associées à la grossesse, à l'accouchement et à la lactation dans l'espèce humaine  
Le diabète insipide  
Homéostasie glucidique  
Dynamique du cytosquelette des cellules eucaryotes  
Les récepteurs sensoriels  
Formation des membres chez la drosophile et les Vertébrés

### **LECONS OPTION SECTEUR B**

Homéostasie et perturbations  
Les couleurs chez les animaux  
Les bourgeons chez les Angiospermes  
Dynamique et conservation d'un écosystème forestier  
La sélection sexuelle  
La coévolution  
Ecologie des récifs coralliens  
Les symbioses chez les végétaux  
Biologie de la conservation : principes et approches pour préserver la biodiversité  
Les systèmes à contre-courant  
Les constructions animales  
La dissémination chez les végétaux  
Les fonctions ovariennes chez les mammifères  
La vie en montagne  
Les ajustements physiologiques à l'effort chez l'être humain  
Les phylogénies, construction et utilisation  
Biologie et physiologie des végétaux des littoraux  
Les stomates  
Les sèves et leur circulation  
Parasitisme et mutualisme  
La vie dans la zone intertidale  
Les relations plantes-champignons  
Les agrosystèmes  
La circulation de l'eau dans la plante  
Les microbiotes  
Les photosynthèses de type C4 et CAM  
La feuille des Angiospermes et la fonction de nutrition  
L'autotrophie pour l'azote chez les angiospermes  
Les successions écologiques  
Les conséquences génétiques de la reproduction  
Edification de l'appareil végétatif des Angiospermes  
Unité et diversité des mollusques  
Le parasitisme et ses conséquences dans les communautés écologiques

Régulation neurophysiologique et hormonale de la pression artérielle  
L'adaptation dans le cadre de l'évolution  
Le groupe écologique des algues  
Equilibre hydrique et milieu de vie aérien chez les angiospermes  
Végétaux et variabilité du milieu aérien  
La biologie des fabacées  
La lumière chez les végétaux  
Vie ralentie des organismes en milieu tempéré  
Le passage de la mauvaise saison chez les végétaux en milieux tempérés  
Structures et fonctions de la racine chez les Angiospermes  
Comportements reproducteurs et systèmes d'appariement chez les vertébrés  
Polymorphisme et Traits d'histoire de vie  
Les peuplements pionniers  
Communication hormonale et nerveuse  
Les espèces exotiques envahissantes  
L'érosion de la biodiversité  
Biomes et aires biogéographiques  
Autofécondation et allofécondation  
Les interactions entre les champignons et les plantes  
Adaptation des angiospermes au milieu aquatique  
Mode de reproduction et diversification à différentes échelles  
Cycle biologique du carbone  
Les vaisseaux sanguins chez les mammifères  
Les milieux lenticules  
De l'induction florale à la fleur  
La recherche de nourriture chez les animaux  
Interrelation cœur-vaisseaux  
Les rôles du sang chez les mammifères  
La dynamique des populations et ses modèles

## LECONS OPTION SECTEUR C

Les minéraux en géoscience  
Les moussons  
Le magnétisme terrestre et ses apports aux géosciences  
les Grandes Provinces magmatiques  
Formation et différenciation des planètes telluriques  
Origine et évolution de la lignée humaine  
Durée et vitesses des processus géologiques  
L'importance de la géodynamique interne dans la genèse des ressources minières.  
Histoire géologique du Massif Central à partir de cartes géologiques et d'échantillons  
L'enregistrement sédimentaire des variations du niveau marin  
Données géologiques, chimiques et biologiques sur la vie Précambrienne  
Les déplacements de et dans la lithosphère  
Le cycle externe de l'eau : quantification des flux et des échanges  
L'importance de la géodynamique externe dans la genèse des ressources minières.  
La crise Messinienne  
Apports de la sismologie dans la structure et la dynamique interne de la Terre  
Géodynamique de la Méditerranée

Impacts de la géodynamique interne sur le climat  
L'échelle des temps géologiques: méthodes et limites  
Transfert de matière des continents vers les océans  
Les grandes lignes de la géologie de l'Europe  
Volcanisme et risques associés  
Évolution du relief des chaînes de montagne  
L'Humain et sa planète  
La chaîne varisque en France  
Reconstitutions des paléoenvironnements marins  
Aléas et risques sismiques  
La rhéologie : des roches à la lithosphère  
Métamorphisme et cycles orogéniques  
Cause(s) et conséquences de la crise Crétacé/Paléogène  
Les apports de la géochimie en géodynamique interne  
Reconstitution des paléoenvironnements continentaux  
Tectonique active et cycle sismique  
Le contrôle astronomique des climats durant le Quaternaire  
Les variations de la biodiversité au Phanérozoïque  
Les changements climatiques majeurs du Phanérozoïque  
La collision à partir des exemples des Alpes et de l'Himalaya-Tibet  
L'histoire de la France métropolitaine à partir de l'étude des bassins sédimentaires  
L'exhumation des roches métamorphiques  
Géomorphologie continentale et océanique  
Rôle des organismes sur la genèse des sédiments  
Les failles à toutes les échelles  
Chaîne alpine, chaîne pyrénéenne : une comparaison  
Le dynamisme des éruptions volcaniques  
Les ressources minérales et leurs processus de concentration  
Les minéraux marqueurs des processus internes  
Forme de la Terre et champ de pesanteur  
Les facteurs de contrôle de la sédimentation  
Fossiles et processus de fossilisation  
Les périodes glaciaires dans l'histoire de la Terre  
L'eau : une ressource du sous-sol en France  
La Terre, machines thermiques  
Océan Indien  
Comparaison géodynamique actuelle et géodynamique archéenne

## 6.7 Liste des leçons de contre-option de la session 2025

### LECONS CONTRE OPTION SECTEUR A

Le réflexe myotatique  
Les anticorps et leurs fonctions  
Les macromolécules  
Le contrôle de l'expression des gènes  
Les coenzymes d'oxydoréduction  
La plaque motrice

La communication nerveuse  
Les enzymes, des biocatalyseurs  
Relations génotype-phénotype  
La croissance de l'os long chez l'Homme et son contrôle  
Les inductions embryonnaires  
La différenciation cellulaire chez les végétaux  
Processus moléculaires et cellulaires de la fécondation et ses conséquences  
La contraction des muscles au niveau cellulaire et moléculaire  
La maladie de Parkinson  
Les cellules procaryotes  
Les mutations  
Le cytosquelette  
Le développement floral  
Les plantes transgéniques  
Les hormones peptidiques et leurs mécanismes d'action  
Les protéines membranaires  
La coopération cellulaire au cours de la réponse immunitaire  
Cancer et cycle cellulaire  
Cellules souches animales  
La gastrulation  
La membrane plasmique et les ions  
Relation structure / fonction des protéines  
Les cellules musculaires  
Le glucose dans les cellules végétales  
Les potentiels membranaires

## LECONS CONTRE OPTION SECTEUR B

Structure et dynamique des écosystèmes forestiers  
Biologie des orchidées  
La lumière et les végétaux  
Le polymorphisme  
La vie végétale en milieux secs  
Respirer dans l'eau  
La fleur des Angiospermes  
Les forces évolutives  
Les relations à bénéfices réciproques chez les êtres vivants  
Les animaux et la température  
Les conséquences génétiques de la reproduction  
Classer les êtres vivants  
La vie dans la zone intertidale  
Les êtres vivants et le cycle biogéochimique de l'azote  
Les réserves chez les végétaux  
La feuilles des Spermaphytes  
La croissance des Angiospermes  
Le sol: un écosystème  
Impacts humains sur la biodiversité, aux différentes échelles  
Respiration et milieux de vie  
Les successions écologiques

Le coeur des mammifères  
Autofécondation et allofécondation chez les Angiospermes  
Les cycles de développement des Embryophytes  
Les relations interspécifiques  
Un écosystème au choix du candidat  
Les interactions entre les insectes et les plantes  
La domestication

## LECONS CONTRE OPTION SECTEUR C

Les risques géologiques : prévision et prévention  
Les métamorphismes liés au cycle alpin en France  
Apports de la géochimie à notre compréhension des processus magmatiques  
La circulation océanique  
Le cycle externe de l'eau  
Géologie de l'Océan Atlantique  
Les roches métamorphiques : marqueurs géodynamiques  
Les nappes d'eau souterraines : ressources en eau, sources d'énergie  
La France au Cénozoïque  
Influence de la lithologie et du climat sur l'évolution des reliefs continentaux  
La mesure du temps en géologie  
Radiations adaptatives, extinctions et changements environnementaux  
La cinématique des plaques à différentes échelles de temps  
Les météorites  
La formation des granites  
Les grandes lignes de l'histoire géologique des Alpes à partir de cartes géologiques au choix du candidat  
Reconstitution des climats anciens  
Énergie solaire et bilan énergétique de la Terre  
La France au Quaternaire  
Le Bassin d'Aquitaine  
Les grands cycles orogéniques à partir de la Carte géologique de France au millionième  
La structure et la dynamique interne des planètes telluriques  
Le noyau terrestre  
La Terre au Précambrien  
Croûte océanique et croûte continentale  
La sédimentation en domaine océanique  
Géochronologie : enjeux, méthodes, limites  
Sédimentation et ressources énergétiques  
Le cycle du carbone  
La formation des roches par les organismes vivants  
Le manteau terrestre  
Le champ magnétique terrestre  
L'orogénèse hercynienne à partir de la carte géologique de la France au millionième  
La reconstitution des chemins Pression - Température des roches métamorphiques  
Transferts de matières du continent à l'océan  
Les ophiolites  
Origine et évolution de la lignée humaine  
Etude de processus géologiques (au moins deux) au choix du candidat à partir d'échantillons  
la circulation thermo-haline  
Les microfossiles : outils pour le géologue  
le couplage océan atmosphère à travers un exemple au choix du/de la candidat.e

La ville de Clermont-Ferrand dans son cadre géologique  
Le bilan radiatif de la Terre et son évolution au cours du 21ème siècle  
Origine et genèse des granites  
Les variations du niveau marin à différentes échelle de temps  
la Réunion à partir de cartes géologiques de son choix  
Le modèle PREM : origine et application  
Reliefs de la Terre  
La géologie de la Corse à partir de cartes géologiques au choix du candidat  
Radiochronologie : principes et application  
Comparasion des géodynamiques actuelle et archéenne  
Les dorsales océaniques  
Les grandes crises de la biodiversité  
Expérimentation et modélisation en géosciences  
La différenciation de la Terre  
Les grandes lignes de l'histoire géologique du Jura à partir de cartes géologiques au choix du candidat  
Géodynamique interne et climat  
De l'ouverture océanique à la naissance d'une chaîne de montagne  
La bassin de Paris à partir de la carte géologique au millionième  
Les géochronomètres  
L'apport des données satellitaires en Sciences de la Terre  
Désagrégation mécanique et altération chimique en domaine continental  
L'apport des ondes sismiques  
Diversité des dynamismes éruptifs  
La sismicité de la France dans son cadre géodynamique  
Les magmas dans leur contexte géodynamique  
Les grands cycles orogéniques à partir de la carte géologique de France au millionième  
La chaine varisque en France  
Les marges passives  
Les marqueurs de la collision continentale  
Les grands ensembles géologiques de France à partir de la carte au millionième  
La Terre dans le systeme solaire  
Enregistrement sédimentaire d'un cycle de Wilson  
Données géologiques, chimiques et biologiques sur les origines de la Vie  
Les conquêtes des continents par les organismes  
Une méthode géophysique au choix du candidat  
Le paléomagnétisme : outil de la géodynamique  
Les structures décrochantes à différentes échelles  
Les ressources énergétiques du sous-sol  
La sédimentation continentale  
La connaissance de l'intérieur de la Terre  
Les apports de la (bio)géochimie des fossiles  
L'atmosphère terrestre  
Sources et transferts de chaleur dans le système Terre  
Le magmatisme des chaînes de montagnes  
Géoïde et champ de pesanteur de la Terre  
Les bassins sédimentaires observés sur la carte géologique de France au millionième dans leur cadre géodynamique  
Les contextes métamorphiques à partir de cartes au choix du candidat  
Les grands ensembles géologiques de l'Europe  
Vitesse des processus géologiques  
Dynamique des reliefs et influences sur les variations climatiques  
Déformations de la lithosphère : de l'échelle microscopique à l'échelle de la plaque  
Un cycle biogéochimique au choix du candidat

Les grandes lignes de la géologie des Pyrénées à partir de cartes géologiques au choix du candidat

La tectonique active

La diagenèse

Séismes et ondes sismiques

L'arc des Petites Antilles

L'échelle des temps géologiques