

Concours du second degré – Rapport de jury

Session 2008

AGRÉGATION

Externe

SCIENCES DE LA VIE – SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

**Rapport de jury présenté par André SCHAAF
Président de jury**

Les rapports des jurys des concours sont établis sous la responsabilité des présidents de jury

• 1. Présentation	page 3
• 2. Statistiques	page 15
• 3. Réglementation	page 39
• 4. Les écrits	page 87
• 5. Les travaux pratiques	page 179
• 6. Les oraux	page 363
• 7. conclusions	page 383

1. PRÉSENTATION DU CONCOURS

1.1 Le Jury

1.2 L'organisation du concours

1.3 Le déroulement du concours 2008

1.1 - LE JURY

Liste des membres du Jury (arrêté du 9 janvier 2008)

M. André SCHAAF	Professeur des Universités de classe exceptionnelle / Académie de Strasbourg / Président
M. Gérard BONHOURE	Inspecteur général de l'Education nationale / Vice -Président
Mme Bénédicte RULIER	Professeur de chaire supérieure / Académie de Paris / Vice-présidente
M. Bernard AUGERE	Professeur de chaire supérieure / Académie de Toulouse.
M. Michèle BEAUDRY	Professeur des Universités 2 ^{ème} classe / Académie de Paris
M. Karim BENZERARA	Chargé de recherche au CNRS / Académie de Paris
M. Laurent BOPP	Chargé de recherche au CNRS / Académie de Versailles
M. François CARIOU	Professeur de chaire supérieure / Académie de Clermont Ferrand
M. Pierre CHAREYRON	Maître de Conférences / Académie de Lyon
Mme Marie CHARPIN	Maître de Conférences / Académie de Clermont Ferrand
M. Marc CORIO	Maître de conférences des Universités / Académie de Bordeaux
M. Michel CORSINI	Maître de conférences des Universités / Académie de Nice
M. Thierry DARRIBERE	Professeur des Universités 1 ^{ère} classe / Académie de Paris
M. Patrick DE WEVER	Professeur des Universités de classe exceptionnelle / Académie de Paris
M. Dominique DUNON	Professeur des Universités 1 ^{ère} classe / Académie de Paris
Mme Claude FARISON	Professeur agrégée de classe normale / Académie de Lyon
Mme Muriel GARGAUD	Chargée de recherche au CNRS / Académie de Bordeaux
M. François GAUER	Professeur des Universités 1 ^{ère} classe / Académie de Strasbourg
M. Sylvain GLEMIN	Maître de conférences des Universités / Académie de Montpellier
M. Stephane GUELLEC	Professeur agrégé de classe normale / Académie de Versailles
M. Pascal GUILLOTTE	Professeur agrégé de classe normale / Académie de Caen
Mme. Françoise HERDENBERGER	Maître de Conférences des Universités / Académie de Reims
M. Philippe HUGUENEY	Maître de Conférences ENS Lyon / Académie de Lyon

Mme Sylvie HURTREZ-BOUSSES	Maître de Conférences des Universités / Académie de Montpellier
M. Christian JAY-ALLEMAND	Professeur des Universités 2 ^{ème} classe / Académie de Montpellier
M. Johan KRAUSS	Professeur agrégé de classe normale / Académie de Nancy
M. Jean Marc LARDEAUX	Professeur des Universités 1 ^{ère} classe / Académie de Nice
M. Philippe LESUR	Professeur de chaire supérieure / Académie de Paris
M. Nicolas MATHEVON	Professeur des Universités 2 ^{ème} classe / Académie de Lyon
M. Jean-François MAUFFREY	Maître de Conférences des Universités / Académie d'Aix - Marseille
M Bernard MERCIER DE LEPINAY	Chargé de recherche au CNRS / Académie de Nice
M Gilles MERZERAUD	Maître de Conférences des Universités / Académie de Montpellier
Mme Anne-Hélène MONTSORO-BURQ	Maître de Conférences des Universités / Académie de Paris
Mme Cécile NOIRET	Professeur agrégé de classe normale / Académie de Reims
Mme. Carole PETIT	Maître de Conférences des Universités / Académie de Paris
Mme Laurence POITOU	Professeur agrégé de classe normale / Académie de Rennes
M. Jean- Alain POULIZAC	Professeur agrégé de classe normale / Académie de Rennes
Mme Chrystèle SANLOUP	Maître de Conférences des Universités / Académie de Paris
Mme Véronique THOR	Professeur de chaire supérieure / Académie de Paris
M. Hervé TOSTIVINT	Professeur agrégé de classe normale / Académie de Rouen
Mme Nathalie TOURON	Professeur agrégé de classe normale/ Académie de Rennes
M. Frédéric TULLY	Maître de Conférences / Académie de Paris
Mme Muriel UMBHAUER	Professeur des Universités 2 ^{ème} classe / Académie de Paris
M. Catherine VARLET- COEFFIER	Professeur de chaire supérieure/ Académie de Caen

Participation aux épreuves et/ou auteurs du rapport

Épreuves écrites :

Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur A

Augere Bernard, **Beaudry** Michèle, **Chareyron** Pierre, **Darribère** Thierry, **Dunon** Dominique, **Hedenberger** Françoise, **Hugueney** Philippe, **Jay-Allemand** Christian, **Montsoro-Burq** Anne-Hélène, **Noiret** Cécile, **Poitou** Laurence, **Poulizac** Jean-Alain, **Rullier** Bénédicte, **Tostivint** Hervé, **Umbhauer** Muriel.

Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur B

Bonhoure Gérard , **Cariou** François, **Charpin** Marie, **Corio** Marc, **Gauer** François, **Glemin** Sylvain, **Guillotte** Pascal, **Hurtrez** Sylvie, **Krauss** Johan, **Mathevon** Nicolas, **Mauffrey** Jean-François, **Thor** Véronique, **Tully** Frédéric, **Varlet-Coeffier** Catherine .

Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur C.

Benzerara Karim, **Bopp** Laurent, **Corsini** Michel, **De Wever** Patrick, **Farison** Claude, **Gargaud** Muriel, **Guellec** Stéphane, **Lardeaux** Jean-Marc, **Lesur** Philippe , **Mercier de Lepinay** Bernard, **Merzeraud** Gilles, **Petit** Carole , **Sanloup** Chrystèle, **Schaaf** André, **Touron** Nathalie.

Épreuves orales:

Secteur A : biologie et physiologie cellulaires, biologie moléculaire; leur intégration au niveau des organismes.

Augere Bernard, **Beaudry** Michèle, **Chareyron** Pierre, **Darribère** Thierry, **Dunon** Dominique, **Hugueney** Philippe, **Jay-Allemand** Christian, **Monsoro-Burq** Anne-Hélène, **Poulizac** Jean-Alain, **Rullier** Bénédicte, **Umbhauer** Muriel.

Secteur B : biologie et physiologie des organismes et biologie des populations en rapport avec le milieu de vie.

Bonhoure Gérard , **Cariou** François, **Charpin** Marie, **Gauer** François, **Glémin** Sylvain, **Hurtrez** Sylvie, **Mathevon** Nicolas, **Thor** Véronique, **Tully** Frédéric.

Secteur C : sciences de la Terre et de l'Univers, interactions entre la biosphère et la planète Terre.

Benzerara Karim, **Bopp** Laurent, **Corsini** Michel, **De Wever** Patrick, **Gargaud** Muriel, **Guellec** Stéphane, **Lardeaux** Jean-Marc, **Lesur** Philippe , **Merzeraud** Gilles , **Sanloup** Chrystèle, **Schaaf** André.

Commentaire d'ensemble et réalisation du rapport :

Schaaf André, Bonhoure Gérard et Rullier Bénédicte..

1.2 ORGANISATION ET MODALITES 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. Trois secteurs (A, B ou C) sont ouverts au choix des candidats (voir le détail des programme en 3-1,3-2 et 3-3) :

Les modalités d'organisation du concours découlent de l'**arrêté du 15 juillet 1999 modifiant l'arrêté du 12 septembre 1988 modifié fixant les modalités des concours de l'agrégation NOR : MENP9901240A**, publié au [J.O. N° 175 du 31 Juillet 1999 page 11467.](#)

Art. 3. - Les dispositions relatives à la section Sciences de la Vie et de la Terre figurant à l'annexe I de l'arrêté du 12 septembre 1988 susvisé sont remplacées par les dispositions ci-après :

Section Sciences de la Vie - Sciences de la Terre et de l'Univers. Les modalités spécifiques du concours 2007 découlent de l'arrêté publié dans le JO N°153 du 3 juillet 2004.

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

- 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.

À chaque secteur A, B ou C correspond un programme de connaissances générales portant sur des connaissances d'un niveau allant jusqu'à la licence universitaire et un programme de spécialité portant sur des connaissances du niveau de la maîtrise universitaire.

Un programme annexe aux programmes de connaissances générales porte sur des questions scientifiques d'actualité sur lesquelles peuvent être interrogés les candidats lors de la quatrième épreuve d'admission.

A. 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).

B. - Epreuves d'admission.

1° Épreuve de travaux pratiques portant, au choix du candidat lors de l'inscription, sur le programme de l'un des secteurs A, B ou C (durée : six heures maximum ; 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 maximum ; 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.

Le sujet est tiré au sort par le candidat (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 ou sur le programme annexe de questions scientifiques d'actualité.

Le sujet est tiré au sort par le candidat. Il porte :

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

La présentation orale et pratique est suivie d'un entretien avec le jury ; l'entretien peut comporter des questions portant sur les connaissances générales et les questions scientifiques d'actualité de l'ensemble des secteurs (durée de la préparation : quatre heures ; durée de l'épreuve : une heure et dix minutes maximum [présentation orale et pratique : quarante minutes maximum ; entretien : trente minutes maximum] ; coefficient 4).

Ces modalités sont résumées dans le tableau 1

	Durée	Coefficients	Nombre de points
1. Épreuves écrites d'admissibilité			
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
Total des épreuves écrites			120
2. Épreuves d'admission			
2.1 Épreuves de travaux pratiques			
2.1.1 Épreuve d'option (secteur A, B ou C suivant le choix du candidat)	6h	3	60
2.1.2 Épreuve de contre-option (portant sur le programme général des deux autres secteurs)	4h	2	40
Total des épreuves pratiques			100
2.2 Épreuve orales			
2.2.1 Épreuve d'option (secteur A, B ou C suivant le choix du candidat)	4h + 50 min.+ 30 min.	5	100
2.2.2 Épreuve de contre-option (portant sur le programme général des deux autres secteurs) et/ou sur le programme annexe de questions scientifiques d'actualité	4h + 40 min.+ 30 min	4	80
Total des épreuves orales			180
Total général		20	400

Tableau 1. Les modalités du concours

1.3 LE DEROULEMENT DU CONCOURS 2008

1.3.1 Le calendrier.

Admissibilité : Épreuves écrites

- Mardi 15 avril 2008 : Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur A
- Mercredi 16 avril 2008 : Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur B
- Jeudi 17 avril 2008 : Épreuve portant sur le programme de connaissances générales du secteur C

Les résultats de l'admissibilité ont été publiés le mardi 27 mai 2008.

Admission : Épreuves pratiques

- vendredi 13 juin 2008 : réception des candidats et tirage au sort des sujets d'oral.
- samedi 15 juin 2008 : travaux pratiques portant sur le programme de spécialité (secteur A, ou B, ou C)
- dimanche 16 juin 2008 : travaux pratiques portant sur le programme général des deux autres secteurs.

Admission : Épreuves orales

- Du samedi 21 juin au dimanche 6 juillet 2008.

Les résultats de l'admission ont été publiés le lundi 7 juillet 2007.

1.3.2 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 DPE (Mme Guidon, Mme Virginie Trois Poux et Mme Claudine Raquin). Les problèmes financiers et matériels du concours ont été résolus grâce au soutien du Service Inter-Académique des Examens et Concours (Mr.Kesler, Mr Vergnaud, Mme Engelbrecht, Mme Domingues).

Les épreuves pratiques se sont déroulées au Département de Biologie de l'Université Pierre et Marie Curie (UPMC, Bâtiment Atrium, 4 place Jussieu 75005 Paris) pour les candidats des secteurs A, (UMPC quai St Bernard 75005 Paris) pour les candidats du secteur 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 et du quai St Bernard grâce à l'obligeance de Monsieur Porcheron (directeur de la formation initiale), de Monsieur Grard (Intendant), de Monsieur Six (Maîtres de conférences en Biologie), de Monsieur Rulle et Monsieur Naquin (Sécurité/Accès), de Madame Garnier (réservation des salles). Il en fut de même au Lycée Saint-Louis grâce au soutien de Madame Cahn-Rabaté (Proviseure de l'établissement), de Monsieur Reynaud (CASU), de Madame Peyroche (Adjoint d'Intendance). Ces épreuves ont pu être réalisées grâce au concours de la Professeure Martine Maïbèche (Responsable des salles de TP de biologie au quai St Bernard). Il est important de souligner que les candidats ont pu disposer pendant les épreuves pratiques du concours de calculatrices électroniques fournies gracieusement par la Société Texas Instrument grâce à l'obligeance de Madame Monange (Responsable du Service Education). Le bon déroulement de ces épreuves a aussi été rendu possible grâce à l'aide précieuse de personnes étrangères au concours proprement dit, en particulier Monsieur Palaz (Aumonier du lycée Saint Louis). Les microscopes polarisants ont été aimablement prêtés par les établissements Sordalab (Sylvain Morel, Directeur ; Jean Marie Moreau et Pierrick Maury, consultants régionaux) ainsi que par le lycée Newton de Clichy (Proviseure : Mme Jallat , Responsable de laboratoire : M. Legac).

Les épreuves orales se sont déroulées au Lycée Saint Louis (44 boulevard Saint Michel 75006 PARIS) grâce à l'accueil de Madame Cahn-Rabaté, Proviseure de l'établissement et au précieux concours de Monsieur Guipont, Proviseur adjoint, de Monsieur Reynaud, CASU, de Madame Peyroche, Adjoint d'Intendance, et de Madame Mallet, Agent chef. Une aide en matériel video a été apportée par Monsieur Lodier, responsable du laboratoire de Physique-Sciences industrielles. Le bon fonctionnement des épreuves orales a été permis grâce à l'aide de personnels techniques de loge et d'entretien : Mme Liotti Lucienne, Mme Mallet Micheline, Mme Tarlet Micheline, M. Lefebvre André, M. Mallet Patrick. Par ailleurs, un nombre très important d'ouvrages a été généreusement offert par quelques maisons d'édition et sociétés : Dunod, Vuibert, et la SGF/BRGM. Le lycée Louis Le Grand (Responsable de laboratoire : Mme Claire Petot), le lycée Henri IV (Responsable de laboratoire : M. Éric Périlleux) et le lycée Arago (Madame le Proviseur Mme Ruben) ont prêté du matériel audiovisuel

pour l'équipement des salles utilisées par les candidats pendant leurs épreuves orales. Les équipements EXAO ont été fournis par les établissements Jeulin©.

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 :

- pour les travaux pratiques, 6 personnels du Département d'enseignement de Biologie de l'Université Pierre et Marie Curie (75005 Paris) :

BARBERA Corinne : Adjoint Technique de Laboratoire (AJTL)

DAHMANE Mustapha : Technicien de Laboratoire (TL)

GERVI Isabelle : Assistant ingénieur (AI)

HORTAULT Gil : Adjoint Technique de Laboratoire (ADJT)

REKAB Tahar : Agent Technique de Laboratoire (AGTL)

VAZ Adao Domingos: Agent Technique de Laboratoire (AGTL)

et une technicienne de l'Université Paris Descartes :

DONZES Evelyne : Technicienne Recherche Formation (TRFCN)

- pour les travaux pratiques et les épreuves orales, 17 personnels de laboratoires travaillant dans le secteur des Sciences de la vie et de la Terre de différents lycées, placés sous la responsabilité de Madame **JANVIER** Claudette (Technicienne de Laboratoire de classe exceptionnelle au lycée St-Louis):

BEAUDOUIN Nadège : Aide Technique de Laboratoire (Lycée Jean-Paul Vernant - Sèvres)

BOYER Rémy : Assistant Ingénieur (Université Paris 8 - Saint Denis)

CADOS Chantal : Aide Technique de Laboratoire (Lycée Janson de Sailly - Paris)

CHAREYRE Sophie : Technicienne de Laboratoire (ENCPB - Paris)

DAHMANE Djamila : Aide Technique de Laboratoire (Lycée Saint Louis - Paris)

DAVION Jérôme : Technicien de Laboratoire (Lycée Janson de Sailly - Paris)

DRANE Michèle, Aide Technique de Laboratoire (Lycée Jean Rostand – Villepinte)

DUFOUR Marie-Odile: Technicienne de Laboratoire de classe supérieure (Lycée Hoche - Versailles)

EDOUARD Maria : Aide de Laboratoire (Lycée Arago - Paris)

JOVIC Margarita : Aide Technique Principal de Laboratoire (Lycée d'Arsonval - St Maur des Fossés)

LANGLOIS Bremcoumar : Aide de laboratoire (Lycée Lavoisier - Paris)

MORIM Isabel : Aide de Laboratoire (Lycée Paul Bert - Paris)

PALEZIS Corine : Aide Technique de Laboratoire (Lycée Lamartine - Paris)

SINDE Monique : Technicienne de Laboratoire (Lycée Louis le Grand - Paris)

SOUËIX Yves : Technicien de Laboratoire (Lycée C. Bernard - PARIS).

TREBEAU Armande : Aide Technique de Laboratoire (Lycée Saint Louis - Paris)

VERNAY Nicole : Technicienne de Laboratoire de classe supérieure (Lycée Chaptal - Paris).

Cette équipe a fait preuve de compétence, 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 trois sites (Lycée St-Louis et UPMC Atrium et UMPC quai St Bernard), en particulier le samedi 16 juin 2007 de 2 séances d'épreuves pratiques consécutives, d'une durée de 6 heures chacune. De plus, elle a assuré dans un délai court (21-22 Juin) la préparation des salles, des collections, de la bibliothèque et du matériel informatique nécessaires à l'oral sur le site du Lycée Saint-Louis.

Les épreuves pratiques et orales du concours ont été approvisionnées en matériel végétal grâce au service des cultures du Muséum d'Histoire Naturelle (Madame BERAUD, Directrice du département et Monsieur JOLY) et à la participation active de :

BALLOT Laurent : Technicien Jardinier (Muséum d'Histoire Naturelle - Paris)

DOUINEAU Alain : Technicien Jardinier (Muséum d'Histoire Naturelle - Paris)

Une partie du matériel (algues unicellulaires,...) a été fournie par Mr YEPREMIAN, Département de cryptogamie du Museum d'histoire naturelle. Le secrétariat du concours a été assuré par Mademoiselle Cécile JOUBERT (Étudiante en Licence de géologie).

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 bienveillants 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. Statistiques du concours et commentaires de la présidence

2.1 Statistiques générales du concours 2008

2.2 Évolution du nombre de postes mis au concours et des inscriptions depuis 1993

2.3 Analyse des résultats et commentaires généraux

2.4 Bilan de l'admission

2.1 Statistiques générales du concours 2008

2.1.1 Des inscriptions aux admissions

	secteur A		secteur B		secteur C		TOTAL
	nombre	% du total	nombre	% du total	nombre	% du total	
candidats inscrits	707	30,7%	1076	46,8%	517	22,5%	2300
candidats présents	346	27,9%	614	49,4%	280	22,7%	1240
candidats admissibles	68	31,3%	96	44,2%	53	24,4%	217
candidats admis	34	39,1	34	39,1%	19	21,8%	87

Tableau 1 – Des inscriptions aux admissions – concours 2008

La totalité des postes mis au concours (87) a été pourvue.

Comme les années précédentes, les harmonisations (en particulier sur les épreuves écrites) ont visé à respecter les règles de l'équité sans chercher à obtenir une répartition exactement proportionnelle à celle des candidats présents de chaque secteur. À l'inverse de 2007, les candidats du secteur B réussissent un peu moins bien. Le secteur A reprend la tête comme en 2005 et 2006. Pour la première fois depuis la nouvelle formule de l'agrégation, la proportion d'admissibles du secteur C est supérieure à celle des présents.

	Secteur A	Secteur B	Secteur C
Total du 1 ^{er} candidat admissible /120	74,90	77,06	78,72
Barre d'admissibilité	40,5	40,5	40,5
Total du premier candidat admis / 400	255,67	270,61	265,53
Barre d'admission			175,9

Tableau 2 – Totaux des premiers classés et barres

2.1.2 - Répartition par sexe

	femmes			hommes			total		
	présentes	admissibles	% adm/ présents	présents	admissibles	% adm/ présents	présents	admissibles	% adm/ présents
secteur A	454	52	11,5%	253	16	6,3%	707	68	9,6%
secteur B	729	61	8,4%	347	35	10,1%	1076	96	8,9%
secteur C	313	32	10,2%	204	21	10,3%	517	53	10,3%
TOTAL	1496	145	9,7%	804	72	9,0%	2300	217	9,4%

Tableau 3 a – Répartition des admissibilités par sexe

	Ratio F/H présents	ratio F/H admissibilités
secteur A	1,8	3,3
secteur B	2,1	1,7
secteur C	1,5	1,5
TOTAL	1,9	2,0

Tableau 3 b – Ratios F/H à l'admissibilité

sexe	secteur A	secteur B	secteur C	total
F	25	19	10	54
M	9	15	9	33
	34	34	19	87
ratio F/H	3,6	1,3	1,1	1,7

Tableau 3 c – Ratios F/H à l'admission

Contrairement aux années précédentes, le ration homme/femme est globalement conservé à l'admissibilité, comme à l'admission malgré une grande hétérogénéité entre les secteurs, le A s'avérant cette année particulièrement féminisé.

2.1.3 - Répartition des candidats en fonction de l'âge

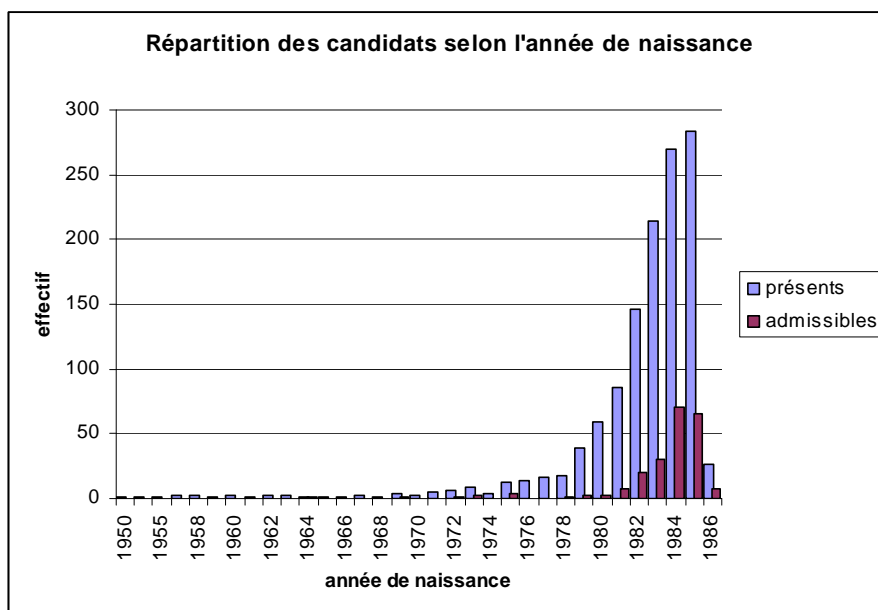


Figure 1a – Répartition en fonction de l'âge à l'admissibilité

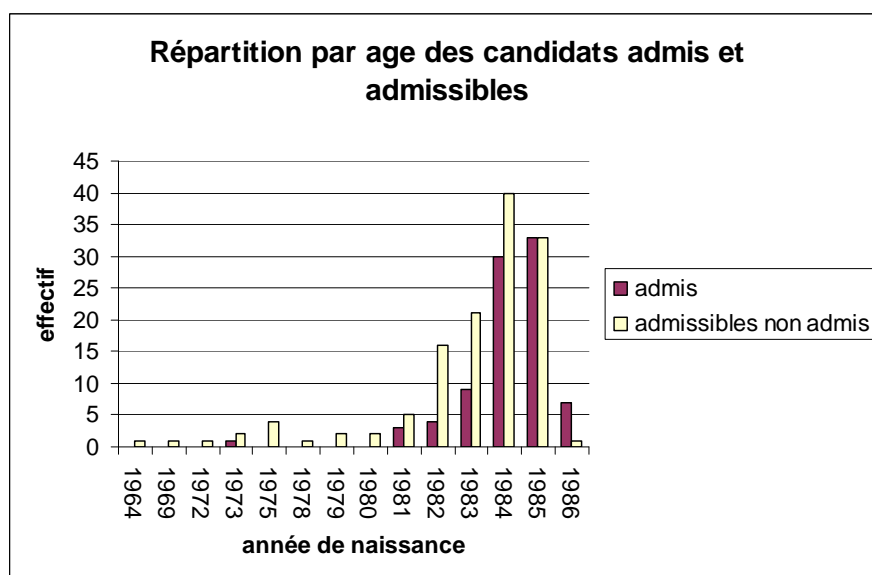


Figure 1b – Répartition en fonction de l'âge à l'admission

L'âge moyen reste très proche de celui de 2007, avec une moyenne d'environ 26 ans pour les candidats présents mais surtout un peu moins de 25 pour les admissibles, et jusqu'à 23,7 ans pour les admis.

2.1.3 – Analyse des résultats par profession

PROFESSIONS	Présents	Admissibles	% des admissibles
ADJOINT D'ENSEIGNEMENT	1		
ASSISTANT D'EDUCATION	54	3	1,4%
CADRES SECT PRIVE CONV COLLECT	1	1	0,5%
CERTIFIE	149	20	9,2%
CONTRACT ENSEIGNANT SUPERIEUR	1		
CONTRACTUEL 2ND DEGRE	15		
ELEVE D'UNE ENS	29	23	10,6%
ELEVE.IUFM.DE 1ERE ANNEE	570	46	21,2%
ENSEIG NON TIT ETAB SCOL.ETR	1		
ETUDIANT HORS IUFM	258	113	52,1%
FONCT STAGIAIRE FONCT PUBLIQUE	1		
FORMATEURS DANS SECTEUR PRIVE	5		
MAIT.OU DOCUMENT.AGREE REM TIT	1		
MAITRE AUXILIAIRE	11		
MAITRE D'INTERNAT	2		
PERS ENSEIG TIT FONCT PUBLIQUE	6		
PERS FONCTION PUBLIQUE	2	1	0,5%
PLP	4		
PROFESSEUR ECOLES	1	1	0,5%
PROFESSIONS LIBERALES	1		
SALARIES SECTEUR INDUSTRIEL	1		
SALARIES SECTEUR TERTIAIRE	2		
SANS EMPLOI	31	1	0,5%
STAGIAIRE IUFM 2E DEGRE COL/LY	60	8	3,7%
STAGIAIRE SITUATION 2E DEGRE	8		
SURVEILLANT D'EXTERNAT	4		
VACATAIRE DU 2ND DEGRE	21		
Total	1240	217	100,0%

Tableau 4 - Répartition par origine professionnelle trié par ordre décroissant des présents

PROFESSION	admis	admissibles	% d'admis
ASSISTANT D'EDUCATION	0	3	0%
CERTIFIE	4	20	20%
ELEVE D'UNE ENS	19	23	83%
ELEVE.IUFM.DE 1ERE ANNEE	14	46	30%
ETUDIANT HORS IUFM	48	113	42%
SANS EMPLOI	0	1	0%
STAGIAIRE IUFM 2E DEGRE COL/LY	2	8	25%
PERS FONCTION PUBLIQUE	0	1	0%
CADRES SECT PRIVE CONV COLLECT	0	1	0%
PROFESSEUR ECOLES	0	1	0%
Total	87	217	

Tableau 5 – Répartition des admis par profession

Les répartitions par professions et par âges sont bien évidemment étroitement corrélées : 84 % des admissibles sont étudiants en IUFM, hors IUFM ou normaliens. La tendance s'accroît avec l'admission ce qui traduit l'importance de la préparation à l'oral à laquelle les candidats « étudiants hors IUFM » et les élèves d'ENS consacrent leur année. Parmi les 20 professeurs certifiés admissibles sur les 149 qui se sont présentés, 15 ont au plus 28 ans. Si l'on y ajoute les 3,7% de stagiaires IUFM en année de PLC2, on voit bien que, pour ces 96 % des admissibles, la proximité immédiate des études universitaires a constitué un facteur déterminant.

Avec seulement quatre admis, il semble logique de conseiller aux professeurs en exercice de s'orienter sur le concours interne de l'agrégation dont les modalités correspondent à l'évolution de leurs compétences professionnelles tout en restant scientifiquement exigeant. Enfin, les deux tiers des professeurs certifiés inscrits ne se présentent pas aux épreuves (66 % d'absents contre 45 % pour la totalité des inscrits). Cela laisse songeur. Le record est pulvérisé par la Corse (71%), avec 7 inscrits et 7 absents... dont 5 sont enseignants (4 certifiés et un contractuels) qui ont vraisemblablement profité de ces trois jours bénis pour prendre le maquis.

2.1.4 - Répartition des résultats par académie

Académie	inscrits	présents	admissibles	% admissibles/présents
AIX-MARSEILLE	98	32	11	34,38%
AMIENS	63	18	1	5,56%
BESANCON	38	19	3	15,79%
BORDEAUX	90	48	18	37,50%
CAEN	46	25		0,00%
CLERMONT-FERRAND	48	30	3	10,00%
CORSE	7			
CRETEIL-PARIS-VERSAIL.	444	188	58	30,85%
DIJON	39	22	1	4,55%
GRENOBLE	98	49	11	22,45%
GUADELOUPE	19	10		0,00%
GUYANE	9	5		0,00%
LA REUNION	60	27		0,00%
LILLE	156	75	4	5,33%
LIMOGES	14	3		0,00%
LYON	179	79	42	53,16%
MARTINIQUE	10	3		0,00%
MONTPELLIER	99	46	11	23,91%
NANCY-METZ	79	38	6	15,79%
NANTES	64	22	5	22,73%
NICE	65	20	2	10,00%
ORLEANS-TOURS	60	12	3	25,00%
POITIERS	43	19		0,00%
POLYNESIE FRANCAISE	14	9		0,00%
REIMS	44	23	2	8,70%
RENNES	148	89	10	11,24%
ROUEN	68	22	5	22,73%
STRASBOURG	86	38	16	42,11%
TOULOUSE	112	52	5	9,62%
Total	2300	1023	217	

Tableau 6 - Résultats des admissibilités par académie

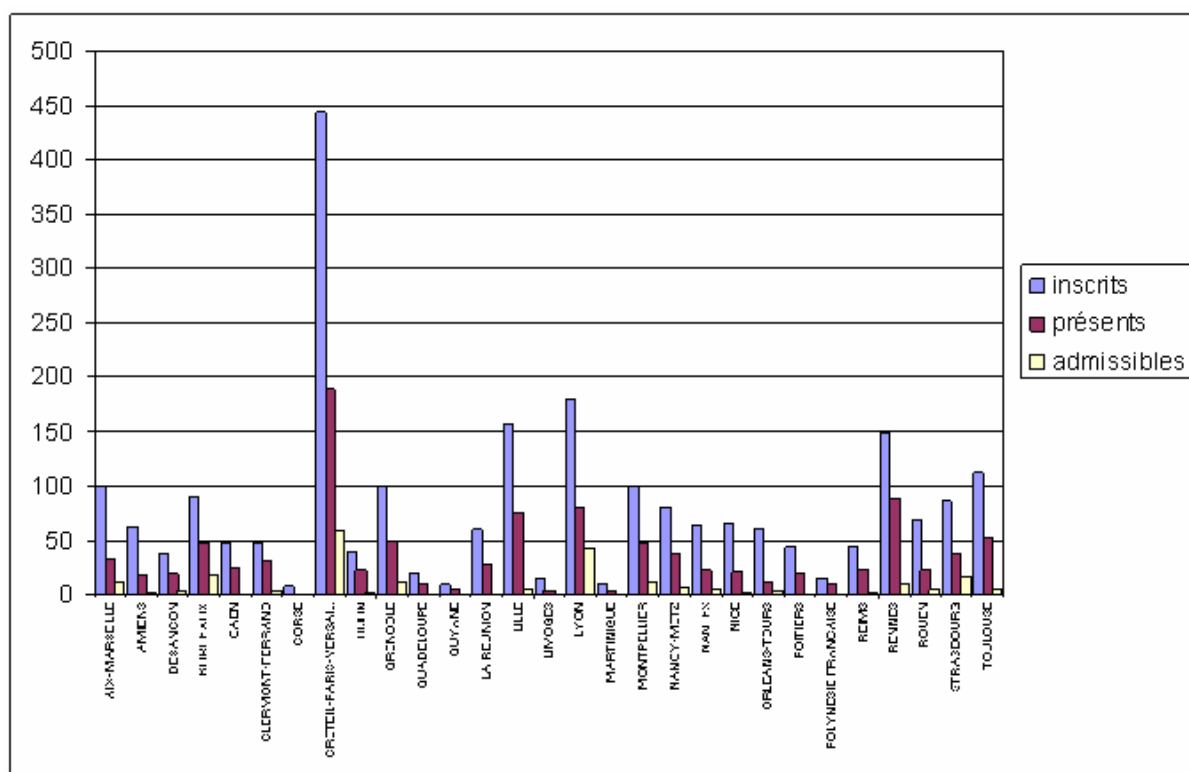


Figure 2 - Répartition globale des candidats par académie (inscrits – présents – admissibles)

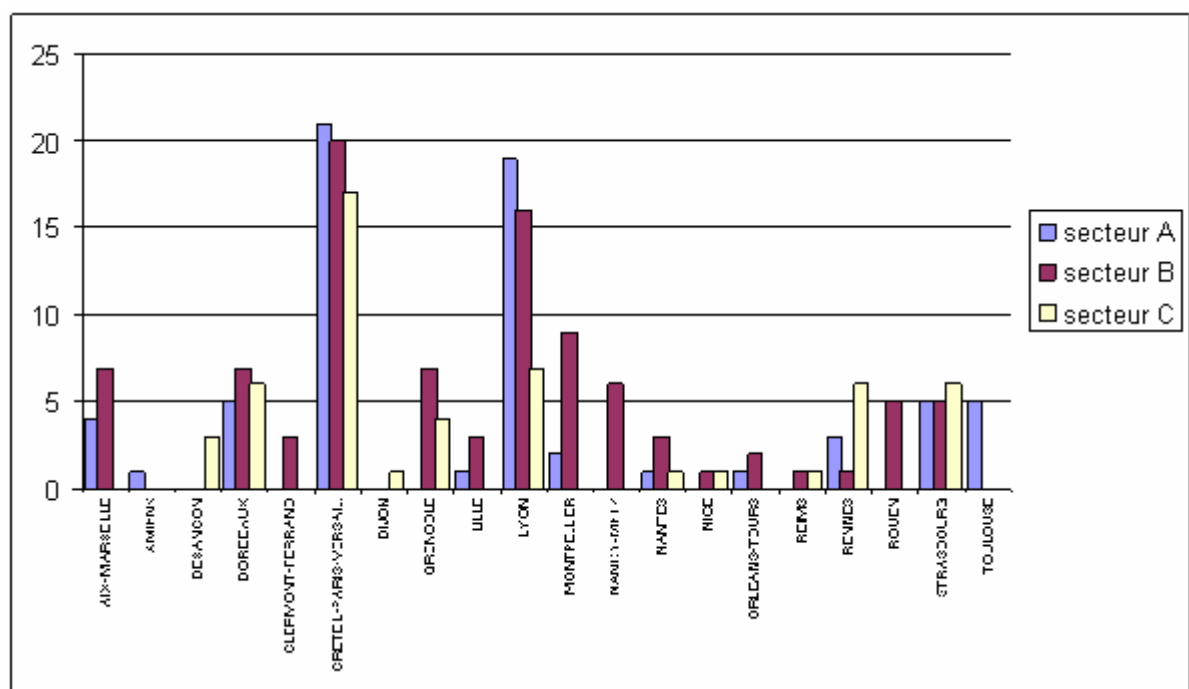


Figure 3 - Répartition des candidats admissibles par académie et par secteur d'inscription (% par rapport aux présents)

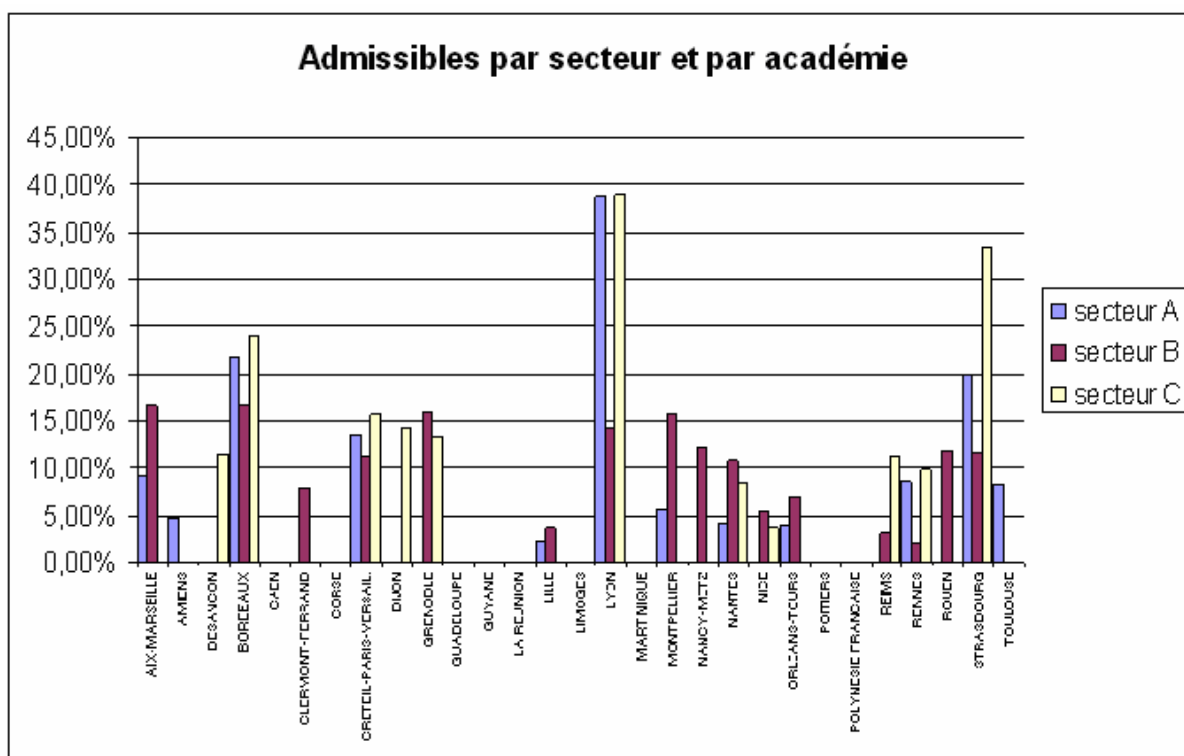


Figure 3 - Répartition des candidats admissibles par académie et par secteur
(% par rapport aux présents)

académie	secteur A	secteur B	secteur C	TOTAL
AIX-MARSEILLE	3	1	0	4
AMIENS	1	0	0	1
BESANCON	0	0	2	2
BORDEAUX	2	1	1	4
CLERMONT-FERRAND	0	3	0	3
CRETEIL-PARIS-VERSAIL.	12	9	5	26
GRENOBLE	0	1	1	2
LILLE	0	1	0	1
LYON	10	4	5	19
MONTPELLIER	0	3	0	3
NANCY-METZ	0	2	0	2
ORLEANS-TOURS	0	2	0	2
RENNES	2	0	2	4
ROUEN	0	3	0	3
STRASBOURG	2	3	3	8
TOULOUSE	2	0	0	2
NICE	0	1	0	1

Tableau 7 - Répartition des admis par académie

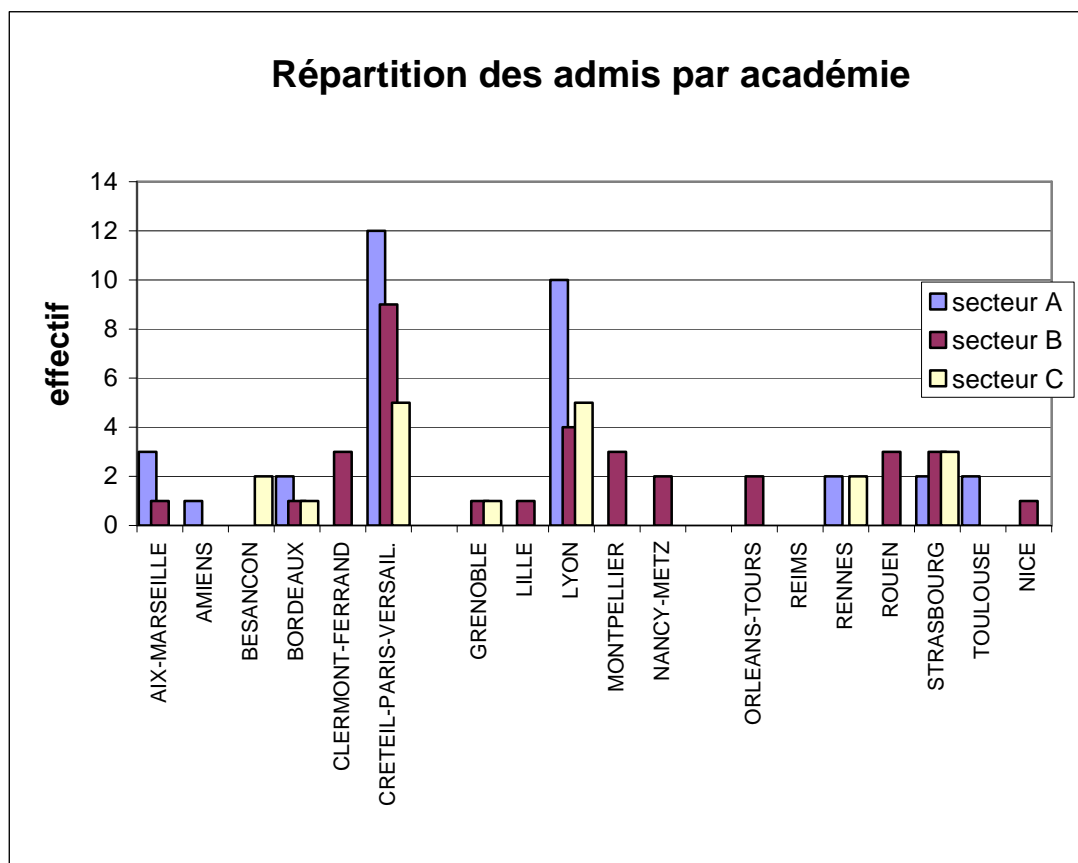


Figure 4 – Répartition des admis par académie

Plusieurs académies accusent une forte baisse des résultats entre l'admissibilité et l'admission. Force est de constater que les centres qui préparent des étudiants dans les trois secteurs remportent les succès les plus nets. Dans ce concours qui, tout en tenant compte des spécialités, recrute des professeurs de haut niveau en sciences de la vie ET en sciences de la Terre, l'homogénéité de la formation constitue certainement un atout déterminant.

2.2 Évolution des inscriptions et des postes mis au concours depuis 1993

2.2.1 Évolution globale

Année	Nombre de postes mis au concours	Nombre d'inscrits	Présents	Admissibles	Admis	Liste complémentaire
1993	154	1439	819	233	148	
1994	154	1581	950	241	154	
1995	154	1770	1034	242	142	
1996	154	2041	1252	245	154	
1997	130	2273	1473	245	130	
1998	150	2416	1413	240	150	
1999	155	2477	1491	257	155	
2000	160	2678	1749	278	160	
2001	165	2924	1828	276	165	
2002	177	2521	1537	346	177	6
2003	198	2440	1553	378	198	
2004	160	2793	1733	334	160	
2005	160	2921	1827	334	160	
2006	105	3075	1707	257	105	
2007	105	2704	1489	259	105	
2008	87	2300	1420	217	87	



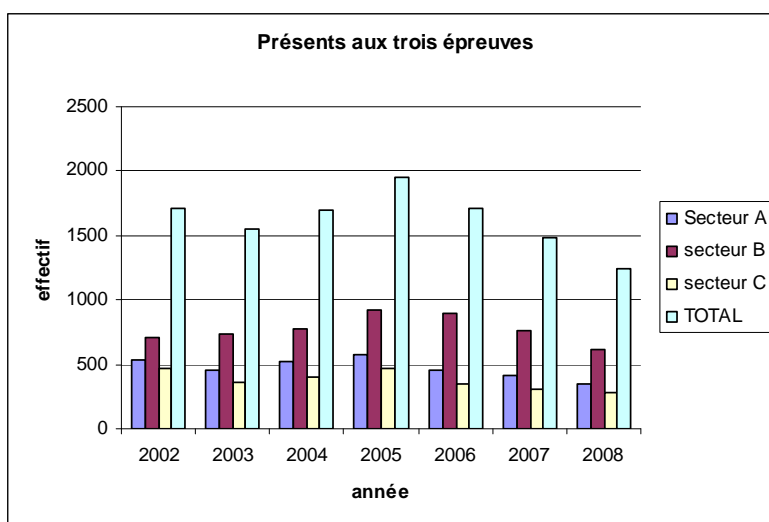
Figure 5 – Évolution des effectifs du concours depuis 1993

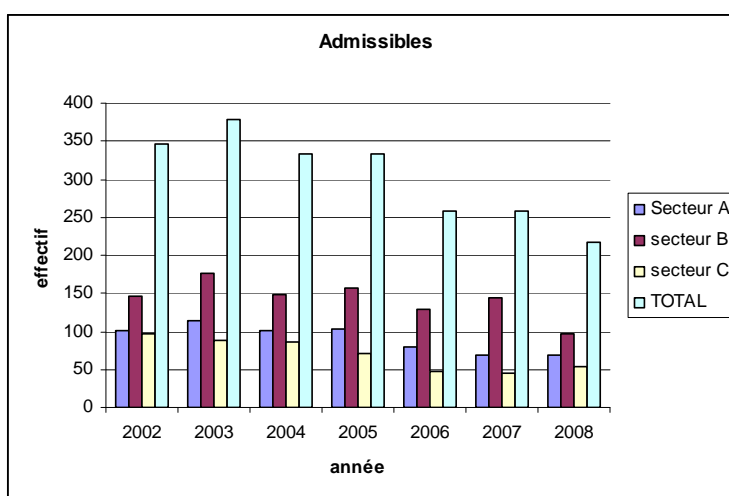
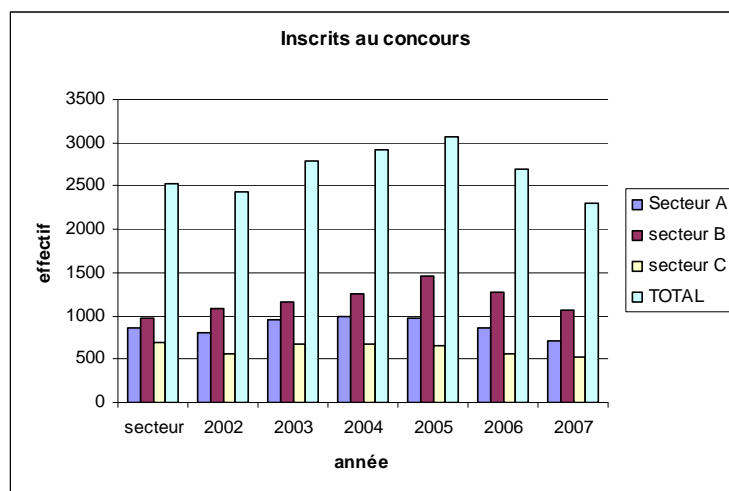
2.2.2 – Évolution par secteur

Année	secteur	INSCRITS				PRESENTS				ADMISSIBLES			
		A	B	C	TOTAL	A	B	C	TOTAL	A	B	C	TOTAL
2002	nombre	857	972	692	2521	531	712	464	1707	102	147	97	346
	%	34,00%	38,60%	27,40%		31,10%	41,70%	27,20%		29,50%	42,50%	28,00%	
2003	nombre	805	1079	556	2440	455	735	363	1553	113	177	88	378
	%	33,00%	44,20%	22,80%		29,30%	47,30%	23,40%		29,90%	46,80%	23,30%	
2004	nombre	955	1164	674	2793	517	774	405	1696	101	148	85	334
	%	34,20%	41,70%	24,10%		30,50%	45,60%	23,90%		30,20%	44,30%	25,40%	
2005	nombre	991	1261	669	2921	570	916	466	1952	104	158	72	334
	%	33,90%	43,20%	22,90%		29,20%	46,90%	23,90%		31,10%	47,30%	21,60%	
2006	nombre	964	1462	649	3075	461	898	348	1707	80	130	47	257
	%	31,30%	47,50%	21,10%		27,00%	52,60%	20,40%		31,10%	50,60%	18,30%	
2007	nombre	865	1280	559	2704	418	760	311	1489	69	144	46	259
	%	32,00%	47,30%	20,70%		28,10%	51,00%	20,90%		26,60%	55,60%	17,80%	
2008	nombre	707	1076	517	2300	346	614	280	1240	68	96	53	217
	%	30,70%	46,80%	22,50%		27,90%	49,40%	22,70%		31,30%	44,20%	24,40%	

Tableau 9 – Évolution de la répartition des inscriptions par secteur

La diminution du nombre d'inscrits se poursuit, probablement accentuée par la baisse du nombre de postes mis aux concours. Le taux d'abandon reste constant à 46 % environ. La proportion des candidats des différents secteurs apparaît finalement relativement stationnaire et il serait certainement hasardeux de tirer des conclusions des quelques oscillations observées.





2.3 Statistiques sur les épreuves écrites

2.3.1 Résultats généraux par épreuve

	Note totale / 60	écrit A	écrit B	écrit C
moyenne	26,88	4,59	4,50	4,35
médiane	24,17	4,00	4,27	3,51
écartype	14,81	2,82	2,47	3,32
3ème quartile	35,33	6,21	6,00	6,08
1er quartile	15,77	2,48	2,69	1,92
maximum	78,72	15,02	13,92	17,87
minimum	1,22	0,09	0,07	0,07

Tableau 9 - Statistiques sur les résultats des épreuves écrites – candidats présents

	Note totale / 60	écrit A	écrit B	écrit C
moyenne	51,84	8,64	7,69	9,59
médiane	50,00	8,48	7,40	9,38
écartype	8,68	2,46	2,22	2,88
3ème quartile	57,74	10,43	8,92	11,50
1er quartile	45,06	6,88	6,14	7,53
maximum	78,72	15,02	13,92	17,87
minimum	40,54	2,58	2,44	3,12

Tableau 10 - Statistiques sur les résultats des épreuves écrites – candidats admissibles

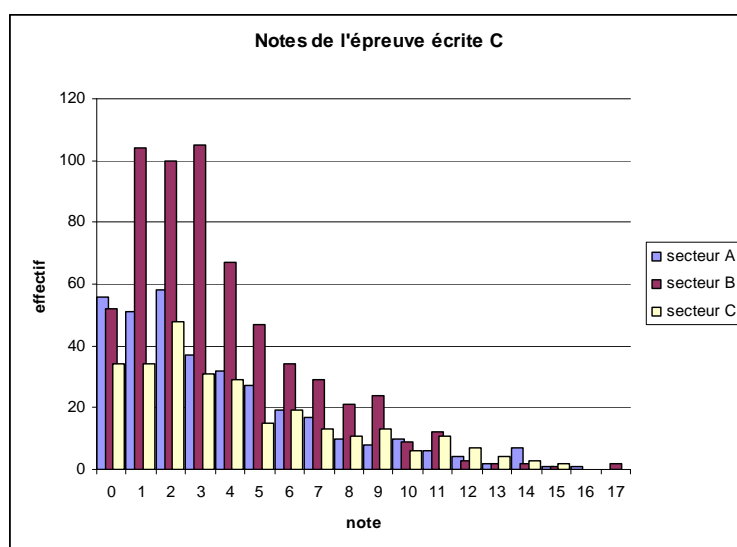
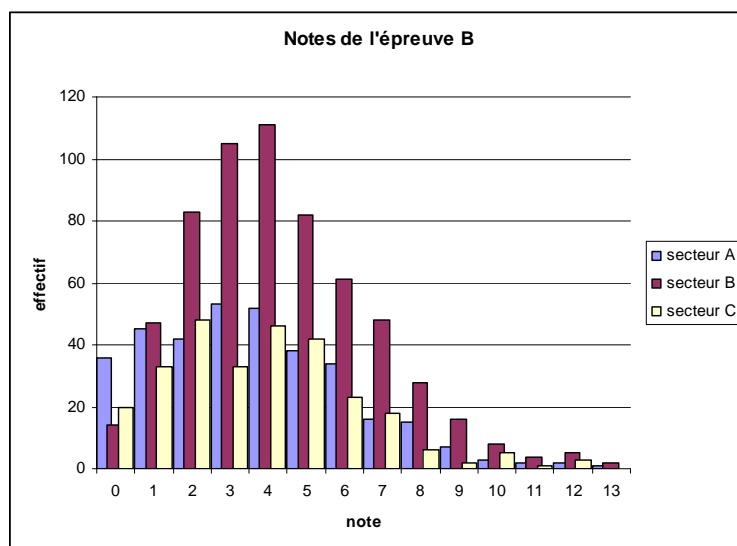
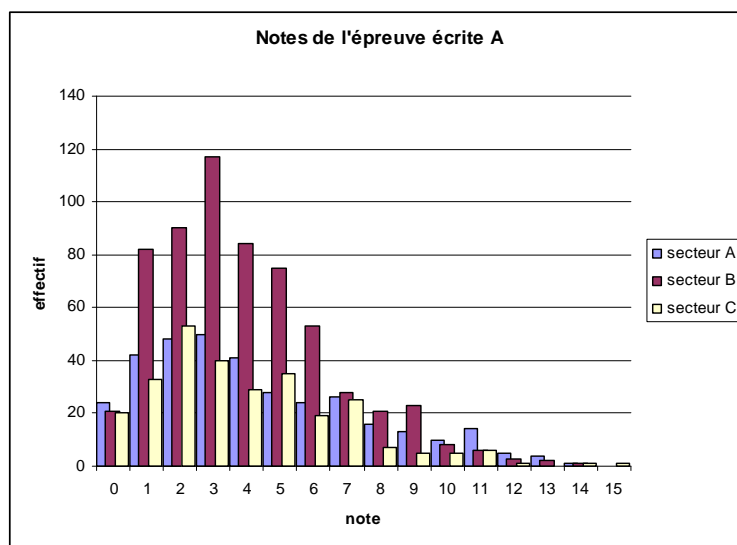


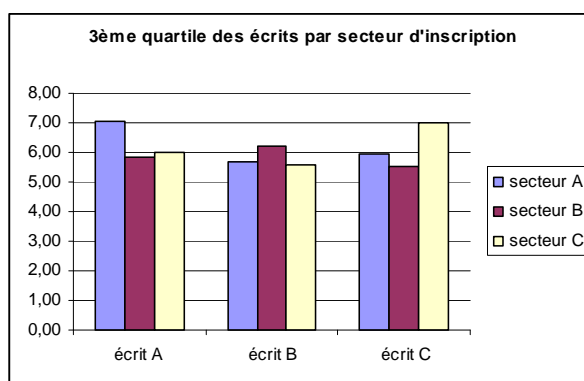
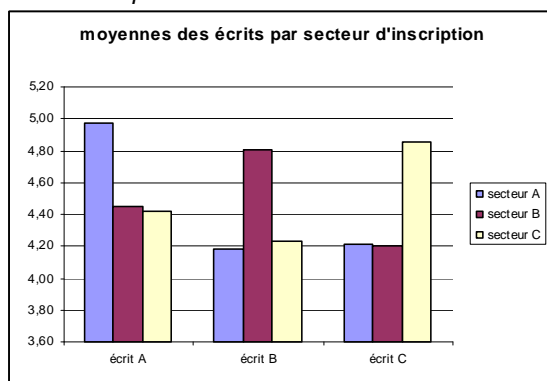
Figure 7 – Répartition des notes des épreuves

2.3.2 Résultats d'écrit par secteur des candidats

candidats du...	secteur A			secteur B			secteur C		
	écrit A	écrit B	écrit C	écrit A	écrit B	écrit C	écrit A	écrit B	écrit C
moyenne	4,98	4,18	4,22	4,45	4,81	4,20	4,42	4,23	4,85
médiane	4,32	3,94	3,19	3,98	4,49	3,51	3,82	4,07	3,86
écartype	3,24	2,57	3,51	2,55	2,40	2,99	2,79	2,42	3,71
3ème quartile	7,06	5,67	5,94	5,84	6,19	5,52	6,02	5,57	7,01

Tableau 11 - analyse statistique des épreuves écrites par secteur

Pour chaque épreuve écrite, chaque ligne contient les données statistiques correspondant aux candidats du secteur indiqué.



	candidats du secteur		
	A	B	C
moyenne			
écrit A	4,98	4,45	4,42
écrit B	4,18	4,81	4,23
écrit C	4,22	4,20	4,85
médiane			
écrit A	4,32	3,98	3,82
écrit B	3,94	4,49	4,07
écrit C	3,19	3,51	3,86
écartype			
écrit A	3,24	2,55	2,79
écrit B	2,57	2,40	2,42
écrit C	3,51	2,99	3,71
3ème quartile			
écrit A	7,06	5,84	6,02
écrit B	5,67	6,19	5,57
écrit C	5,94	5,52	7,01

20 premiers	écrit A	écrit B	écrit C
A	10	11	10
B	6	5	5
C	4	5	5

Figure 8 – Tableau 12 et 13'

Résultats des épreuves écrites et secteur d'inscription

Pour chaque épreuve, la moyenne des candidats relevant de la spécialité apparaît significativement supérieure d'environ 0,6 points à la moyenne générale, bien que chaque sujet ait incontestablement porté sur le programme commun. Cet avantage ressort aussi en particulier pour les meilleurs candidats avec un troisième quartile de plus d'un point supérieur pour les écrits A et C.

Parmi les 20 premiers de chaque écrit, figure une dizaine de candidats du secteur A. C'est donc la moitié des candidats de A qui prennent la tête, toutes conditions étant égales par ailleurs, lors de cette première étape du concours. Cette répartition se vérifie d'ailleurs à peu près jusqu'à la quatre-vingtième place d'admissibilité (38 candidats de A sur 80 !).

On se doit de relier ce résultat à celui de l'admission définitive, pour lesquels obtenir un peu moins de 40 % de candidats admis ne semble pas incohérent.

2.4 Statistiques portant sur les épreuves de travaux pratiques

2.4.1 Statistiques portant sur les épreuves de travaux pratiques de spécialité

TP de spécialité			
	TP A	TP B	TP C
moyenne	9,01	9,06	9,09
médiane	9,06	9,01	9,01
écartype	2,33	2,16	1,83
3 ^{ème} quartile	10,61	10,51	10,40
note maxi	13,28	14,62	14,28
note mini	4,06	3,54	5,44

Tableau 13 - Statistiques portant sur les épreuves de travaux pratiques de spécialité

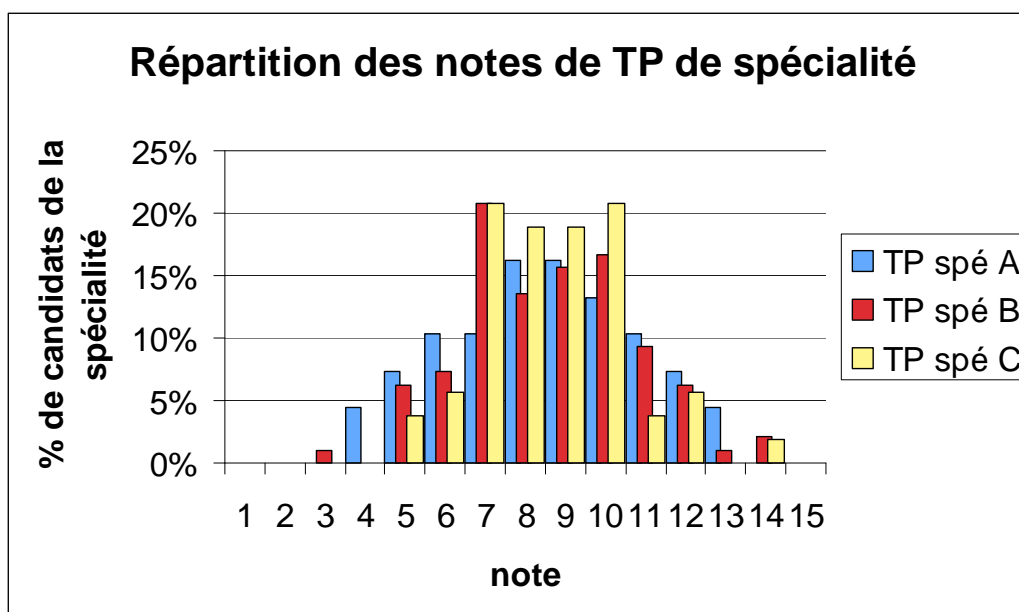


Figure 9 - Répartition des notes des épreuves de travaux pratiques de spécialité

2.4.2 – Statistiques des épreuves de travaux pratiques de contre-option

notes des épreuves de TP de contre-option			
	TP contr. a	TP contr. a	TP contr. c
moyenne	7,54	7,63	7,41
médiane	7,25	7,80	7,25
écartype	1,90	1,82	1,82
3 ^{ème} quartile	8,75	8,80	8,56
note maxi	13,25	11,60	13,25
note mini	3,50	3,20	3,50

Tableau 14 - Statistiques portant sur les épreuves de travaux pratiques de contre-option

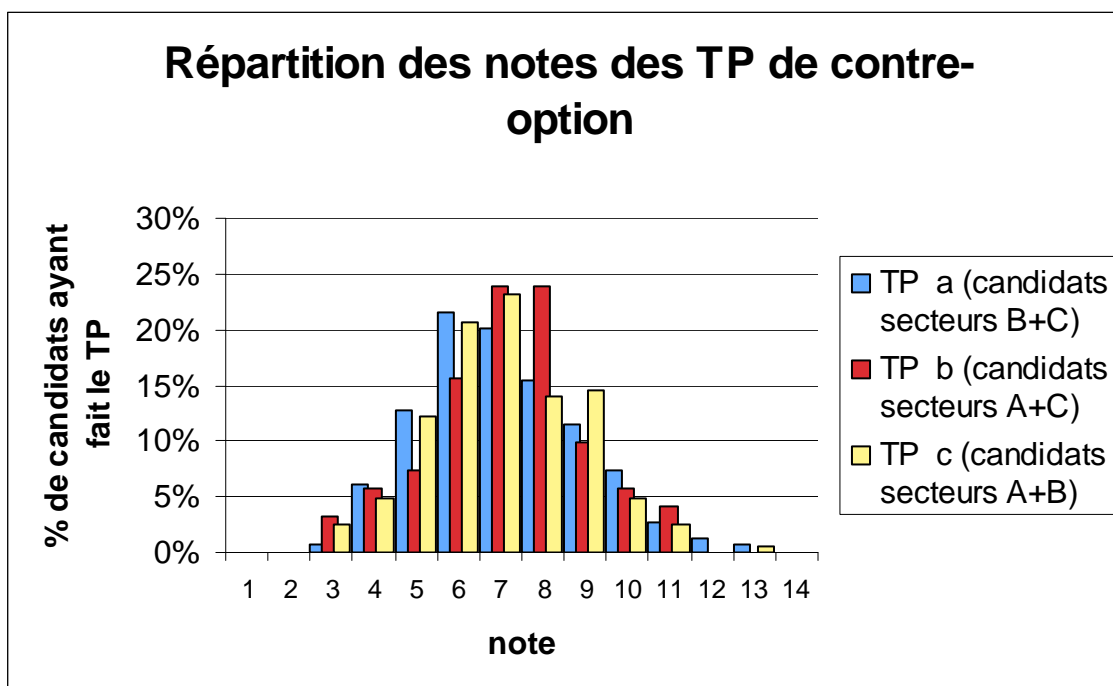


Figure 10 - Répartition des notes des épreuves de travaux pratiques de contre-option

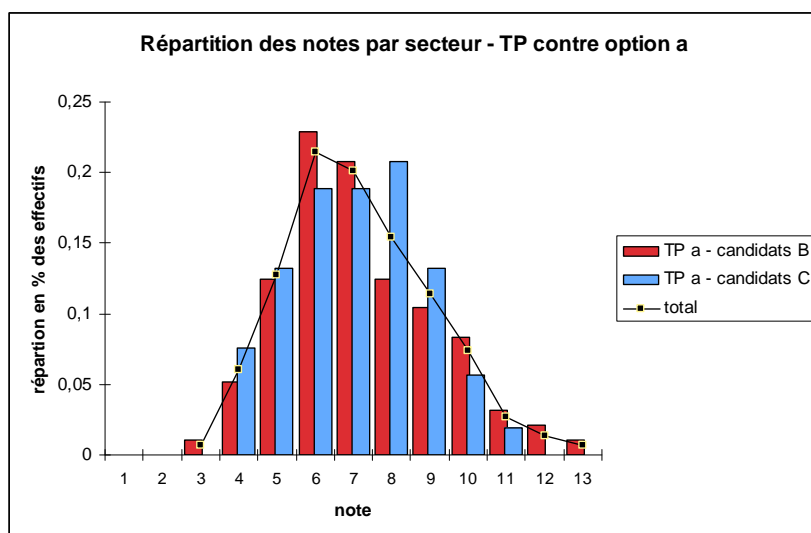


Figure 11 - Répartition des notes de l'épreuve de travaux pratiques de contre-option a

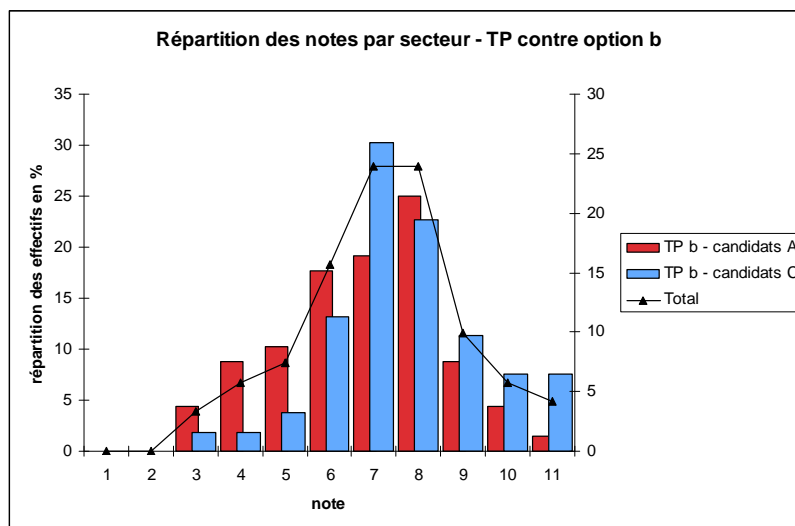


Figure 12 - Répartition des notes de l'épreuve de travaux pratiques de contre-option b

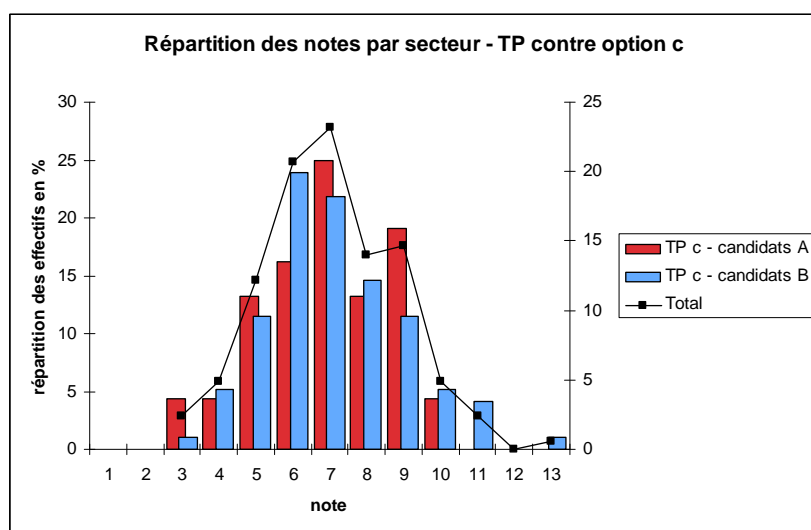
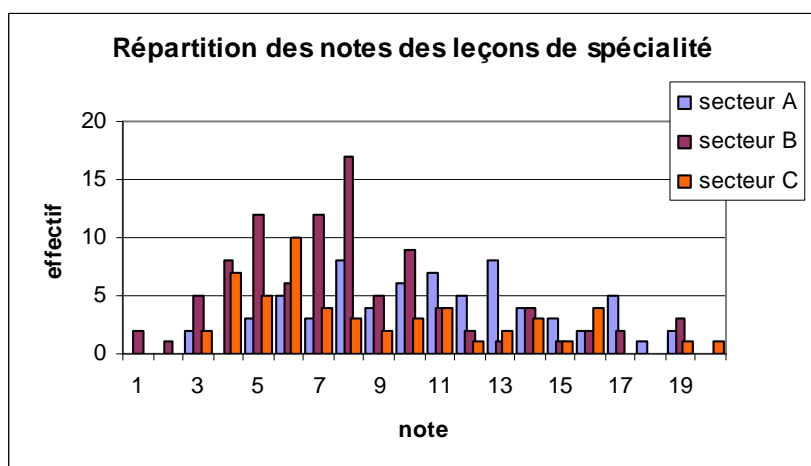
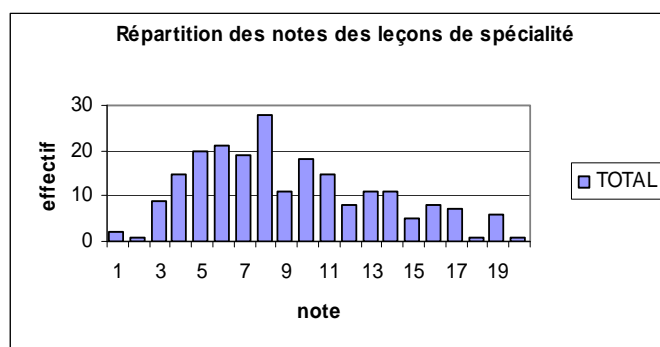


Figure 13 - Répartition des notes de l'épreuve de travaux pratiques de contre-option c

2-5 Statistiques sur les épreuves orales d'admission

	spécialité	contre-option
moyenne	8,45	8,38
médiane	7,50	8,00
écartype	4,22	4,06
1er quartile	5,25	5,25
3ème quartile	11,00	10,50
note maxi	19,50	20,00
note mini	0,00	0,75

Tableau 15 - Statistiques portant sur les épreuves orales



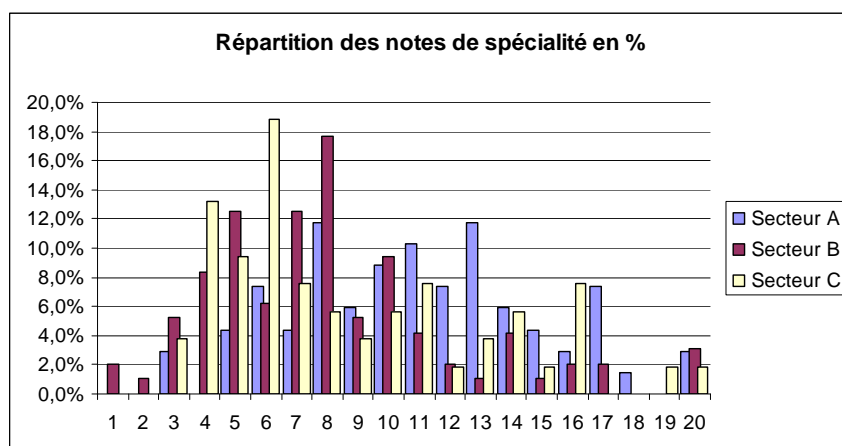
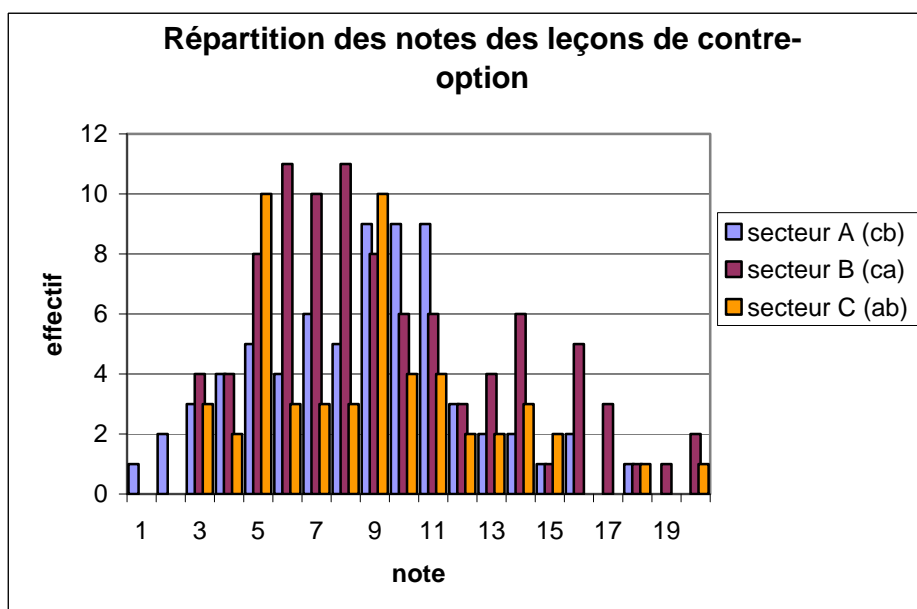
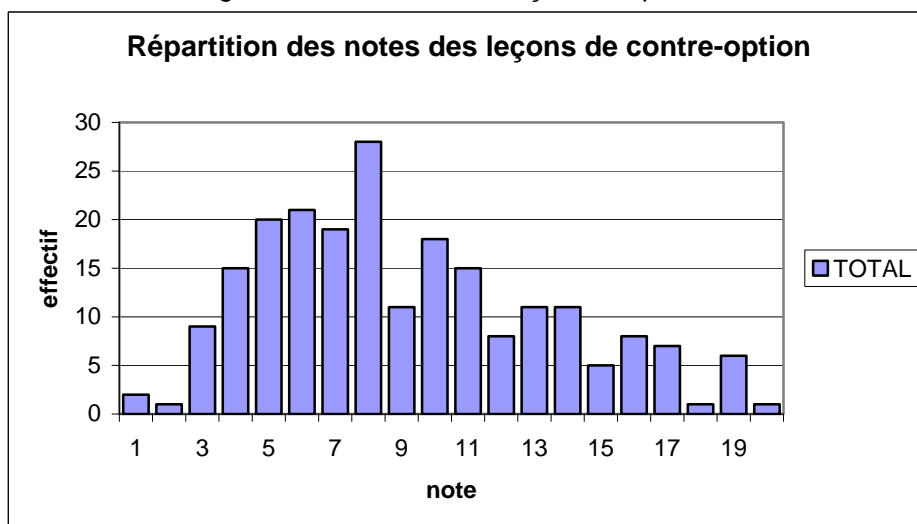


Figure 14 – Résultats des leçons de spécialité



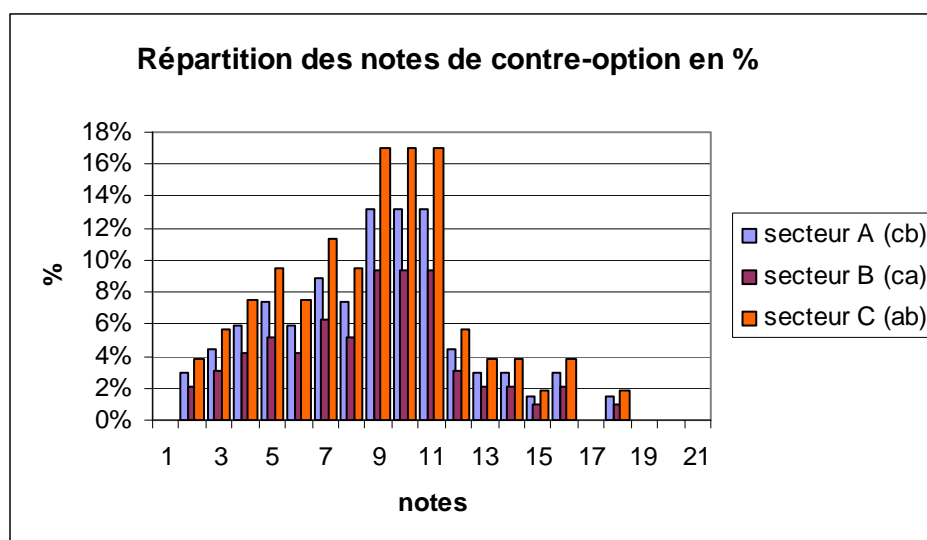


Figure 15 – Résultats des leçons de contre-option

Les leçons « ab » sont passées par les candidats du secteur C, les leçons « ac » et « bc » respectivement par les candidats des secteurs B et A.

3. REGLEMENTATION ET ORGANISATION PRATIQUE

3.1 Textes officiels

3.2 Programme concours 2008

3.3 Modalités et objectifs des épreuves pratiques

3.4 Modalités, objectifs et grilles d'évaluation des épreuves orales

3.5 Programme concours 2009

3.6. Matériels et ouvrages mis à la disposition des candidats pour les épreuves orales

3.1 TEXTES OFFICIELS

Les modalités relatives à la section Sciences de la vie – Sciences de la Terre et de l'univers de l'agrégation externe sont définies par l'arrêté du 15 juillet 1999 (J.O. n° 175 du 31 juillet 1999, page 11467). Les modalités spécifiques du concours 2008 découlent de l'arrêté publié dans le BO n° 3 du 17 mai 2007.

3.2 PROGRAMME CONCOURS 2008

Le programme ci-après concerne les épreuves d'admissibilité et d'admission de la section sciences de la vie - sciences de la Terre et de l'univers dont les modalités sont définies par l'arrêté du 23 juin 2004 (paru dans le JO du 3 juillet 2004) modifiant l'arrêté du 12 septembre 1988 modifié.

Le programme de l'agrégation des sciences de la vie - sciences de la Terre et de l'univers (SV - STU) est rédigé en considérant les trois secteurs du champ disciplinaire :

- **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.

Ce programme est aussi structuré en niveaux :

- **le programme de spécialité**, qui définit le secteur porte sur des connaissances du niveau de la maîtrise universitaire (M1), et concerne les 1^{ère} et 3^{ème} épreuves d'admission ;
- **le programme de connaissances générales** qui porte sur des connaissances d'un niveau allant jusqu'à la licence universitaire (L3), concerne l'ensemble des épreuves d'admissibilité et d'admission ;
- **le programme annexe de questions d'actualité** sur lequel peut porter l'entretien qui suit l'exposé de la 4^{ème} épreuve d'admission.
-

Le programme de chaque spécialité est renouvelable par tiers chaque année. Ce renouvellement annuel est susceptible d'entraîner des modifications du contenu du programme de connaissances générales. Le programme annexe portant sur des questions scientifiques d'actualité est renouvelé chaque année. Le programme de connaissances générales de chaque secteur fait partie du programme de spécialité du secteur. En conséquence, il apparaît en premier dans le texte qui suit. 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 toutes être 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 en connaissant ceux qui sont explicitement indiqués.

3.3 MODALITES ET OBJECTIFS DES EPREUVES PRATIQUES

Les épreuves pratiques (non publiques) se déroulent sur deux jours, en général à la mi-juin. Le jour précédant les travaux pratiques proprement dits, les candidats sont accueillis sur le lieu des épreuves, sont informés des modalités de déroulement des épreuves d'admission du concours et effectuent le tirage au sort de l'enveloppe contenant les deux sujets des épreuves orales. Pour les travaux pratiques, ils doivent avoir en leur possession une flore, une montre chronomètre, un marqueur indélébile et une trousse à dissection classique comprenant notamment petits et gros ciseaux, pinces fines, aiguille montée, épingles, verres de montre, lames et lamelles histologiques, lames de rasoir... Ces informations apparaissent sur la convocation des candidats. Les calculatrices programmables et les téléphones cellulaires ne sont pas admis. Lors des épreuves pratiques, les candidats sont informés des dates de leurs leçons d'oral.

Les sciences de la vie et les sciences de la Terre et de l'Univers se construisent grâce à la confrontation permanente des idées et des faits. La science construit une représentation du réel, un modèle conceptuel de la nature, qu'elle confronte à des faits d'observation : cette confrontation permet de valider le modèle, ou au contraire, de le réfuter en tout ou partie, ce qui permet alors de le remplacer ou de l'amender. Les faits utilisés pour cette confrontation peuvent être naturels et être l'objet d'une observation immédiate, visibles uniquement grâce à une démarche d'investigation et de mise en évidence, ou même provoqués par un protocole expérimental.

La fonction d'une séance de travaux pratiques est de mettre en œuvre de façon concrète cette confrontation du fait et de l'idée. Ce travail de réfutation/validation est constant dans l'enseignement des sciences de la vie et des sciences de la Terre et de l'Univers. Il demande la mise en œuvre de manifestations variées de l'intelligence du professeur ou de l'élève.

L'intelligence de l'esprit permet la confrontation intellectuelle entre la théorie et le résultat d'observation. Elle peut être mise en œuvre en cours, grâce à l'analyse de résultats d'observation ou d'expérience obtenus par d'autres.

L'intelligence de l'œil permet de passer de la vision à l'observation : il faut savoir voir ce que l'on voit. Cette intelligence, encore utilisable en cours, est néanmoins plus facilement mise en œuvre dans une séance de travaux pratiques. C'est dans ce contexte que l'observateur se trouve placé face à une réalité concrète et complexe dont il faut savoir extraire des informations pertinentes.

L'intelligence de la main permet de soutenir par le geste le travail de raisonnement : il faut savoir dégager et mettre en évidence un élément caché, mettre en œuvre un protocole expérimental, manipuler avec précision un appareillage technique. La précision du geste dépend naturellement de l'objectif intellectuel poursuivi : elle est un complément indispensable.

Les épreuves de travaux pratiques de l'agrégation tentent d'évaluer l'intelligence concrète des candidats : leur capacité à mettre leurs yeux et leurs mains au service d'un raisonnement scientifique. C'est dans cet esprit que les sujets ont été conçus et qu'ils ont été évalués. C'est ce que permet l'évolution de la structure du concours, et, tout particulièrement, l'existence de travaux pratiques d'option d'une durée de 6 heures.

3.4 MODALITES, OBJECTIFS ET GRILLES D'ÉVALUATION DES EPREUVES ORALES

Les épreuves orales d'admission sont publiques et se déroulent tous les jours durant la période des oraux (samedis, dimanches et jours fériés compris) de 9h à 19h. Chaque candidat admissible réalise deux leçons (une leçon dite de spécialité et une leçon de contre option) séparées par un jour de repos (sauf demande particulière et justifiée des candidats, présentée le jour de réception). Pour les candidats admissibles à la fois au CAPES et à l'Agrégation, l'emploi du temps de ce dernier concours a été systématiquement adapté par les membres du bureau des présidences de l'Agrégation et du CAPES de façon à ce que les candidats puissent se présenter dans les meilleures conditions possibles à l'un et à l'autre concours.

Après avoir pris connaissance du sujet de leur leçon, les candidats disposent de 15 minutes de préparation, sans ouvrages, avant d'avoir accès à la bibliothèque. Une fiche, à remplir, leur permet d'obtenir les ouvrages, les documents et les matériels dont ils souhaitent disposer pour préparer et illustrer leur leçon. Aucun matériel d'expérimentation n'est fourni aux candidats au cours des 30 dernières minutes de la préparation; il en est de même pour les documents et les autres matériels au cours des 15 dernières minutes.

Le jury autorise l'utilisation d'un dictionnaire Anglais - Français fourni ou apporté par le candidat. Un dictionnaire français est également disponible. Les calculettes programmables et les téléphones cellulaires ne sont pas autorisés.

3.4.1 Leçon dite de spécialité (leçon portant sur le programme de spécialité)

La leçon de spécialité porte sur le programme de spécialité du secteur disciplinaire (A, B, ou C) choisi par le candidat à l'écrit. Elle vise plusieurs objectifs :

- La validation des connaissances scientifiques, au meilleur niveau, dans l'option choisie par le candidat,
- L'évaluation des aptitudes à conduire logiquement une argumentation explicative dans le cadre d'une problématique scientifique.
- Des supports (tels qu'échantillons et lames minces de roches, cartes, matériels frais, préparations microscopiques, protocoles et résultats d'expériences...) sont fournis en quantité raisonnable au candidat (le nombre de documents est restreint et prévu **pour ne pas nécessiter plus d'une heure d'étude pendant la phase de préparation** de la leçon). Les supports doivent être mis en valeur par le travail du candidat (dessin, expériences, dissection,

préparation microscopique etc.). Du matériel complémentaire est disponible sur demande, le candidat se doit de rechercher des documents (dans les ouvrages disponibles à la bibliothèque) et des supports concrets complémentaires nécessaires à sa démonstration (roches, minéraux, échantillons animaux et/ou végétaux, cartes, diapositives, films, vidéos, CD Roms, logiciels de la bibliothèque numérique, matériels et résultats d'expériences par exemple). Une part conséquente de l'évaluation porte sur cette recherche.

Pendant le travail préparatoire à l'exposé, d'une durée de quatre heures, on attend du candidat :

- qu'il structure, sous forme d'un plan, sa présentation qui doit correspondre à la logique du sujet et **non se résumer à un simple commentaire des documents fournis par le jury**,
- qu'il exploite rigoureusement l'ensemble des documents fournis par le jury
- **qu'il réalise des productions personnelles** (telles que : coupes topographiques et géologiques, coupes histologiques, dissections, dessins d'observation, mesures expérimentales, schémas explicatifs...) nécessaires à l'illustration de son exposé,
- qu'il organise des postes de travail en fonction du plan choisi, de la démarche et des raisonnements mis en oeuvre.

Au cours de l'exposé, d'une durée de 50 minutes, le candidat doit obligatoirement exploiter les matériels fournis par le jury et dégager les enseignements des situations documentaires et expérimentales choisies, en suivant une méthode rigoureuse en relation avec la problématique scientifique du sujet. Le jury n'intervient pas pendant cet exposé.

L'entretien qui suit, d'une durée de 30 minutes maximum, s'appuie à la fois sur les documents fournis par le jury et les documents complémentaires demandés par le candidat. Il permet au jury d'évaluer les connaissances spécifiques relatives au sujet proposé, mais également les connaissances générales, ce qui peut conduire le jury à déborder le cadre strict du sujet.

L'évaluation porte sur :

- le domaine cognitif : connaissances relevées au cours de l'exposé et de l'entretien,
- le domaine méthodologique : choix des documents complémentaires, qualité de l'exploitation des documents, valeur et rigueur de l'argumentation, savoir-faire technique, productions concrètes et expérimentales, interprétations, traces finales des activités dans les postes de travail.

La grille d'évaluation utilisée lors de la session 2008 était la suivante :

- plan, structure, démarche et créativité : /15
- exploitation du matériel fourni : /15
- choix et exploitation du matériel complémentaire : /15
- connaissances liées au sujet de la leçon et au programme spécifique : /15
- connaissances liées au programme général du secteur disciplinaire choisi : /10

- communication : qualités pédagogiques et relationnelles : /10

TOTAL : 80 points

3.4.2 Leçon de contre option (leçon portant sur le programme général)

Les cadres scientifiques des leçons de contre option sont complémentaires de celui de l'option choisie par le candidat pour sa leçon de démonstration. Ainsi :

- il s'agit obligatoirement d'une leçon portant sur le programme général du secteur C pour les candidats inscrits dans les secteurs A et B ;
- il s'agit d'une leçon portant sur les programmes généraux des secteurs A ou B (ou mixte) pour les candidats inscrits dans le secteur C

L'exposé, d'une durée de 40 minutes, doit être réalisé en utilisant un langage scientifiquement et grammaticalement correct. Il comporte :

- la formulation des problèmes scientifiques liés au sujet proposé,
- la présentation d'une démarche rigoureuse fondée sur des données concrètes d'observation et d'expérience, ce qui suppose un effort du candidat vis-à-vis de la recherche et de l'utilisation de supports pédagogiques adaptés (dispositifs expérimentaux, matériel vivant, échantillons, cartes, diapositives, transparents, films...).
- l'exposé des connaissances se fera dans le cadre des programmes généraux des contre - options du candidat.

Le jury n'intervient pas pendant l'exposé.

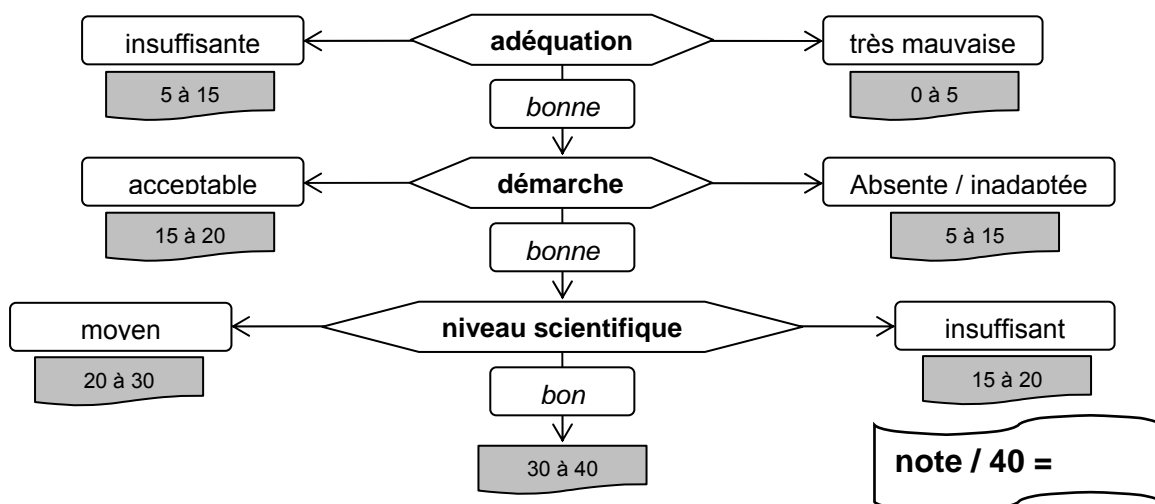
L'entretien qui suit, d'une durée de 30 minutes maximum, permet la vérification de la maîtrise des connaissances et de la méthodologie scientifique en rapport avec le sujet de la leçon. Le jury étend ensuite son interrogation à l'ensemble du programme général des deux contre-options.

L'évaluation porte sur :

- le domaine cognitif : connaissances relevées au cours de l'exposé et de l'entretien,
- le domaine méthodologique : qualité et rigueur de la démarche mise en oeuvre, tenue du tableau, transfert des connaissances,
- l'aptitude au transfert des connaissances dans une classe et les qualités relationnelles du candidat.

La grille d'évaluation utilisée lors de la session 2008 est la suivante :

Contenu scientifique de la leçon



Matériel et/ou illustration

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
choix sans utilisation ou aucun choix		choix maladroït		choix discutable			supports bien choisis			
		maladroïte = -1		exploitation		adroïte = +1		note / 10 =		

Communication

0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
indigente		faible et non convaincante		moyenne et de bonne volonté			excellente présence			
note / 10 =										

Connaissances dans la deuxième contre-option

note / 20 =	Total / 80 =	Note finale / 20 =
-------------	--------------	--------------------

3.5. PROGRAMME CONCOURS 2009

(publié dans le BO n° 4 du 29 mai 2008)

Programme de connaissances générales

Pour la session 2009 le programme de connaissances générales publié au B.O. spécial n° 5 du 19 mai 2005 est modifié ainsi qu'il suit :

Le paragraphe 2.6 « L'homme face aux maladies » devient le paragraphe 7.7.

Programme de spécialité pour la session 2009

Pour la session 2009 le programme de spécialité publié au B.O. spécial n° 3 du 17 mai 2008 est modifié ainsi qu'il suit :

Secteur A : biologie et physiologie cellulaires, biologie moléculaire ; leur intégration au niveau de l'organisme

Le programme de spécialité du secteur A porte sur les rubriques 1, 2, 6 et 7 du programme de connaissances générales (modifié ci-dessus) et sur les 15 thèmes suivants regroupés en trois domaines et étudiés de façon approfondie en envisageant le niveau des connaissances et celui des approches méthodologiques et techniques. Cette démarche thématique permet d'approfondir globalement les éléments des rubriques 1, 2 et 6 du programme de connaissances générales sans les reprendre exhaustivement en indiquant à chaque fois les attendus et les limites.

L'approfondissement de certains aspects de la rubrique 7 n'apparaît que pour des questions d'intégration accompagnant le libellé de la définition du secteur.

Interactions

(Le terme est pris dans le sens d'une action entraînant une réaction quel que soit le niveau d'étude pris en compte)

- 1- Interactions protéines-ligands (exemples choisis parmi les enzymes, les récepteurs ionotropiques et métabotropiques)
- 2 - Interactions cellules eucaryotes-contraintes abiotiques (thermiques, osmotiques, hydriques)
- 3 - Interactions au sein du système immunitaire humain
- 4 - Interactions cellulaires au cours du développement animal

Signalisations et différenciations cellulaires

(Les protocoles expérimentaux ne sont pas exigibles, mais les principes des expérimentations doivent être connus)

5 - Détermination et différenciation des cellules

6 - Réplication de l'ADN : mécanisme et contrôles

7 - Mutations et cancers

8 - Ca^{2+} et signalisations cellulaires

9 - Les modifications post-traductionnelles : phosphorylations, glycosylations et ubiquitinations

10 - Les phytohormones

11 - Le contrôle du cycle cellulaire

Principes, applications et limites des biotechnologies en sciences de la vie.

(Les protocoles expérimentaux ne sont pas exigibles, mais les principes des expérimentations et les applications possibles doivent être connus. On entend par « limites » les contraintes techniques et éthiques des biotechnologies)

12 - La transgénèse : exemples choisis chez les végétaux et les mammifères

13 - Biotechnologies des cellules souches embryonnaires et adultes animales

14 - Génomique et amélioration végétale

15 - Ingénierie cellulaire et métabolique

Secteur B : biologie et physiologie des organismes et biologie des populations, en rapport avec le milieu de vie

Le programme de spécialité du secteur B porte sur les rubriques 3, 4, 5 et 7 du programme de connaissances générales et sur les 15 thèmes suivants regroupés en trois domaines et étudiés de façon approfondie en envisageant le niveau des connaissances et celui des approches méthodologiques et techniques.

Cette démarche thématique permet d'approfondir certains éléments des rubriques 3, 4 et 5 du programme de connaissances générales sans les reprendre exhaustivement en indiquant à chaque fois les attendus et les limites. L'approfondissement de certains aspects de la rubrique 7 n'apparaît que pour des questions d'intégration accompagnant le libellé de la définition du secteur.

Biologie et physiologie intégrative (L'organisme dans son milieu)

- 1 - Diversité des cycles de vie des parasites ; éléments-clés permettant la réussite du cycle : reproduction, filtres de rencontre et de compatibilité, virulence/avirulence, résistance/ sensibilité, favorisation
- 2 – Modalités et régulation des échanges gazeux, hydriques et minéraux entre l'organisme et son milieu de vie en conditions déshydratantes
- 3 – Les signaux sonores (production, perception, apprentissage) et leur importance biologique : des mécanismes neurophysiologiques aux aspects écologiques
- 4 – Neurobiologie des rythmes : des fonctions circadiennes aux fonctions saisonnières
- 5 - Induction florale chez les Angiospermes : thermopériodisme, vernalisation, photopériodisme – des mécanismes moléculaires aux conséquences écologiques
- 6 – la locomotion chez les Vertébrés : approche intégrée des aspects morpho-anatomiques, bioénergétiques, mécaniques, écologiques et évolutifs

Plan d'organisation, phylogénie et évolution

- 7 - Segmentation et régionalisation du corps : variations anatomiques et fonctionnelles. Rôle des gènes du développement. Intérêt pour comprendre l'évolution des plans d'organisation et les grandes divisions systématiques des Métazoaires
- 8 - Évolution régressive à partir de l'exemple de parasites eucaryotes (animaux, plantes, oomycètes, eumycètes) ; phylogénies et convergences
- 9 - Importance des réarrangements inter et intra-génomiques dans les processus évolutifs
- 10 - Construction des arbres phylogénétiques : méthodes de maximum de vraisemblance, notion de bootstrap et problèmes (enracinement, variations des taux d'évolution)
- 11 – les espèces domestiquées : domestication et apport à la compréhension des mécanismes de l'évolution

Écologie fonctionnelle et évolutive

- 12 – Stratégies et comportements reproducteurs chez les animaux : aspects fonctionnels et évolutifs
- 13 - Coévolution hôtes-parasites : course aux armements, évolution de la virulence, évolution vers le mutualisme
- 14 - Les déplacements des Métazoaires : perception de l'environnement, orientation spatiale et guidage.
- 15 – La vie en groupe : états pluricellulaires, organismes coloniaux, groupes sociaux. Aspects fonctionnels, écologiques et évolutifs

Secteur C : Sciences de la Terre et de l'univers, interactions entre la biosphère et la planète Terre

Le programme de spécialité comporte le programme de connaissances générales et les quinze thèmes détaillés ci-dessous. Ce programme de spécialité s'appuie sur la connaissance des imageries géophysiques et satellitaires de la Terre interne et externe, ainsi que sur l'utilisation des modèles analogiques et numériques.

- 1 - Géodésie et géodynamique (interne et externe)
- 2 - Les radiochronomètres : choix et limites des méthodes
- 3 - Le traçage isotopique des transferts dans les enveloppes externes
- 4 - Les transitions de phase : mécanismes et conséquences dynamiques
- 5 – Flux et transferts de chaleur dans les enveloppes internes et externes de la Terre
- 6 - La Terre primitive : origine des enveloppes et de la vie
- 7 - Les variations climatiques naturelles du Cambrien à l'actuel
- 8 - Crises et renouvellement de la biosphère
- 9 - Réservoirs et flux de carbone dans le système Terre
- 10 – Évolution tectono-métamorphique de la chaîne paléozoïque d'Europe occidentale
- 11 - Les gîtes métallifères associés à la convergence des plaques
- 12 – Les vitesses des processus géologiques
- 13 - Les provinces magmatiques géantes
- 14 - La sismicité dans le système Alpes-Méditerranée
- 15 - Les grands bassins salifères : formations, évolutions tectoniques et ressources associées

Programme annexe de questions scientifiques d'actualité 2009

- 1 – L'obésité
- 2 – Les nouvelles questions sur la place de l'Homme dans l'évolution : apports de la génomique, de l'écologie comportementale et des sciences cognitives.
- 3 - Ressources minérales et énergétiques.

3.6 MATERIELS ET OUVRAGES MIS À LA DISPOSITIONS DES CANDIDATS

Lors des épreuves orales d'admission, les candidats disposent, dans chaque salle, d'un matériel audiovisuel classique (rétroprojecteur, projecteur de diapositives, magnétoscope et téléviseur, dispositif de vidéo - microscopie) et des listes des diapositives, des transparents, et des cassettes vidéo et CD

Roms disponible. Chaque candidat dispose également d'un poste informatique équipé de la bibliothèque numérique mise à la liste.

Par ailleurs, selon les sujets des leçons, chaque candidat peut disposer de microscopes, de loupes binoculaires, de diapositives, de vidéogrammes, de transparents et du matériel nécessaire à la réalisation d'expériences, éventuellement assistées par ordinateur. Cinq vidéoprojecteurs sont également disponibles.

À la demande des candidats, des éléments sont à leur disposition, en particulier :

- en sciences de la Terre et de l'univers : la majeure partie des cartes géologiques au 1/50 000, de nombreuses cartes spécifiques (éditions UNESCO, CCGM, Universités diverses,...), des échantillons de roches, des lames minces, des diapositives, des logiciels,...
- en biologie et physiologie cellulaires, biologie moléculaire: des préparations microscopiques, des photographies de microscopie électronique, divers kits de biologie cellulaire et d'immunologie, des microorganismes (levures, chlorelles,...), des diapositives, des logiciels,...
- en biologie et physiologie des organismes: des échantillons frais de plantes, fournis par le Museum National d'Histoire Naturelle, du matériel vivant, des échantillons de collection, des préparations microscopiques d'histologie animale et végétale, des diapositives, des logiciels ...

LISTE DES OUVRAGES ET DES LOGICIELS DISPONIBLES POUR LES EPREUVES ORALES D'ADMISSION

Ouvrages de SV Ouvrages de STU Logiciels sites internet capturés

Il n'y aura pas d'accès direct à internet

Les listes ci-dessous sont données à titre indicatif et provisoire

**Le jury se réserve le droit d'y apporter de légères modifications avant le début des
épreuves orales**

Liste des ouvrages

SCIENCES DE LA VIE

1 - Revues et ouvrages généraux

La Recherche (1987-2007).

Pour la Science (1987-2007). *Belin éd.*

Encyclopedia Universalis (volumes 1998, CD-Rom 2006). *Encyclopedia Universalis.*

Encyclopédie médicale de la famille (1991). *Larousse éd.*

Berthet J. (2006). – Dictionnaire de biologie. *De Boeck éd.*

Bresnick S. D. (2004). – Biologie. *De Boeck éd.*

Campbell N. A. & Reece J. B. (2004). - Biologie. *De Boeck éd.*

Forêt R. (2006) Dico de Bio. *De Boeck éd.*

Dorosz Ph. (1993). - Constantes biologiques et repères médicaux. *Maloine éd.*

Lascombes G. (1968). - Manuel de travaux pratiques : Physiologie animale et végétale. *Hachette éd.*

Mc Murry J. Begley T. (2006) – Chimie organique des processus biologiques . *De Boeck éd.*

Mazliak P. (2002). - Les fondements de la biologie : Le XIX siècle de Darwin, Pasteur et Claude Bernard. *Vuibert éd.*

Mazliak P. (2001). - La biologie du XX siècle Les grandes avancées de Pasteur aux neurosciences. *Vuibert éd.*

Péré J.-P. (1994). - La microscopie. *Nathan éd.*

Perrier R. , Auffret van der Kemp T. & Zonszain F. (1997). - Expériences faciles et moins faciles en sciences biologiques. *Doin éd.*

Pol D. (1996). - Travaux pratiques de biologie des levures. *Ellipses éd*

Pol D. (1994). - Travaux pratiques de biologie. *Bordas éd.*

Purves W. K. & coll. (2000). - Le monde du vivant. *Flammarion éd.*

Raven, Johnson, Losos, Singer, (2007) - Biologie. *De Boeck éd.*

Van Gansen P. & Alexandre H. (1997). - Biologie générale. *Masson éd.*

2 - Biochimie. Biologie moléculaire. Biologie et Physiologie cellulaires

Alais C., Linden G., Miclo L. (2003) – Biochimie alimentaire. *Dunod éd.*

Alberts B. & coll. (2004). - Biologie moléculaire de la cellule. *Flammarion Médecine-Sciences éd.*

Audigé Cl., Dupont G. & Zonszain F. (1999). - Principes des méthodes d'analyse biochimique, tomes 1 & 2. *Doin éd*

Audigé Cl. & Zonszain F. - (2003). - Biochimie structurale. *Doin éd*

Audigé Cl. & Zonszain F. - (2003). - Biochimie métabolique. *Doin éd.*

Bassaglia Y - (2001). - Biologie cellulaire. *Maloine éd.*

Bernard J.-J. (2002). - Bioénergétique cellulaire. *Ellipses éd.*

Branden C. & Tooze R. (1996). - Introduction à la structure des protéines. *De Boeck éd.*

Bruneton J. (1987). - Eléments de Phytochimie et de Pharmacologie. *Lavoisier Tec & Doc éd.*

Buchanan B. B., Gruissem W. & Jones R. L. (2001). - Biochemistry and molecular biology of plants. *American Society of Plants Physiologists.*

Callen J.-C. (2005) – Biologie cellulaire. Des molécules aux organismes. *Dunod éd.*

Clos J. & Coupé M. (2002). - Biologie des organismes 1 : Intégrité, identité et pérennité des organismes animaux et végétaux face aux contraintes abiotiques. *Ellipses éd.*

Clos J., Coupé M. & Muller Y. (2002). - Biologie des organismes 2 : Les rythmes biologiques chez les animaux et les végétaux. *Ellipses éd.*

Clos J., Coumant M. & Muller Y. (2003). - Biologie cellulaire et moléculaire 1 : Cycle, différenciation et mort cellulaire chez les animaux et les végétaux. *Ellipses éd.*

- Combarrous Y. (2004). - Communications et signalisations cellulaires. *Lavoisier Tec & Doc éd.*
- Cooper G. (1999). - La cellule. *De Boeck Université éd.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.) (1988). - Biologie moléculaire végétale : bilan et perspectives. *Bulletin de la Société botanique Française, T 135.*
- Cross P. C. & Mercer K.L. (1995). - Ultrastructures cellulaire et tissulaire (atlas d'illustrations). *De Boeck Université éd.*
- Darnell J., Lodish H. & Baltimore D. (1995). - Biologie moléculaire de la cellule. *De Boeck Université éd.*
- Garret R. H. & Grisham C. M. (2000). - Biochimie. *De Boeck Université éd.*
- Gavrilovic M. & coll. (1996). - Manipulations d'analyse biochimique. *Doin éd.*
- Guignard J. L. (1996). - Biochimie végétale. *Dunod éd.*
- Granner D.K. & Murray R. K. (2003). - Biochimie de Harper. *De Boeck éd / Les presses Universitaires de Laval.*
- Hennen G. (1996). - Biochimie humaine. *De Boeck Université éd.*
- Kaplan J.-C. & Delpech M. (1994). - Biologie moléculaire et médecine. *Flammarion Médecine-Science éd.*
- Karp G. (2004). - Biologie cellulaire et moléculaire. *De Boeck éd.*
- Landry Y. & Gies J.-P. (1990). - Pharmacologie moléculaire. *McGraw-Hill éd.*
- Landry Y. & Gies J.-P. (2003). - Pharmacologie : des cibles vers l'indication thérapeutique. *Dunod éd.*
- Larpernt J. & Champiat D. (1994). - Bio-chimiluminescence. *Masson éd.*
- Lehninger A. L. & coll. (1994). - Principes de Biochimie. *Flammarion Médecine-Science éd.*
- Lodish, Berk, Matsudaira, Kaiser, Krieger, Scott, Zipursky, Darnell. (2005). - Biologie moléculaire de la cellule. *De Boeck Université éd.*
- Macheix J.J.,Fleuriet A., Jay-Allemand C. (2005) – Les composés phénoliques. *Presses polytechniques et universitaires romandes éd.*
- Martin Jr. D. W., Mayes P. A. & Rodwell V. W. (1989). - Précis de Biochimie de Harper. *Eska éd / Presses Universitaires de Laval.*
- Moussard Ch (2005) – Biologie moléculaire- Biochimie des communications cellulaires. *De Boeck éd.*
- Moussard Ch (2006) – Biochimie structurale et métabolique. *De Boeck éd.*
- Müller-Esterl W. (2007) – Biochimie et biologie moléculaire. *Dunod éd*
- Pelmont J. (1995). - Enzymes : Catalyseurs du monde vivant. *Presses Universitaires de Grenoble*
- Rawn J. D. (1990). - Traité de biochimie. *Belin éd.*
- Robert D. & Vian B. (1998). - Eléments de biologie cellulaire. *Doin éd.*
- Robert D. & Roland J.-C. (1998). - Organisation cellulaire. *Doin éd.*
- Robert D. & Roland J.-C. (1998). - Organisation végétative. *Doin éd.*
- Shechter E. (1993). - Biochimie et biophysique des membranes. Aspects structuraux et fonctionnels. *Masson éd.*
- Stryer L., Berg J. M. & Tymoczko J. L (2003). - Biochimie. *Flammarion Médecine-Sciences éd.*
- Swynghedauw B. (1994). - Biologie moléculaire : Principes et méthodes. *Nathan Université éd*
- Tagu D. & Moussard Ch. (1999 et 2003). - Principes des techniques de biologie moléculaire. *INRA éd.*
- Thuriaux P. (2004). - Les organismes modèles : la levure. *Belin éd.*

Voet D & Voet J. G. (2005). - Biochimie. *De Boeck Université éd.*
 Weil J. H. & coll. (2001 et 2005). - Biochimie générale. *Dunod éd.*
 Weinman S. & Méhul P. (2000). - Biochimie : structure et fonctions des protéines. *Dunod éd.*

3 - Génétique et évolution

Allano L. & Clamens A. (2000). - L'évolution, des faits aux mécanismes. *Ellipses éd.*
 Bernot A. (2001). - Analyse de Génomes, Transcriptomes et Protéomes. *Dunod éd.*
 Bernot A. (2001). - L'analyse des génomes. *Nathan éd.*
 Brondex F. (1999 et 2003). - Evolution : synthèse des faits et théorie. *Dunod éd.*
 Boyd & Silk (2004) – L'aventure humaine- Des molécules à la culture. *De Boeck éd.*
 Claviller L, Hervieu F. & Letodé O. (2001). - Gènes de résistance aux antibiotiques et plantes transgéniques. *INRA éd.*
 Collectif (Soc. Bot. Fr.) (1979). - Information génétique et polymorphisme végétal. *Bulletin de la Société botanique Française, T 120.*
 Darlu P. & Tassy P. (1993). - Reconstruction phylogénétique : concepts et méthodes. *Masson éd.*
 David P. & Samadi S. (2000). - La théorie de l'évolution. *Flammarion éd.*
 De Bonis L. (1991). - Evolution et extinction dans le règne animal. *Masson éd.*
 Dorléans P. (2003). - Il était une fois l'évolution. *Ellipses éd.*
 Gibson G. & Muse S. V. (2004). - Précis de génomique. *De Boeck éd.*
 Gouyon P.-H., Arnould J., Henry J.-P. (1996) - Les avatars du gènes. La théorie néodarwinienne de l'évolution. *Belin éd.*
 Griffiths & coll. (2001). - Analyse génétique moderne. *De Boeck éd.*
 Griffiths, Wessler, Lewontin, Gelbart, Suzuki & Miller (2006) Introduction à l'analyse génétique. *De Boeck Université éd.*
 Hartl D. (1994). - Génétique des populations. *Flammarion Médecine-Sciences éd.*
 Hartl D. & Jones E. W. (2003). - Génétique : les grands principes. *Dunod éd.*
 Harry M. (2001). - Génétique moléculaire et évolutive. *Maloine éd.*
 Henry J.-P., Gouyon P.-H. (1998) - Précis de génétique des populations. *Masson éd.*
 Houbedine L.-M. (2001). - Transgénèse animale et clonage. *Dunod éd.*
 Jacquard A. (1994). - Structures génétiques des populations. *Masson éd.*
 Judd, Campbell, Kellog, Stevens (2002) – Botanique systématique. Une perspective phylogénétique *De Boeck éd.*
 Lecointre G. et Le Guyader H. (2001). - Classification Phylogénétique du vivant. *Belin éd.*
 Collectif sous la direction de Lecointre G. (2004). - Comprendre et enseigner la classification du vivant. *Belin éd.*
 Le Guyader H. (1998). - L'évolution. *Belin / Pour la Science éd.*
 Lewin B. (2001). - Gènes. *Flammarion Médecine-Sciences éd.*
 Luchetta Ph. & coll. (2004). - Evolution moléculaire. *Dunod éd.*

Maynard-Smith J. & Szathmary E. (2000). - Les origines de la vie : De la naissance de la vie à l'origine du langage. *Dunod éd.*

Panthier J.-J., Montagutelli X. & Guenet J.-L. (2003). - Les organismes modèles : Génétique de la souris. *Belin éd.*

Pasternack J. Génétique moléculaire moderne - Une introduction aux mécanismes de maladies héréditaires (2003) . *De Boeck éd.*

Pouteau S. (2007) – Génétiquement indéterminé ; Le vivant auto-organisé. *Quae éd.*

Primerose S., Twyman R. & Old B. (2004). - Principes de génie génétique. *De Boeck Université éd.*

Ridley (1997). - L'évolution. *Blackwell / De Boeck Université éd.*

Rossignol J.-L. (1996 et 2004). - Abrégé de génétique. *Masson éd.*

Rossignol J.-L. & coll. (2000). - Génétique : Gènes et génomes. *Dunod éd.*

Serre J.-L (2006) – Génétique. *Dunod éd*

Serre J.-L. (1997 et 2006). - Génétique des populations. *Nathan Université éd.*

Solignac M. & coll. (1995). - Génétique et évolution, Tome 1 : Les variations, les gènes dans les populations. *Hermann éd.*

Solignac M. & coll. (1995). - Génétique et évolution, Tome 2 : L'espèce, l'évolution moléculaire. *Hermann éd.*

Watson J. D. & coll. - Biologie moléculaire du gène. *Inter Editions.*

4 - Immunologie, Microbiologie, Virologie

Abbas A.K. & Lichtman A.H. (2005). - Les bases de l'immunologie fondamentale et clinique. *Elsevier éd.*

Borrel Th. (1996) – Les virus. *Nathan éd.*

Cassuto J.-P., Pesce A. & Quaranta J.-F. (1993). - Que-sais-je? : Le Sida. *Presses Universitaires de France éd.*

Collectif (Pour la Science) (1987). - Les virus : de la grippe au Sida. *Belin / Pour La Science éd.*

Collectif (Pour la Science) (1995). - Les maladies émergentes. *Belin / Pour la Science éd.*

Cornuet P. (1987). - Eléments de virologie végétale. *INRA éd.*

Daëron M. & coll. (1996). - Le système immunitaire. *Dossiers documentaires INSERM / Nathan éd.*

Espinosa E. & Chillet P. (2006). – Immunologie. *Ellipses éd.*

Girard M. & coll. (1989). - Virologie moléculaire. *Doin éd.*

Goldsby R.A., Kindt T.J. & Osborne B.A. (2001 et 2008). – Immunologie. Le cours de Janis Kuby avec questions de revision. *Dunod éd.*

Janeway , Travers , Welpert, Schlomchik (2003). - Immunobiologie. *De Boeck Université éd.*

Larpent J.-P. & Larpent-Gourgau M. (1985). - Eléments de Microbiologie. *Hermann éd.*

Larpent-Gourgau M. & Sanglier J.-J. (1992). – Biotechnologies. *Doin éd.*

Leclerc H. & coll. (1983). - Microbiologie générale. *Doin éd.*

Meyer A., Deiana J. & Leclerc H. (1988). - Cours de Microbiologie générale. *Doin éd.*

Prescott L., Harley, Klein (2003). – Microbiologie. *De Boeck éd*

- Regnault J.-P. (1990). - Microbiologie générale. *Vigot éd.*
- Revillard J.-P. (2001). – Immunologie. *De Boeck Université éd*
- Roitt I. (1990). – Immunologie. *Pradel éd.*
- Siboulet A. & Coulaud J.-P. (1990). - Maladies sexuellement transmissibles. *Masson éd.*
- Terzian H. (1998). - Les Virus : De la structure aux pathologies. *Diderot éd.*

5 - Anatomie, Histologie, Cytologie

- Bowes B. G. (1998). - Atlas en couleur, structure des plantes. *INRA éd.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.) (1981). - Développements récents de la cytologie ultrastructurale végétale. *Bulletin de la Société botanique Française.*
- De Vos L. & Van Gansen P. (1980). – (1980). - Atlas d'Embryologie des Vertébrés. *Masson éd.*
- Elias H., Pauly J. E. & Burns E. R. (1984). - Histologie et micro-anatomie du corps humain. *Piccin-Padov éd.*
- Heusser S. & Dupuy H.G. (2001). - Atlas de biologie animale 1 : Les grands plans d'organisation. *Dunod éd.*
- Heusser S. & Dupuy H.G. (2000 et 2004). - Atlas de biologie animale 2 : Les grandes fonctions. *Dunod éd.*
- Kahle W. & coll. (1990). - Anatomie 3 : système nerveux. *Flammarion Médecine-Sciences éd.*
- Kessel R. G. & Kardon R. M. (1979). - Tissues and organs : a text-atlas of scanning electron microscopy. *Freemann éd.*
- Kierszenbaum (2006) – Histologie et biologie cellulaire- Une introduction à l'anatomie pathologique *De Boeck éd.*
- Roland J.-C., Callen J.-C. (2007) - Atlas Biologie cellulaire. *Dunod éd.*
- Rolland S. C. & Szollósi A. (2001). - Atlas de biologie cellulaire. *Dunod éd.*
- Secchi J. & Lecaque D. (1981). - Atlas histologie. *Maloine éd.*
- Sobotta & Hammersen F. (1980). - Histology : A Color Atlas of Cytology. Histology and Microscopic Anatomy. *Urban & Schwarzenberg éd.*
- Wheather P.R., Young B. & Heath J.M. (2001). - Histologie fonctionnelle. *De Boeck éd.*

6 - Reproduction, Embryologie, Développement

- Bally-Cuif L. (1995). - Les gènes du développement. *Nathan éd.*
- Beaumont A. & coll. (1994). – Développement. *Dunod éd.*
- Boué A. (1989). - Médecine prénatale. Biologie clinique du fœtus. *Flammarion Médecine-Science éd.*
- Brien P. (1966). - Biologie de la reproduction animale. Blastogenèse. *Masson éd.*
- Clos Y., Coumans M. & Coupé M. (2001). - Biologie des organismes. *Ellipses éd.*
- Cochard L. R. (2003). - Atlas d'embryologie humaine de Netter. *Masson éd.*
- Darribere T. (2002). - Introduction à la biologie du développement. *Belin éd.*
- Darribere T. (2003). - Le développement d'un mammifère : la souris. *Belin éd.*
- Denis-Pouxviel C. & Richard D. (1996). - La reproduction humaine. *Nathan éd.*

Ferre F. & coll. (1995). - Transmettre la vie à l'aube du XXI^{ème} siècle. *Dossiers documentaires INSERM / Nathan éd.*

Franquinet R. & Foucrier J. (2003). - Atlas d'Embryologie descriptive. *Dunod éd.*

Gilbert F. (2004). - Biologie du développement. *De Boeck Université éd.*

Hourdry J. & Beaumont A. (1985). - Les métamorphoses des Amphibiens. *Masson éd.*

Hourdry J. & coll. (1995). - Métamorphoses animales. *Hermann éd.*

Hourdry J & coll. (1998). - Biologie du développement. Morphogenèse animale. Unité et diversité des métazoaires. *Ellipses éd.*

Johnson M. H. & Everitt B. J. (2002). - Reproduction. *De Boeck éd.*

Larsen W. J. (2003). - Embryologie humaine. *De Boeck éd.*

Le Moigne A. & Foucrier J. (2001 et 2004). - Biologie du développement. *Dunod éd.*

Martial. (2002). - L'embryon chez l'homme et l'animal. *INRA / INSERM éd.*

Moore K.L. (1989). - ELeMents d'embryologie humaine. *Vigot éd.*

Poirier J., Cohen I. & Bandet S. (1980). - Embryologie humaine. *Maloine éd.*

Pourquoi O. (1995). - La construction du système nerveux. Biologie du développement. *Nathan éd.*

Pourquoi O. (2002). - Biologie du développement. *Hermann éd.*

Rabineau D. (1989). - Précis d'embryologie humaine. *Ellipses éd.*

Salgeiro E. & Reiss A. (2002). - Biologie de la reproduction sexuée. *Belin éd.*

Signoret J. & Collenot A. (1991). - L'organisme en développement 1. Des gamètes à l'embryon. *Hermann éd.*

Slack J. M. W. (2004). - Biologie du développement. *De Boeck éd.*

Thibault C. & Levasseur M.-C. (2001). - La reproduction chez les Mammifères et l'Homme. *Ellipses / INRA éd.*

Wolpert L. (2000). - Biologie du développement, les grands principes. *Dunod éd.*

7 - Physiologie animale et humaine

Ambid L., Larrouy D. & Richard D. (1994). - La thermorégulation. *Nathan éd.*

Beaumont A. & coll. (2000). - Osmorégulation et excrétion. *Belin éd.*

Beaumont A. & coll. (2004). - Biologie et physiologie animale. *Dunod éd.*

Callas A. & coll. (1997). - Précis de physiologie. *Doin éd.*

Calvino B. (2003). - Introduction à la physiologie – Cybernétique et régulation. *Belin éd.*

Charpentier A. (1996). - Sang et cellules sanguines. *Nathan éd.*

Chevalet P. & Richard D. (1994). - La notion de régulation en physiologie. *Nathan Université éd.*

Collectif (Pour la Science). (1990). - Ces hormones qui nous gouvernent. *Belin éd.*

Collectif (Pour la Science). (1988). - Le Cerveau. *Belin éd.*

D'Alche E. P. (1999). - Comprendre la physiologie cardiovasculaire. *Flammarion Médecine-Science éd.*

Desjeux J.-F. & Hercberg S. (1996). - La nutrition humaine. *Dossiers documentaires / INSERM Nathan éd.*

Dupin H. (1982). - Apports nutritionnels conseillés pour la population française. *Lavoisier Tech & Doc éd.*

Dupouy J.-P. (1992). - Hormones et grandes fonctions T I & II. *Ellipses éd.*

Eckert R. & coll. (1995). - Animal Physiology. *Freeman éd.*

Eckert R. & coll. (1999). - Physiologie animale (version traduite). *De Boeck éd.*

Flandrois R. & Monod H. (1995). - Physiologie du sport. *Masson éd.*

Génétêt B. (1989). - Hématologie. *Lavoisier Tec & Doc éd.*

Gilles R. & al (2006) – Physiologie animale. *De Boeck éd.*

Hammond C. & Tritsch D. (1990). - Neurobiologie. *Doin éd.*

Houdas Y. (1990). - Physiologie cardio-vasculaire. *Vigot éd.*

Jones D., Round J. & De Haan A. (2005). - Physiologie du muscle squelettique : de la structure au mouvement. *Elsevier éd.*

Kandel E. R. & Schwartz J. H. (2000). - Principle of neural science. *Elsevier éd.*

Katch F.I., Katch V.L., Mc Ardle W.D. (2007) – Exercise physiology. *Lippincott Williams & Wilkins*

Leroux J.-P. & coll. (1994). - Le métabolisme énergétique chez l'Homme. *Dossiers documentaires / INSERM Nathan éd.*

Marieb E. N. (1999). - Anatomie et physiologie humaines. *De Boeck Universités éd.*

Meyer Ph. (1983). - Physiologie humaine. *Flammarion Médecine-Science éd.*

Pellet M.V. (1977). - Physiologie humaine I. Milieu intérieur compartiments liquidiens. *SIMEP éd.*

Pellet M.V. (1977). - Physiologie humaine II. Le rein. *SIMEP éd.*

Purves, Augustine, Fitzpatrick , Hall, Lamantia, Mc Namara, William. (2005). - Neurosciences. *De Boeck éd.*

Richard D. & coll. (1997). - Physiologie des animaux Tomes I & II. *Nathan Université éd.*

Richard D. & Orsal D. (1994). - Neurophysiologie T1. Physiologie cellulaire et systèmes sensoriels. *Nathan éd.*

Richard D. & Orsal D. (1994). - Neurophysiologie T2. Motricité et grandes fonctions du système nerveux central. *Nathan éd.*

Richard D., Orsal D. (2007) – Neurophysiologie. Organisation et fonctionnement du système nerveux. *Dunod éd.*

Rieutord. (1999). - Physiologie animale, Tome 1 : les cellules dans l'organisme. *Masson éd.*

Rieutord. (1999). - Physiologie animale, Tome 2 : les grandes fonctions. *Masson éd.*

Schmidt- Nielsen K. (1998). - Physiologie animale. Adaptation et milieux de vie. *Dunod éd.*

Sebahoun G. (2003). - Hématologie clinique et biologique. *Arnette éd.*

Silbernag & Despopoulos. (1997). - Atlas de physiologie. *Flammarion Médecine-Science éd.*

Swynghedauw B. & Beaufile Ph. (1995). - Le cœur : fonctionnement, dysfonctionnement & traitements. *Dossiers documentaires INSERM / Nathan éd.*

Tanzarella S. (2006). - Perception et communication chez les animaux. *De Boeck éd.*

Tritsch D. & coll. (1998). - Physiologie du neurone. *Doin éd.*

Valet Ph. & Richard D. (1994). - Le calcium dans l'organisme. *Nathan éd.*

Valet Ph. & coll. (1996). - Muscles et motricité. *Nathan éd.*

Vander A. J. & coll. (1996). - Physiologie humaine. *McGraw-Hill éd.*

8 - Zoologie, Biologie animale

Beaumont A. & Cassier P. (1973 et 2004). - Biologie animale. Des Protozoaires aux Métazoaires épithélioneuriens, tome 1 & 2. *Dunod éd.*

Beaumont A. & Cassier P. (1972 et 2004). - Biologie animale. Les Cordés. Anatomie comparée des Vertébrés. *Dunod éd.*

Boissin J. & Canguilhem B. (1998). - Les rythmes du vivant. *Nathan éd.*

Chapron C. (1999 et 2004). - Principes de Zoologie. *Dunod éd.*

Collectif (INRA). (1980). - La pisciculture en étang. *INRA éd.*

Collectif (Pour la Science). (1981). - Les sociétés animales. *Belin / Pour la Science éd.*

Collectif (Pour la Science). (1988). - L'adaptation. *Belin / Pour la Science éd.*

De Puytorac P., Grain J. & Mignot J.-P. (1987). - Précis de Protistologie. Boubée éd.

Ehrardt J.-P. & Seguin G. (1978). - Le plancton composition écologie pollution. *Gauthier-Villars éd.*

Golvan Y.J. (1978). - Eléments de Parasitologie médicale. *Flammarion Médecine-Science éd.*

Gould J. L. & Grant-Gould C. (1993). - Les Abeilles. *Belin / Pour la Science éd.*

Grasse P. P. & coll. (1961). - Précis de Sciences biologiques. Zoologie I. Invertébrés. *Masson éd.*

Grasse P. P. & coll. (1965). - Précis de Sciences biologiques. Zoologie II. Vertébrés. *Masson éd.*

Le Louarn H. & Quere J. P. (2003). - Les rongeurs de France : Faunistique et biologie. *INRA éd.*

Meglitsch P.-A. (1973). - Zoologie des Invertébrés. I. Protistes et Métazoaires primitifs. *Doin éd.*

Meglitsch P.-A. (1974). - Zoologie des Invertébrés. II. Des Vers aux Arthropodes. *Doin éd.*

Meglitsch P.-A. (1975). - Zoologie des Invertébrés III. Arthropodes Mandibulates et Deutérostomiens. *Doin éd.*

Renous S. (1994). - Locomotion. *Dunod éd.*

Turquier Y. (1990). - L'organisme dans son milieu. 1. Les fonctions de nutrition. *Doin éd.*

Turquier Y. (1994). - L'organisme dans son milieu 2. L'organisme en équilibre avec son milieu. *Doin éd.*

9 - Ecologie, Ethologie, Biogéographie

Angelier E. (2002). - Introduction à l'écologie : Des écosystèmes naturels aux écosystèmes humains. *Lavoisier Tec & Doc éd.*

Aron S. & Passera L. (2000). - Les sociétés animales : Evolution de la coopération et organisation sociale. *De Boeck Université éd.*

Bachelier G. (1979). - La faune des sols, son écologie et son action. *Orstom (IRD) éd.*

Baize D. (2004). - Petit lexique de pédologie. *INRA éd.*

Baize D. & Jabio B. (1995). - Guide pour la description de sols. *INRA éd.*

Baize D. & Tercé M. (2002). - Les éléments traces métalliques dans les sols : approches fonctionnelles et spatiales. *INRA éd.*

Barbault R. (1981). - Ecologie des populations et des peuplements. *Masson éd.*

Barbault R. (1992). - Ecologie des peuplements: structure et dynamique de la biodiversité. *Masson éd.*

Barbault R. (1995). - Ecologie générale, structure et fonctionnement de la biosphère. *Masson éd.*

Barriuso E. (2003). - Estimation des risques environnementaux des pesticides. *INRA éd.*

Blondel J. (1995). - Biogéographie : approche écologique et évolutive. *Dunod éd.*

Bougis P. (1974). - Ecologie du plancton marin. I. Le phytoplancton. *Masson & Cie éd.*

Bougis P. (1974). - Ecologie du plancton marin. II. Le zooplancton. *Masson & Cie éd.*

Bournerias M. (1979). - Guide des groupements végétaux de la région parisienne. *Sedes éd.*

Bournerias M. & Bock C. & Arnal G. (2002). - Les groupements végétaux de la région parisienne. *Belin éd.*

Campan R. & Scapini F. (2002). - Ethologie : Approche systématique du comportement. *De Boeck Université éd.*

Cassier P. (2002). - Rythmes biologiques et rythmes astronomiques. *Ellipse éd.*

Collectif (Pour la Science). (1995). - Les maladies émergentes. *Belin / Pour la Science éd.*

Collectif (Soc. Bot. du Centre-Ouest). (1980). - La vie dans les dunes du Centre-Ouest, flore et faune. *Bulletin de la Société botanique du Centre-Ouest.*

Combes C. (2001) - Interactions durables, Écologie et évolution du parasitisme. *Dunod éd.*

Crubezy E., Braga J. & Larrouy G. (2002). - Anthropobiologie. *Masson éd.*

Dajoz R. (1974). - Dynamique des populations. *Masson éd.*

Dajoz R. (2000 et 2006). - Précis d'écologie. *Dunod éd.*

Davet P. (1996). - Vie microbienne du sol et production végétale. *INRA éd.*

De Cormis L. & Bonte J. (1981). - Les effets du dioxyde de soufre sur les végétaux supérieurs. *Masson éd.*

Delpéch R. & coll. (1986). - Typologie des stations forestières. *IDF éd.*

Deruelle S. & Lallement R. (1983). - Les lichens témoins de la pollution. *Vuibert éd.*

Duchauffour Ph. (1993). - Abrégé de Pédologie. *Masson éd.*

Durrieu G. (1993). - Ecologie des Champignons. *Masson éd.*

Ecologistes de l'Euzière. (2004). - Le feu dans la nature : mythes et réalité. *Les écologistes de l'Euzière éd.*

Ecologistes de l'Euzière & Martin P. (1997). - La nature méditerranéenne en France. *Delachaux & Niestlé éd.*

Ecologistes de l'Euzière. (1998). - En quête d'insectes. Ecolodoc n°2. *Les écologistes de l'Euzière éd.*

Ecologistes de l'Euzière. (1998). - A la rencontre des plantes. Ecolodoc n°4. *Les écologistes de l'Euzière éd.*

Ecologistes de l'Euzière. (2002). - Goûtez la géologie. Ecolodoc n°6. *Les écologistes de l'Euzière éd.*

Faure Cl. & coll. (2003). - Ecologie : approche scientifique et pratique. *Lavoisier Tec & Doc éd.*

Fischesser B. (1970). - La vie de la forêt. *Horizons de France éd.*

Fontan J. (2003). - Les pollutions de l'air : Les connaître pour les combattre. *Vuibert éd.*

Frontier S. & coll. (1993 et 2004). - Structures et fonction des écosystèmes. *Masson éd.*

Giraldeau L. A., Cezilly F. & Danchin E. (2005). - Ecologie comportementale : cours et questions de réflexion. *Dunod éd.*

Gobat J. M., Aragno M. & Matthey W. (1998). - Le sol vivant, bases de pédologie, biologie des sols. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes éd.*

- Godron M. (1993). - Ecologie de la végétation terrestre. *Masson éd.*
- Henry C. (2001). - Biologie des populations animales et végétales. *Dunod éd.*
- Lacoste A. & Salanon R. (1969). - Eléments de biogéographie. *Nathan éd.*
- Lepoivre P. (2003). - Phytopathologie. *De Boeck & Presses agronomiques de Gembloux éd.*
- Levêque Ch. & Monoulou J.-C. (2001). - La biodiversité : dynamique biologique et conservation. *Dunod éd.*
- Lodé T. (2001). - Les stratégies de reproduction des animaux. *Dunod éd.*
- MacFarland D. (2001). - Le comportement animal : Psychobiologie, éthologie et évolution. *De Boeck Université éd.*
- Mathey W. & coll. (1984). - Manuel pratique d'écologie. *Payot éd.*
- Meunier F. (2005). - Domestiquer l'effet de serre : Energies et développement durable. *Dunod éd.*
- Ozenda P. (1986). - La cartographie écologique et ses applications. *Masson éd.*
- Ozenda P. (1995). - Les végétaux dans la biosphère. *Doin éd.*
- Pesson P. & coll. (1980). - Actualités d'écologie forestière (Sol, flore, faune). *Gauthier-Villars éd.*
- Pesson P. & coll. (1974). - Ecologie forestière. La forêt : son climat, son sol, ses arbres, sa faune. *Gauthier-Villars éd.*
- Pesson P. & coll. (1980). - La pollution des eaux continentales. *Gauthier-Villars éd.*
- Pietrasanta Y. & Bondon D. (1994). - Le lagunage écologique. *Economica éd.*
- Ramade F. (1979). - Ecotoxicologie. *Masson éd.*
- Ramade F. (1987). - Les catastrophes écologiques. *McGraw-Hill éd.*
- Ramade F. (1989). - Eléments d'écologie : Ecologie appliquée. *McGraw-Hill éd.*
- Ramade F. (2005). - Eléments d'écologie : Ecologie appliquée. *Dunod éd.*
- Ramade F. (1984). - Eléments d'écologie : Ecologie fondamentale. *McGraw-Hill éd.*
- Ramade F. (2003). - Eléments d'écologie : Ecologie fondamentale. *Dunod éd.*
- Ramade F. (2006). - Des catastrophes naturelles. *Dunod éd.*
- Ricklefs R. & Miller G. L. (2005). - Ecologie. *De Boeck éd.*
- Thomas F., Renaud F. & Guegan J.-F. (2005). - Parasitism et ecosystem. *Oxford University Press éd.*
- Thomas F., Renaud F. & Guegan J.-F. (2007) – Ecologie et évolution des systèmes parasités. *De Boeck éd.*

10 - Biologie et Physiologie végétales

- André J.-P. (2002). - Organisation vasculaire des Angiospermes. *INRA éd.*
- Bournerias M. & Bock C. (1993). - Le génie végétal. *Nathan éd.*
- Camefort H. (1984). - Morphologie des végétaux vasculaires, cytologie, anatomie, adaptations. *Doin éd.*
- Camefort H. (1997). - Reproduction et biologie des végétaux supérieurs. *Doin éd.*
- Camefort H. & Boué H. (1969). - Reproduction et biologie des principaux groupes végétaux : Les Cormophytes ou Archégonates. *Doin éd.*
- Chadefaud M. (1960). - Traité de Botanique systématique. I. Les végétaux non vasculaires, cryptogamie. *Masson éd.*

- Chadefaud M. & Emberger L. (1960). - Traité de Botanique systématique. II. Les végétaux vasculaires. *Masson éd.*
- Champagnol F. (1984). - Eléments de physiologie de la vigne et de viticulture générale. *F. Champagnol Saint-Gely-du-Fesc éd.*
- Chaussat R. & Le Deunff Y. (1975). - La germination des semences. *Gauthier-Villars éd.*
- Chaussat R. & coll. (1980). - La multiplication végétative des plantes supérieures. *Gauthier-Villars éd.*
- Christmann C. (1960). - Le parasitisme chez les plantes. *Armand Colin éd.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.). (1978). - Aspects physiologiques de l'halophilie et de la résistance aux sels. *Bulletin de la Société botanique Française, T 125.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.). (1979). - Les relations hôtes parasites. *Bulletin de la Société botanique Française, T 126.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.). (1980). - Cécidologie et morphogénèse pathologique. *Bulletin de la Société botanique Française, T 127.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.). (1987). - Données actuelles sur les tissus conducteurs. *Bulletin de la Société botanique Française, T 134.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.). (1996). - Biologie et conservation du pollen : aspects fondamentaux et appliqués. *Bulletin de la Société botanique Française, T 143.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.). (1996). - Les plantes actinorhiziennes. *Bulletin de la Société botanique Française, T 143.*
- Collectif (CNRS). (1979). - La physiologie de la floraison. *CNRS éd.*
- Côme D. (1992). - Les végétaux et le froid. *Hermann éd.*
- De Reviers B. (2003). - Biologie et phylogénie des algues, tomes 1 & 2. *Belin éd.*
- Dommergues Y., Duhoux E. & Diem H. G. (1999). - Les arbres fixateurs d'azote. *IRD éd.*
- Doré C. et al (2006) – Histoire et amélioration de 50 plantes cultivées. Coll Savoir faire *INRA éd.*
- Duhoux E. & Nicole M. (2004). - Associations et interactions chez les plantes. *Dunod éd.*
- Farineau J. & Morot-Gaudry J.F. (2006) La photosynthèse, processus physiques, moléculaires et physiologiques. Coll Synthèses. *Inra éd.*
- Gorenflot R. & Guern M. (1990). - Organisation et biologie des Thallophytes. *Doin éd.*
- Gallais A. & Ricroch A. (2007) – Plantes transgéniques : faits et enjeux Coll Synthèses. *De Boeck éd.*
- Grignon C. (1989). - Les transports chez les végétaux. APBG n°1. *APBG éd.*
- Hartmann Cl. (1992). - La sénescence des végétaux. *Hermann éd.*
- Heller R. & coll. (1998). - Physiologie végétale, Abrégé Tome 1 : Nutrition. *Masson éd.*
- Heller R. & coll. (2000). - Physiologie végétale, Abrégé Tome 2 : Développement. *Masson éd.*
- Hopkins W. G. (2003). - Physiologie végétale. *De Boeck éd.*
- Kahn A. (1996). - Les plantes transgéniques en agriculture. *John Libbey Eurotext éd.*
- Laberche J. C. (1999 et 2004). - Biologie végétale. *Dunod éd.*
- Larcher W. (2003) – Physiological plant ecology. *Springer éd.*
- Laval-Martin D. & Mazliak P. (1995). - Physiologie végétale, I. Nutrition. *Hermann éd.*
- Mazliak P. (1982). - Physiologie végétale. II. Croissance et développement. *Hermann éd.*
- Meyer S., Reeb C. & Bosdeveix R. (2004). - Botanique : biologie et physiologie végétale. *Maloine éd.*

- Monties B. & coll. (1980). - Les Polymères végétaux. *Gauthier-Villars éd.*
- Morot –Gaudry J.F. & Briat J.F. (2004) – La génomique en biologie végétale. *INRA éd.*
- Moyse A. & coll. (1997). - Processus de la production primaire végétale. *Gauthier-Villars éd.*
- Nultsch W. (1998). - Botanique générale. *De Boeck Université éd.*
- Pesson P. & Louveaux J. (1984). - Pollinisation et productions végétales. *INRA éd.*
- Prat R. (1993). - L'expérimentation en physiologie végétale. *Hermann éd.*
- Raven P. H., Evert R. F. & Eichhorn S. E. (2007). - Biologie végétale *De Boeck Université éd.*
- Richter G. (1993). - Métabolisme des végétaux. Physiologie et biochimie. *Presses Polytechniques et Universitaires Romandes éd.*
- Robert D. & Roland J.-C. (1990). - Biologie végétale. I. Organisation cellulaire, caractéristiques et stratégie évolutive des plantes. *Doin éd.*
- Robert D. & Catesson A. M. (2000). - Biologie végétale. II. Organisation végétative. *Doin éd.*
- Robert D. & coll. (2000). - Biologie végétale. III. Reproduction. *Doin éd.*
- Roland J. -C. & Vian B. (2000). - Atlas de biologie végétale, tomes 1 & 2. *Dunod éd*
- Selosse M.-A. (1996). - Les cyanobactéries, d'étonnants procaryotes autotrophes. *Biologie-Géologie n°3 (p481-530). APBG éd.*
- Selosse M.-A. (2000). - La symbiose. Structures et fonctions, rôles écologiques et évolutifs. *Vuibert éd.*
- Selosse M. A. (2000). - Les algues de la zone intertidale et leur zonation : des idées reçues aux données écologiques. *APBG Bull. trim. 4/ 2000 (p773-802). APBG éd.*
- Semal J. & coll. (1989). - Traité de Pathologie végétale. *Presses Académiques de Gembloux éd.*
- Stengel P. & Gelin S. (1998). - Sol, interface fragile. *INRA éd.*
- Speranza A. et Calzoni G. L. (2005). - Atlas de la structure des plantes : Guide de l'anatomie microscopique des plantes vasculaires en 285 photos. *Belin éd.*
- Taiz L. & Zeiger E. (1998 et 2006). - Plant physiology. *Sinauer associates, Inc., Publishers.*
- Tcherkez G. (2001). - Evolution de l'architecture florale des angiospermes. *Dunod éd.*
- Thomas F., Guegan J.F. & Renaud F (2007) - Ecologie et évolution des systèmes parasités *De Boeck éd.*
- Tourte Y. (2002). - Génie génétique et biotechnologies : concepts, méthodes et applications agronomiques. *Dunod éd.*
- Tourte Y. & coll. (2005). - Le monde des végétaux : organisation , physiologie et génomique. *Dunod éd.*
- Zryd J. P. (1988). - Cultures de cellules, tissus et organes végétaux. *Presses Polytechniques Romandes éd.*

11 - Agriculture, Sylviculture

- Collectif (Soc. Bot. Fr.). (1986). - La domestication chez les végétaux. *Bulletin de la Société botanique Française, T 133.*
- Domergues Y. & Mangelot F. (1970). - Ecologie microbienne du sol. *Masson éd.*
- Grisvard P. & Chaudun V. (1987). - Le bon jardinier, tomes I & II. *Flammarion éd.*
- Harlan J. R. (1987). - Les plantes cultivées et l'Homme. *Presses Universitaires Françaises éd.*

- Johnson H. (1982). - Le livre international de la Forêt. *Nathan éd.*
- Philipps R. (1981). - Les Arbres. *Solar éd.*
- Pitra M. & Foury Cl. (2003). - Histoires de légumes. *INRA éd.*
- Collectif sous la direction de Scriban R. (1993). - Biotechnologie. *Lavoisier Tec & Doc éd.*
- Soltner D. (1990). - Phytotechnie générale. Les bases de la production végétale, I : Le sol. *Sciences et Techniques Agricoles éd.*
- Soltner D. (1992). - Phytotechnie générale. Les bases de la production végétale, II : Le climat : météorologie , pédologie, bioclimatologie. *Sciences et Technique Agricoles éd.*
- Soltner D. (1990). - Phytotechnie spéciale, Les grandes productions végétales. Céréales, plantes sarclées, prairies. *Sciences et Technique Agricoles éd.*
- Viennot-Bourgin G. (1949). - Champignons parasites des plantes cultivées, tomes I & II. *Masson éd.*

12 - Morphologie, Anatomie, Systématique

- Bourelly P. (1966). - Les Algues d'eau douce, I. Algues vertes. *Boubée & Cie éd.*
- Bourelly P. (1968). - Les Algues d'eau douce II. Algues jaunes et brunes. *Boubée & Cie éd.*
- Bourelly P. (1968). - Les Algues d'eau douce III. Algues bleues et rouges. *Boubée & Cie éd.*
- Collectif (Soc. Fr. d'Orchidophilie) sous la direction de Bournérias M. & Prat D. (2005). - Les orchidées de France, Belgique et Luxembourg. *Parthénopée éd.*
- Bracegirdle B. & Miles P. H. (1985). - An Atlas of Plant Structure, Vol. 1 & 2. *Heinemann Educ .Books London.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.). (1986). - Progrès récents en Lichénologie. *Bulletin de la Société botanique Française, T 133.*
- Collectif (Soc. Bot. Fr.). (1989). - Potentialités biologiques des Cyanobactéries. *Bulletin de la Société botanique Française, T 136.*
- Gaussen H. & Leroy J.-F. (1982). - Précis de Botanique, II. Végétaux supérieurs. *Masson éd.*
- Gayral P. (1975). - Les Algues. *Doin éd.*
- Gillet M. (1980). - Les Graminées fourragères. *Gauthier-Villars éd.*
- Guignard J.-L. (1986). - Abrégé de Botanique. *Masson éd.*
- Ozenda P. (2000 et 2007). - Les végétaux : Organisation et diversité biologique. *Dunod éd.*
- Roland J. C. & Roland F. (2001). - Atlas de Biologie végétale, II. Organisation des plantes à fleurs. *Dunod éd.*
- Roland J. C. & Vian B. (2004). - Biologie végétale. I. Organisation des plantes sans fleurs. *Dunod éd.*
- Vallade J. (2002). - Structure et développement de la plante. Morphogenèse et biologie de la reproduction des Angiospermes. *Dunod éd.*
- Judds W. S & coll. (2001). - Précis de systématique. *De Boeck Université éd.*

13- Flores, Illustrations

- Bonnier G. (1934). - Grande Flore complète (12 vol, manquent 5 et 9). *Belin éd.*

- Bonnier G. & De Layens G. (1986). - Flore complète portative de la France, de la Suisse et de la Belgique. *Belin éd.*
- Claustres G. & Lemoine C. (1980). - La végétation des côtes Manche-Atlantique. *Ouest-France éd.*
- Claustres G. & Lemoine C. (1985). - Connaître et reconnaître la flore et la végétation des montagnes. *Ouest-France éd.*
- Coste H. (l'abbé). (1937). - Flore descriptive et illustrée de la France, de la Corse et des contrées limitrophes, tomes 1 à 3. *Librairie des Sciences et des Arts éd.*
- Debazac E. F. (1964). - Manuel des Conifères. *Ecole Nationale des Eaux et Forêts éd.*
- Douin M. (non daté). - Nouvelle flore des Mousses et des Hépatiques. *Librairie Générale Enseignement éd.*
- Edlin H. & Nimmo M. (1964). - Les arbres. *Bordas éd.*
- Favarger Cl. & Robert P.-A. (1956). - Flore et végétation des Alpes, Tomes I & 2. *Delachaux et Niestlé éd.*
- Fournier P. (1977). - Les quatre flores de France. *Lechevalier éd.*
- Guittonneau G.-G. & Huon A. (1983). - Connaître et reconnaître la flore et la végétation, méditerranéennes. *Ouest-France éd.*
- Krausel R. & coll. (non daté). - Flore d'Europe, I. Plantes herbacées et sous-arbrisseaux. *SLF éd.*
- Krausel R. & coll. (non daté). - Flore d'Europe, II. Arbrisseaux, arbustes et arbres. *SLF éd.*
- Lemoine C. & Claustres G. (1981). - Les fleurs des eaux et des marais. *Ouest-France éd.*
- Philipps R. (1982). - Les arbres. *Solar éd.*
- Poelt J. & Jahn H. (non daté). - Champignons d'Europe. *Payot éd.*
- Prelli R. (1992). - Guide des fougères et plantes alliées. *Lechevalier éd.*
- Rameau J. C. (?). - Flore forestière française, I. Plaines & collines.
- Rol R. & coll. (1962). - Flore des arbres, I. Plaines et collines. *Flammarion éd.*
- Rol R. & coll. (1963). - Flore des arbres, II. Montagnes. *Flammarion éd.*
- Rol R. & coll. (1968). - Flore des arbres, III. Région méditerranéenne. *Flammarion éd.*
- Rol R. & coll. (1962). - Flore des arbres, IV. Essences introduites. *Flammarion éd.*
- Van Haluwyn C. & Lerond M. (1993). - Guide des Lichens. *Lechevalier éd.*

SCIENCES DE LA TERRE

1 - Ouvrages généraux

- Bal Y. & coll. (1966). - Notion de chimie pour biologistes et géologues. *Hachette éd.*
- Brahic A. & coll. (2006). - Sciences de la Terre et de l'Univers. *Vuibert éd.*
- Caron J.-M. & coll. (1995). - Comprendre et enseigner la planète Terre. *Ophrys GAP éd.*
- Cazenave A. & Massonnet D. (2004). - La Terre vue de l'espace. *Belin / Pour la Science éd.*
- Collectif (APBG). (1989). - Terre 88. APBG Biologie - Géologie n° 2. *APBG éd.*
- Collectif (CNRS). (1990). - La Terre : De l'observation à la modélisation. Le Courrier du CNRS n° 76. *CNRS éd.*

Collectif (SGF). (1984). - Des océans aux continents. (Colloque du centenaire de l'ENS de Saint-Cloud). *Bulletin de la Société géologique Française*.

Collectif (SGF). (1997). - La Terre. (Supplément au bulletin de l'APBG "biologie-géologie", n°2). *APBG éd.*

Collectif - Géochronique (BRGM/ SGF) - De 1982 à 2005 ; 2007 : De la géologie aux géosciences, mars 2007 - Le plomb, juin 2007 – Géosciences marines en France, inclusions vitreuses et volcanisme étnéen, diamants de culture, année internationale de la Planète Terre, septembre 2007 – Matière organique, décembre 2007. *BRGM*

Collectif - Les géologues (Revue officielle de l'union française des géologues) – De 2000 à 2007

Dercourt J., Le Ricou & Vrielynck B. (1993). - Atlas Tethys : Paléoenvironmental maps. *CCGM/CGMW*.

Dercourt J. & Paquet J. (1999 et 2006). - Géologie : Objets et méthodes. *Dunod éd.*

De Wewer P. & coll. (2005). - La mesure du temps dans l'histoire de la Terre SGF Enseigner les Sciences de la Terre. *SGF / Vuibert*

Foucault A. & Raoult J. F. (1988 et 2005). - Dictionnaire de Géologie. *Masson éd.*

MacKenzie W.S., Adams A.E. (1996)- Atlas d'initiation à la pétrographie. *Masson éd.*

Mattauer M. - (1998). - Ce que disent les pierres. *Belin éd.*

Nataf H. C., Sommeria J. (2000). - La physique et la Terre. *Belin / CNRS Editions*.

Pomerol Ch., Lagabrielle Y. & Renard M. (2000, 12^e éd et 2005, 13^e éd.). - Eléments de Géologie. *Dunod éd.*

Sheffield Ch. (1981). - Notre monde vu de l'espace. Voici la Terre. *Editions maritimes et d'Outre-Mer*.

Vila J. M. (2000). - Dictionnaire de la tectonique des plaques et de la géodynamique. *Gordon and Breach science publishers éd.*

Vrielynck B. & Bouysse P. (2001). - Le visage changeant de la Terre : L'éclatement de la Pangée et la mobilité des continents au cours des derniers 250 millions d'années en 10 cartes (livret + CD-ROM). *Commission de la carte Géologique du monde/CGMW*.

2 - Sédimentologie, Pétrologie et Géochimie Sédimentaire, Océanographie physique et chimique, Climatologie

Adams A. E., Mackenzie W. S. & Guilford C. (1994). - Atlas des roches sédimentaires. *Masson éd.*

Berger A. (1992). - Le climat de la Terre : un passé pour quel avenir. *De Boeck Université éd.*

Biju-Duval B. (1999). - Géologie sédimentaire. Bassins, environnements de dépôts, formation du pétrole. *Technip éd.*

Biju-Duval B. & Savoye B. (2001). - Océanologie. *Dunod éd.*

Campy M. & Macaire J.-J. (1989). - Géologie des formations superficielles. *Dunod éd.*

Chamley H. (1988). - Les milieux de sédimentation. *BRGM-Lavoisier éd.*

Chapel A. & coll. (1996). - Océans et atmosphère. *Hachette éd.*

Cojan J. & Renard M. (1999 et 2006). - Sédimentologie. *Dunod éd.*

Collectif (Pour la Science). (1984). - Cette roche nommée pétrole. *Belin / Pour la Science éd.*

- Collectif (Association des sédimentologues de France). (1989). - Dynamique et méthodes d'étude des bassins sédimentaires. *Technip éd.*
- Collectif (Bureau des longitudes). (1984). - Encyclopédie scientifique de l'univers: La Terre, les eaux, l'atmosphère. *Gauthier-Villars éd.*
- Collectif (Groupe Téthys). (1985). - Paleobiogéographie de la Téthys. *Bulletin de la Société géologique Française.*
- Collectif (Encyclopedia Universalis). (1994). - Le grand Atlas Universalis de la mer. *Encyclopedia Universalis éd.*
- Copin-Montegut G. (1996). - Chimie de l'eau de mer. *Institut Océanographique éd.*
- Deconinck JF (2006) Paléoclimats L'enregistrement des variations climatiques . Coll. Interactions SGF Vuibert.
- Gilli E. (1999). - Que sais-je : Eaux et rivières souterraines. *Presses Universitaires Françaises.*
- Gilli E., Mangan Ch. & Mudry J. (2004). - Hydrogéologie. *Dunod éd.*
- Hufty A. (2001). - Introduction à la climatologie. *De Boeck Université éd.*
- Joussaume S. (1993). - Climats d'hier à demain. *CNRS éd /CEA Science au présent.*
- Leroux M. (1996 et 2004). - La dynamique du temps et du climat. *Dunod éd.*
- Lézine A.-M. (2008) □ - Le pollen - Outil d'étude de l'environnement et du climat au Quaternaire. *Vuibert/SGF éd.*
- Margat J. (2004). - Atlas de l'eau dans le bassin méditerranéen. *CCGM/ Plan bleu/ Unesco.*
- Meyer R. (1987). - Paléoaérites et paléosols. *BRGM éd.*
- Millot G. (1964). - Géologie des argiles. *Masson éd.*
- Minster J.F. (1997). - La machine océan. *Flammarion éd.*
- Minster J.F. (1997). - Les océans. *Flammarion éd.*
- Nicolas A. (2004). - 2050 : rendez-vous à risques. *Belin éd.*
- Nesme-Ribe E. & Thullier G. (2002). - Histoire solaire et climatique. *Belin / Pour la Science éd.*
- Rotaru M. & coll. (2006). - Les climats passés de la Terre. *SGF / Vuibert éd.*
- Rouchy JM & Blanc -Valleron MM (2006) - Les évaporites. Matériaux singuliers, milieux extrêmes. Coll. Interactions SGF Vuibert
- Ruddiman W. F. (2000). - Earth's climate : past and future. *Freeman éd.*
- Tribovillard N., Baudin F et Trichet J (2007) - Géologie de la matière organique SGF Vuibert

3 - Géochimie, Minéralogie

- Albarede F. (2001). - La géochimie. *Gordon and Breach Science Publishers éd.*
- Allègre C.-J. & Michard G. (1973). - Introduction à la Géochimie. *Presses Universitaires Françaises éd.*
- Allègre Cl. J. (2005). - Géologie isotopique. *Belin éd.*
- Baronnet A. (1988). - Minéralogie. *Dunod éd.*
- Brunet F., Andraut D & Chazot G. (2007) La terre interne ; roches et matériaux en conditions extrêmes. *SGF / Vuibert ed.*

Roubault M. (1963). - Détermination des minéraux des roches au microscope polarisant. *Lamarre-Poinat éd.*

Treuil M. & Hagemann R. (1998). - Introduction à la géochimie et ses applications, tome 1 & 2. *CEA / UPMC éd.*

4 - Géographie physique, Géomorphologie

Coque R. (1977). - Géomorphologie. *Armand Colin éd.*

Desfontaines P. & Delamarre M. (1955). - Atlas aérien de la France, I : Alpes, Vallée du Rhône, Provence, Corse. *Gallimard éd.*

Desfontaines P. & Delamarre M. (1956). - Atlas aérien de la France; II : Bretagne, Val de Loire, Sologne et Berry, Pays Atlantiques entre Loire et Gironde. *Gallimard éd.*

Desfontaines P. & Delamarre M. (1958). - Atlas aérien de la France; III : Pyrénées, Languedoc, Aquitaine, Massif Central. *Gallimard éd.*

Desfontaines P. & Delamarre M. (1962). - Atlas aérien de la France; IV : Paris et Vallée de la Seine, Ile de France, Beauce et Brie, Normandie, de la Picardie à la Flandre. *Gallimard éd.*

Desfontaines P. & Delamarre M. (1964). - Atlas aérien de la France; V : Alsace, Vosges, Lorraine, Ardennes et Champagne, Morvan et Bourgogne, Jura. *Gallimard éd.*

Lacoste Y. (1985). - Nouvel Atlas des formes du relief. *Nathan éd.*

Peulvast J. P. & Vanney J. R. (2001). - Géomorphologie structurale Terre Corps planétaires solides, Tome 1 : Relief et structure. *Gordon & Breach Science Publisher / SGF éd.*

Peulvast J. P. & Vanney J. R. (2001). - Géomorphologie structurale Terre Corps planétaires solides, Tome 2 Relief et géodynamique. *Gordon & Breach Science Publisher / SGF éd.*

5- Géophysique, Géologie structurale

Collectif (Pour La Science). (1982). - Les tremblements de terre. *Belin / Pour la Science éd.*

Collectif sous la direction de Avouac J. P. & De Wever P. (2002). - Himalaya –Tibet. : le choc des continents. *MNHN / CNRS éd.*

Boillot G. & Coulon C. (1998). - La déchirure continentale et l'ouverture océanique. *Gordon and Breach Science Publisher éd.*

Boillot G. & coll. (1984). - Les marges continentales actuelles et fossiles autour de la France. *Masson éd.*

Boillot G. (1996). - La dynamique de la lithosphère. *Masson éd.*

Boillot G., Huchon Ph. & Lagabrielle Y. (2003). - Introduction à la géologie. La dynamique de la lithosphère. *Dunod éd.*

Cara M. (1989). - Géophysique. *Dunod éd.*

Cazenave A. & Feigl K. (1994). - Formes et mouvements de la Terre Satellites et géodésie. *Belin / CNRS éd.*

Choukroune P. (1995). - Déformations et déplacements dans la croûte terrestre. *Masson éd.*

Debelmas J. & Mascle G. (1991 et 2008). - Les grandes structures géologiques. *Masson éd.*

Dewaele E. & Sanloup G. (2005). - L'intérieur de la Terre et des planètes. *Belin éd.*

Dubois J. & Diamant M. (1997). - Géophysique. *Masson éd.*

Jolivet L. & Nataf H.-C. (1998). - Géodynamique. *Dunod éd.*

Jolivet L. (1995). - La déformation des continents. Exemples régionaux. *Hermann éd.*

Juteau T. & Maury R. (1997). - Géologie de la croûte océanique. *Masson éd.*

Lagabrielle Y. (2005). - Le visage sous marin de la Terre. Eléments de géologie océanique. *CCGM / CNRS éd.*

Lallemant S. (1999). - La subduction océanique. *Gordon & Breach Science Publishers éd.*

Lallemant S. & coll. (2005). - Convergence lithosphérique. *SGF / Vuibert éd.*

Lambert J. & coll. (1997). - Les tremblements de terre en France. *BRGM éd.*

Larroque C. et Virieux J. (2001). - Physique de la Terre solide : observations et théories. *Gordon & Breach Science Publishers éd.*

Lemoine M., De Graciansky P. Ch. & Tricart P (2000). - De l'océan à la chaîne de montagnes. *Gordon & Breach Science Publishers éd.*

Lliboutry L. (1998). - Géophysique et Géologie. *Masson éd.*

Machetel P. (2008) - Les pulsations de la terre - Dynamique du manteau. *Vuibert/SGF éd.*

Madariaga R. & Perrier G. (1991). - Les tremblements de terre. *CNRS éd.*

Mattauer M. (1973). - Les déformations des matériaux de l'écorce terrestre. *Hermann éd.*

Mercier J. & Vergely P. (1992 et 2004). - Tectonique. *Dunod éd.*

Montagner J.-P. (1998). - Sismologie. La musique de la Terre. *Hachette éd.*

Nicolas A. (1990). - Les montagnes sous la mer. *BRGM éd.*

Nicolas A. (1989). - Principes de Tectonique. *Masson éd.*

Poirier J. P. (1996). - Le noyau de la Terre. *Flammarion éd.*

Poirier J. P. (1991). - Les profondeurs de la Terre. *Masson éd.*

Scanvic J. Y. (1985). - Utilisation de la Télédétection dans les Sciences de la Terre. *BRGM éd.*

Vogt J. (1979). - Les tremblements de Terre en France. Mémoire du BRGM n° 96. *BRGM éd.*

Westphal M., Whitechurch H. & Munsch M. La tectonique des plaques. *Gordon & Breach Science Publisher / SGF éd.*

6 - Géologie appliquée et environnement

Antoine P. & Fabre D. (1980). - Géologie appliquée au Génie Civil. *Masson éd.*

Barrabé L. & Feys R. (1965). - Géologie du charbon et des bassins houillers. *Masson éd.*

Blieffert & Perraud (2001) – Chimie de l'environnement : air, eau, sols, déchets. *De Boeck éd.*

Bodolle J. & Margat J. (1980). - L'eau souterraine en France. *Masson éd.*

Castagny G. (1982). - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. *Dunod Université éd.*

Chamley H. (2002). - Environnements géologiques et activités humaines. *Vuibert éd.*

Collectif (SGF). (1985). - La géologie au service des hommes. (Entretiens de Saint-Cloud). *Presses Universitaires Françaises.*

Collectif (BRGM). (1978). - La géothermie en France. BRGM éd.

Collectif (SGF). (1987). - Les techniques pétrolières. *Bulletin de la Société géologique Française*.

Collectif (CRDP). (1991). - L'eau de Paris. CRDP éd.

Goguel J. (1975). - La Géothermie. *Doin éd.*

Hoffert M. (2008) - □ Les nodules polymétalliques dans les grands fonds océaniques - Une extraordinaire aventure minière et scientifique sous-marine. *Vuibert/SGF éd.*

Nahon D., Bottero J.-Y., Bourlès D., Hamelin B. et Thouveny N. (2008) - Géosciences de l'environnement - Traceurs isotopiques, pédologiques, magnétiques. *Vuibert/SGF éd.*

Pelissionnier H. (2001). - Réflexions sur la métallogénie. *Les ouvrages de l'industrie minière éd.*

Perrodon A. (1985). - Géodynamique pétrolière. Genèse et répartition des gisements d'hydrocarbures. *Masson éd.*

Perrodon A. (1985). - Histoire des grandes découvertes pétrolières. *Masson / Elf Aquitaine éd.*

Routhier P. (1963). - Les gisements métallifères, tomes I & II. *Masson éd.*

Lefevre Ch ; Schneider J. (2002) - Risques naturels majeurs ; Coll Geosciences Gordon & Breach Science Publisher éd.

Tarits C. & coll. (2002). - Géologie de l'environnement. *Dunod éd.*

7 - Géologie régionale

Agard P. & Lemoine M. (2003). - Visage des Alpes : structure et évolution géodynamique (Fascicule + CD). *CGMW éd.*

Autran A. (1980). - Evolutions géologiques de la France. *BRGM éd.*

Bousquet J. & Vignard D. (1980). - Découverte géologique du Languedoc Méditerranée. *BRGM éd.*

Bril H. (1988). - Découverte géologique du Massif Central. *BRGM éd.*

Brousse R. & Lefevre C. (1990). - Le volcanisme en France et en Europe limitrophe. *Masson éd.*

Cabanis B. (1987). - Découverte géologique de la Bretagne. *BRGM éd.*

Cavelier C. & Lorenz J. (1987). - Aspect et évolution géologiques du Bassin Parisien. *APBG éd.*

Collectif (1980). - Geology of the european countries : Austria, Federal Republic of Germany, Ireland, The Netherlands, Switzerland, United Kingdom. *Dunod éd.*

Collectif (1980). - Geology of the european countries : Denmark, Finland, Iceland, Norway, Sweeden. *Dunod éd.*

Collectif (1980). - Géologie des pays européens : France, Belgique, Luxembourg. *Dunod éd.*

Collectif (1980). - Géologie des pays européens : Espagne, Grèce, Italie, Portugal, Yougoslavie. *Dunod éd.*

Collectif (APBG) (2003). - Les Alpes...à la recherche d'indices (Livret + CD). *APBG éd.*

Debelmas J. (1979). - Découverte géologique des Alpes du Nord. *BRGM éd.*

Debelmas J. (1982). - Découverte géologique des Alpes du Sud. *BRGM éd.*

Debelmas J. (1974). - Géologie de la France, tomes 1 & 2. *Doin éd.*

Debrand-Passard S. & coll. (1984). - Synthèse géologique du Sud Est de la France, I : Stratigraphie et paléogéographiell : Atlas. *BRGM éd.*

Dercourt J. (2002). - Géologie et géodynamique de la France. *Dunod éd.*

Gauthier A. (1983). - Roches et paysages de la Corse (Parc nat. rég.). *BRGM éd.*

Guille G., Goutière G. & Sornein J.-F. (1993). - Les atolls de Mururoa et de Fangataufa (Polynésie française), tome I. *DIRCEN / CEA éd.*

Jolivet L., Brun J.-P., Meyer B., Prouteau G., Rouchy J.-M., Scaillet B. (2008) - □ Géodynamique méditerranéenne. *Vuibert/SGF éd.*

Lemoine M. (1990). - La tectonique des plaques et les Alpes. *APBG éd.*

Marthaler M. (2001). - Le Cervin est-il africain. *Dilisco éd.*

Megnin C. & coll. (1980). - Synthèse géologique du Bassin Parisien. Atlas Mémoire du *BRGM éd.*

Mirouse R. (1988). - Découverte géologique des Pyrénées occidentales. *BRGM éd.*

Pomerol Ch. (1988). - Découverte géologique de Paris et de l'Ile de France. *BRGM éd.*

Pomerol Ch. & coll. (?). - Guides géologiques régionaux (collection complète). *Masson éd.*

Richet P. (2003). - Guide des volcans de France. *Belin éd.*

Ricour J. & coll. (1987). - Découverte géologique du Nord de la France. *BRGM éd.*

Roure F., Heitzmann P. & Polino R. (1990). - Deep structure of the Alps. *SGF éd.*

Sabouraud Ch. (2004). - Guide de la géologie en France. *Belin / SGF éd.*

Souriau A. & Sylvander M. (2004). - Les séismes dans les Pyrénées. *Loubatières éd.*

8 - Magmatisme, Métamorphisme

Bard J.-P. (1980). - Microtextures des roches magmatiques et métamorphiques. *Masson éd.*

Barbey P. & Libourel G. (2004). - Les relations de phases et leurs applications : des sciences de la terre aux matériaux (Livre + CD). *Gordon & Breach Science Publisher / SGF éd.*

Bardintzeff J.-M. (1999 et 2006). - Volcanologie. *Dunod éd.*

Bardintzeff J.-M. (1993). - Volcans. *Armand Colin éd.*

Best M. G. & Christiansen E. H. (2001). - Igneous petrology. *Blackwell Science éd.*

Bonin B. (1982). - Les granites des complexes annulaires. *BRGM éd.*

Bonin B. (1982). - Pétrologie endogène. *Dunod éd.*

Bonin B. (1982 et 2004). - Magmatisme et roches magmatiques. *Dunod éd.*

Bourdier J.-L. (1994). - Le volcanisme : Manuel et Méthodes. *BRGM éd.*

Collectif (Pour La Science) (1984). - Les volcans. *Belin éd.*

Collectif sous la direction de De Wever P. (2003). - Le volcanisme : Cause de mort et source de vie. *Vuibert / MNHN éd.*

Collectif (Soc. géol.). (1993). - Pleins feux sur les volcans. *SGF / APBG éd.*

Kornprobst J. (1994). - Les roches métamorphiques et leur signification géodynamique. *Masson éd.*

Krafft M. (1974). - Guide des volcans d'Europe et des Canaries. *Delachaux & Niestlé éd.*

Lameyre J. (1975). - Roches et minéraux, tome I : Les matériaux. *Doin éd.*

Lameyre J. (1975). - Roches et minéraux, tome II : Les formations. *Doin éd.*

Lameyre J. (1986). - Roches et minéraux : Matériaux de la Terre et témoins de son histoire. *Doin éd.*

Mackenzie W. S., Donaldson C. H. & Guilford C. (1995). - Atlas des roches magmatiques. *Masson éd.*

Marre J. (1982). - Méthodes d'analyse structurale des granitoïdes. *BRGM éd.*
Yardley B. W. D., Mackenzie W. S & Guilford C. (1995). - Atlas des roches métamorphiques. *Masson éd.*

9 - Sciences de l'univers

Acker A. (2005). - Astronomie-Astrophysique Introduction. *Dunod éd.*
Allègre Cl. J. (1985). - De la pierre à l'étoile. *Fayard éd.*
Audouze J. (1989). - Aujourd'hui l'Univers Planètes, trous noirs, soleils, galaxies. *Belfond éd.*
Brahic A. (2002). - Planètes et satellites. *Vuibert éd.*
Collectif (Encyclopedia Universalis). - Atlas Universalis. *Encyclopedia Universalis éd.*
Collectif sous la direction de Riser J. (1999). - Le quaternaire : géologie et milieux naturels. *Dunod éd.*
De la Cotardière Ph. (1991). - Astronomie. *Larousse éd.*
Delsemme A. H., Pecker J.-C. & Reeves H. (?). - Pour comprendre l'Univers. *Editions universitaires.*
Encrenaz Th. (2000). - Atmosphères planétaires ; origine et évolution. *Belin / CNRS éd.*
Encrenaz Th. (2004). - A la recherche de l'eau dans l'univers. *Belin éd.*
Gargaud M. & coll. (2005). - Des Atomes aux planètes habitables. *Presses Univ. de Bordeaux éd.*
Gargaud M. & coll. (2005). - L'environnement de la Terre primitive. *Presses Univ. de Bordeaux éd.*
Gargaud M. & coll. (2003). - Les traces du vivant. *Presses Universitaires de Bordeaux éd.*
Seguin M. & Villeneuve B. (2002). - Astronomie et astrophysique (Livre + CD). *De Boeck Université éd.*
Pecker J.-C. (1992). - Le soleil est une étoile. *Presses Pocket éd.*

10 -Stratigraphie

Elmis S. & Babin C. (1994 et 2006). - Histoire de la Terre. *Colin éd.*
Homewood P., Mauriaud P. & Lafont P. (2000). - Vade-mecum de la stratigraphie séquentielle. *Ed. Elf.*
Pomerol Ch. (1973). - Stratigraphie et Paléogéographie. Ere Cénozoïque. *Doin éd.*
Pomerol Ch. (1975). - Stratigraphie et Paléogéographie. Ere Mésozoïque. *Doin éd.*
Pomerol Ch. & Babin C. (1975). - Stratigraphie et Paléogéographie. Ere Paléozoïque. *Doin éd.*
Pomerol Ch. & coll. (1987). - Stratigraphie : Méthodes, Principes, Applications. *Doin éd.*

11 -Paléontologie

Babin C. (1991). - Principes de paléontologie. *Colin éd.*
Bignot G. (1988). - Micropaléontologie. *Dunod éd.*
Bignot G. (2001). - Introduction à la micropaléontologie. *Dunod éd.*
Chaline J. (1985). - Histoire de l'Homme et des climats du Quaternaire. *Doin éd.*
Chaline J. (1987). - Paléontologie des Vertébrés. *Dunod éd.*
Chaline J. & Marchand D. (2002). - Les merveilles de l'évolution. *Editions Universitaires de Dijon.*
Collectif (Pour La Science). (1985). - Les animaux disparus. *Belin éd.*
Collectif (Pour La Science). (1991). - Les fossiles, témoins de l'évolution. *Belin éd.*

Collectif (Dossier La Recherche). (2005). - Histoire de la vie. Dossier La Recherche n°19 (juillet 2005). *La Recherche éd.*

De Bonis L. (2000). - La famille de l'Homme. *Belin / Pour la Science éd.*

Emberger L. (1968). - Les plantes fossiles dans leurs rapports avec les végétaux vivants. *Masson éd.*

Enay R. (1990). - Paléontologie des invertébrés. *Dunod éd.*

Fischer J. C. (1990). - Fossiles de France et des régions limitrophes. *Masson éd.*

Jaeger J.-J. (1996). - Les mondes fossiles. *Odile Jacob éd.*

Lethiers F. (1998). - Evolution de la biosphère et événements géologiques. *Gordon and Breach Science Publishers éd.*

Picq P. & Coppens Y. (2001). - Aux origines de l'humanité, T1 : Le propre de l'homme. *Fayard éd.*

Picq P. & Coppens Y. (2001). - Aux origines de l'humanité, T2 : De l'apparition de la vie à l'homme moderne. *Fayard éd.*

LISTE DES CARTES MISES A LA DISPOSITION DES CANDIDATS LORS DES EPREUVES ORALES	
Documents généraux	
Le visage changeant de la Terre + CD Rom. L'éclatement de la pangée et la mobilité des continents. Vrielinck B. & Bouysse P. – CCGM	
Le visage sous-marin de la Terre. Eléments de géologie océanique. Livret + CD Rom Y. Lagabriele CCGM/CNRS	
Le visage des Alpes: structure et évolution géodynamique. Agard P & Lemoine M. CCGM	
Atlas de l'eau dans le bassin méditerranéen Margat J . - CCGM - Plan bleu	
Atlas Tethys Palaeoenvironmental maps. Dercourt & al CCGM	
Coupe crustale des Alpes occidentales-Transect Ile Crémieu -Torino - GéoFrance 3D	
Echelle des temps géologiques. Ed 2004	
Explanatory note to the international stratigraphic Chart	
Cartes de la France	
Carte géologique de la France. Version 1996 et version 2003 au 1/1000 000	
Carte pédologique de France au 1/1000 000	
Carte des richesses minérales de la France au 1/1000 000	
Carte magnétique de la France au 1/1000 000	
Carte gravimétrique de la France au 1 /1000 000	
Carte tectonique de la France au 1/1000 000	
Carte des linéaments en France au 1/1000 000	
Carte des formations superficielles en France - carte du quaternaire au 1/1000 000	
Carte sismotectonique de France au 1/1000 000	
Carte des gisements de fer en France au 1/1000 000	
Carte géologique de la marge continentale de la France au 1/1500 000	
Carte de la France minière au 1/1500 000	
Carte de la France à l'optimum climatique holocène 8000 ans BP (+ ou - 1000 ans)	
Carte de la France au dernier maximum glaciaire 18000 ans BP (+ ou - 2000)	
Carte de l'occupation des terres en France au 1/1000 000	
Cartes géologiques diverses	

Carte géologique du monde au 1/25 000 000
Carte sismotectonique du monde 1/25 000 000 CCGM
Carte géologique de l'Europe
Carte géologique de l'Europe nouvelle édition 2005 CCGM
Carte internationale tectonique de l'Europe en 5 feuilles au 1 500 000 CCGM
Carte géologique de la manche au 1/1000 000
Carte du métamorphisme des Alpes. Université de Bâle au 1/1500 000
Metamorphic structure of Alpes- Carte du métamorphisme dans les Alpes au 1/1000 000 CCGM 2004
Les secteurs de la Terre et de la mer en Europe du Nord. 1/4 000 000. Land and sea areas of Northern Europe - NGU
Carte géologique de l'Asie du Sud Est 1990 - Geological map of southern and east asia 1/5 000 000 UNESCO
Carte géologique de l'Amérique du Sud au 1/5 000 000. Réédition 2005
Cartes du monde durant les 2 derniers extrêmes climatiques- Maps of the world environments during the last two climatic extremes Carte 1 : le dernier maximum glaciaire 18 000 BP
Cartes du monde durant les 2 derniers extrêmes climatiques- Maps of the world environments during the last two climatic extremes Carte 2 : l'optimum holocène 8 000 BP
La chaîne des Alpes vue par satellite au 1000 000
Atlas géologique du monde Océan Pacifique UNESCO n° 20 1/36 000 000
Atlas géologique du monde Océan Indien UNESCO n° 21 1/29 000 000
Atlas géologique du monde Océan Atlantique UNESCO n° 22 1/ 34 000 000
Carte de l'Océan indien CCGM -IPEV-UNESCO Carte 1 : physiographie 1/22 000 000
Carte de l'Océan indien CCGM -IPEV-UNESCO Carte 2 : carte structurale 1/22 000 000
Carte géologique internationale de l'Afrique 1/5 000 000 UNESCO n° 3
Eastern Asia geological Hazards map 1/7700 000 (2 cartes + notice). Carte 1 : mainly endodynamic origins
Eastern Asia geological Hazards map 1/7700 000 (2 cartes + notice). Carte 2 : mainly exodynamic origins
Geological map of the middle east (Arabie et Iran) au 1/5 000 000
Carte stéréologique de l'est de la France et de ses régions limitrophes
Carte géodynamique de la Méditerranée au 1/ 13 000 000 - CCGM Carte 1: tectonique et cinématique
Carte géodynamique de la Méditerranée au 1/ 13 000 000 - CCGM Carte 2 : sismicité et tectonique

Carte des environnements méditerranéens pendant les 2 derniers extrêmes climatiques au 1/ 7 000 000 CCGM carte 1: le dernier maximum glaciaire 18 000 BP
Carte des environnements méditerranéens pendant les 2 derniers extrêmes climatiques au 1/ 7 000 000 CCGM Carte 2: l'optimum holocène 7 000 - 9 000 BP
Carte mondiale du stress CCGM 2007
La tectonique des plaques depuis l'espace CCGM 2006
Carte des formation superficielles : Creil au 1/100 000
Carte géotechnique de Clermont Ferrand (application à l'aménagement et à l'urbanisation)
Carte métallogénique Europe n° 4 (sud de l'Angleterre, France , Nord de l' Espagne) au 1/2 500 000
Carte des gîtes minéraux au 1/500 000 (livret) : Lyon
Carte des gîtes minéraux au 1/500 000 (livret): Marseille
Carte des gîtes minéraux au 1/500 000 (livret): Nantes
Carte des gîtes minéraux au 1/500 000 (livret):Bordeaux
Carte des gîtes minéraux au 1/500 000 (livret) : Rouen
Carte des gîtes minéraux au 1/500 000 (livret): Strasbourg
Carte des gîtes minéraux au 1/500 000 (livret): Toulouse
Carte des coulées historiques du Piton de la Fournaise au 1/25 000
Carte volcanologique de la chaîne des Puys au 1/25 000
Carte du complexe granitique de Ploumanac'h au 1/25 000
Carte géologique de l'Afar septentrional (Ethiopie) au 1/500 000
Carte de la chaîne volcanique du Erta Ale
Carte géologique du rift d'Asal au 1/ 50 000
Carte géologique de la Réunion au 1/100 000
Carte du massif volcanique de la Soufrière au 1/20 000
Carte de la Montagne Pelée au 1/20 000
Carte de la Nouvelle Calédonie au 1/200 000 (2 cartes)
Cartes topographiques et physiographiques
Carte topographique du fonds des océans au 1/48 000 000 (à l'équateur)
Carte altimétrique du monde NOAA au 1/39 000 000 (à l'équateur)
Carte Bathymetry of the North East Atlantic - Ifremer au 2 400 000
Carte bathymétrique dorsale Est-Pacifique au 1/100 000 n° 1 10° à 10° 30
Carte bathymétrique dorsale Est-Pacifique au 1/100 000 n° 2 10° 30 à 11°
Carte bathymétrique dorsale Est-Pacifique au 1/100 000 n° 3 11° à 11° 30
Carte bathymétrique dorsale Est-Pacifique au 1/100 000 n° 4 11° 30 à 12°

Carte bathymétrique dorsale Est-Pacifique au 1/100 000 n° 5 12° à 12° 30
Carte bathymétrique dorsale Est-Pacifique au 1/100 000 n° 6 12° 30 à 13°
Carte bathymétrique dorsale Est-Pacifique au 1/100 000 n° 7 13° à 13° 30
Carte bathymétrique dorsale Est-Pacifique au 1/100 000 n° 8 13° 30 à 14°
Carte bathymétrique dorsale Est-Pacifique au 1/100 000 n° 9 14° à 14° 30
Montage topographique des Alpes du lac Léman à Nice
Photo des Alpes vus par satellite au 1/1 000 000
Carte IGN Annecy 1/50 000
Carte IGN Chambéry 1/50 000
Carte IGN Marseille 1/50 000
Carte IGN Nancy 1/200 000
Carte IGN La réunion 1/200 000
Carte IGN Besançon 1/200 000
Carte IGN Clermont Ferrand 1/200 000
Carte IGN Perpignan 1/200 000
Carte IGN Besançon 1/200 000
Montage sillon rhodanien 1/200 000
Carte IGN Strasbourg 1/200 000
Carte IGN Grenoble 1/200 000
Carte IGN Moustiers 1/200 000
Carte IGN Toulon 1/200 000
Carte IGN Marseille 1/200 000
Carte de Tahiti au 1/100 000
Cartes hydrogéologiques
Carte des systèmes aquifères de la France au 1/1 500 000
Carte des eaux minérales et thermales de la France au 1/1000 000
Atlas des nappes aquifères de la région parisienne (20 cartes) au 1/1 000 000
Atlas d'hydrogéologie du département du Lot, des Causses et du Quercy au 1/100 000
Carte hydrogéologique de Douai au 1/50 000
Carte hydrogéologique d'Auxerre au 1/50 000
Carte hydrogéologique de Grenoble au 1/50 000

Carte hydrogéologique d'Istres Eyguières au 1/50 000
Atlas hydrogéologique de la Beauce
Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution au 1/1 000 000
Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution Grenoble 1/50 000
Carte de vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution Pontarlier 1/50 000
Carte d'exploitation des réservoirs aquifères et des risques de pollution : Montpellier 1/100 000
Cartes sédimentologiques sous marines
Carte sédimentologique sous - marine de Brest au 1/100 000
Carte sédimentologique sous - marine de Bricquebec au 1/100 000
Carte sédimentologique sous - marine de Lorient au 1/100 000
Carte sédimentologique sous - marine de Saint Vaast la Hougue au 1/100 000
Atlas géologique du plateau continental aquitain : structure dépôt meuble au 1/250 000
Carte du domaine marin côtier Nord Pas de Calais au 1/100 000
Carte de la marge continentale française : Marseille ; nature des dépôts meubles
Cartes ZERMOS : zones exploitées à des risques liés aux mouvements du sol et du sous-sol
Carte de la région Bourg Saint Maurice au 1/25 000
Carte de la région de Millau au 1/25 000
Carte de la région de Saint Etienne de Tinée au 1/25 000
Carte de la région du Trièves - Isère au 1/25 000
Cartes géologiques au 1/320 000
Carte montage du Massif Armoricaïn
Carte d' Avignon
Carte de Bayonne
Carte de Bordeaux
Carte de Bourges
Carte de Dijon
Carte montage du Grand Saint Bernard à Nice
Carte de Lille-Dunkerque

Carte de Lyon	
Carte de Mézières	
Carte de Rodez	
Carte de Toulouse	
Cartes géologiques au 1/250 000	
Carte montage de Annecy - Gap - Lyon - Marseille	
Carte d'Annecy	
Carte de Gap	
Carte de Valence	
Carte de Paris	
Carte de Corse	
Carte des Alpes occidentales du Léman à Nice	
Carte de Marseille	
Carte de Rouen	
Cartes géologiques au 1/50 000	
A	
Agen	Argentan
Aix en provence	Aubagne-Marseille
Alençon	Aulus les Bains
Allos	Aurillac
Anduze	Auxerre
Angers	Avesnes
Annecy Bonneville	Avignon
B	
Baie du Mont Saint-Michel	
Banières de Luchon	Bolbec
Bar le Duc	Bordeaux
Bar sur Aube	Bourbon l'Archambault
Barcelonnette	Bourg en Bresse
Baume les Dames	Bourganeuf
Bayonne	Bourg-Lastic

Beaune	Bouxwiller
Bedarieux	Brest
Belle Ile en mer	Briançon
Belle Ile en terre	Brignoles
Besançon	Brioude avec Langeac (montage)
Beziers	Broons
Blaye sainte luce	
C	
Carpentras	Chaumont
Carphaix plouguer	Cherbourg
Castellane	Chorges
Cavaillon	Clermont-Ferrand
Chablis	Clermont
Chagny	Colmar artolsheim
Chalon sur Saône	Combourg
Chalonne sur loire	Commercy
Chambéry	Condé sur noireau
Champagnole	Corbeil
Charleville Mézières	Courson les carrières
Charpey	Coutras
Château Chinon	Craonne
Château landon	Creil
Château salins	Crest
Châtillon sur seine	Cuers
Chaudes Aigues	
D	Domène
Damartin en Goële	Douai
Dax	Douarnenez
Die	Doulaincourt
Digne	Draguignan
Dijon	
Dole	

E	
Entrevaux	
Etampes	
Embrun	
Espelette	
F	
Fécamp	Fontainebleau
Falaise	Forbach
Fayence	Forcalquier
Ferrette	Fumay
Foix	
G	
Gannat	Givet
Gap	Gourin
Gavarnie	Grasse cannes
Gerarmer	Grenoble
Gevray-Chambertin	Guillestre
H	
Hyères-Porquerolles	
Huelgoat	
I-J-K	
Iholdy	
Ile de Groix	
Is sur Tille	
Issoire	
Joigny	
L	
La Chapelle en Vercors	Le Mas d'Azil
La Grave	Les Alpilles
La Javie	L'Isle Adam
La Mure	Lodève
La Roche Bernard	Lons Le Saunier
La Rochette	Lorient

Lagny	Lourdes
Langeac avec Brioude (montage)	Luc en Diois
Lanslebourg	Lunel
Larche	Lunéville
Largentière	
Lavelanet	
Le conquet	
Le Faou	
Le Fousseret	
Le Mans	
M	Montargis
Maîche	Montceau les mines
Manosque	Montélimar
Marquise	Montivilliers Etretat
Martinique	Montmelian
Maubeuge	Montpellier
Mauriac	Morez bois d'amont
Mens	Morlaix
Menton Nice	Morteau
Metz	Mouthe
Mirecourt	Moûtiers
Modane	Mulhouse- Mullheim
Moirans en montagne	
Molsheim	
Monbeliard	
Moncontour	
Mont de Marsan	
Montaigut	
N	
Nancy	
Nantes	
Narbonne	
Neufchâteau	

O	
Oloron-St Marie	
Orcières	
Orgelet Le Bourget	
Ornans	
P	Poligny
Pamiers	Pontarlier
Paris	Pont-Croix
Parroy	Pontgibaud
Pau	Pontoise
Pertuis	Pouilly en Auxois
Pessac	
Pézenas	
Pleaux	
Plestin les Grèves	
Plouarzel Ile d'Ouessant	
Pointe du raz	
Q	
Quingey	
Quintin	
R	
Rivesaltes	
Remiremont	
Riom-ès-montagnes	
Roman St Isère	
Rambervillers	
Renvez	
Rocroi	
Roquesteron	
S	
Saillagouse	St Chinian
Saintes	St Christophe en Oisan
Salins les Bains	St Claude

Sarlat la Caneda	St Dié
Sarrebouurg	St Etienne
Sarreguemines	St Flour
Saugues	St Gaudens
Saulieu	St Giron
Sault de Vaucluse	St Jean d'Angély
Savenay	St Jean de Maurienne
Saverne	St Martin Vésu
Séderon	St Mihiel
Sélestat	St Rambert en Bugers
Senlis	Strasbourg
Sens	
Serres	
Seynes	
St Avold	
St Bonnet	
St Cast	
T	
Taverne	
Terrasson	Toulon
Thiers	Tréguier
Thonon châtel	Trélon
Tonnerre	
Toul	
V	
Valence	
Vermonton	Vif
Versailles	Vigneulles les Hattonchatel
Vicdessos	Villers-Cotterets
Vic-sur-Cère	Vittel
Vieille Aure	Vizille
	Voiron

Liste des logiciels (hors ExAO) :

Logiciels pédagogiques

Outils de travail sur les données

- **Anagène (CNDP)** (étude et comparaison de séquences d'ADN ou de protéines).
[Présentation.](#)
- **Mesurim (J-F Madre)** (logiciel permettant de faire des mesures sur des images numériques).
- **Molusc (Paul Pillot)**. (Affichage de molécules pdb en 3d. Simple à utiliser.)
- **Phylogène (INRP)** (banque de données biologiques, anatomiques et moléculaire et outils pour l'étude des phylogénies)
- **Rastop (Philippe Valadon - INRP)** (Affichage et travail sur des molécules (format pdb...) en 3d). **Une série de molécules au format .pdb est disponible.** (Rasmol sera fourni pour ceux qui en ont l'habitude).
- **Protéine Explorer.** (traduit par Hervé Furstoss) (Affichage et travail sur des molécules (format pdb...) en 3d).
- **Titus.** (Logiciel permettant de travailler sur les images satellitales Spot.)

Banques de données

- **La lignée humaine (P. Perez et Jean-Yves Guchereau)** (Documents permettant des mesures et des comparaisons).
- **Paleovu (sur le site de l'INRP)** (Banque de données concernant les variations climatiques du quaternaire)
- **Physiologie du sport (Micrélec)** (CD-ROM. Banque de données, d'images et de protocoles d'expériences et de mesures).
- **Seisvole et seiswave (Alan L. Jones).** (Banque de donnée de séismes et simulation du déplacement des ondes).
- **Sismolog (Chrysis)** CD-ROM (Banque de données concernant les séismes, avec des outils d'exploitation)
- **Subduction et magmatisme (Pierre Perez).**
- **Tectoglob** (J-F Madre) : logiciel permettant de traiter des données GPS, sismiques, volcaniques et de simuler des variations du niveau marin.

- Une série de molécules.

Simulations et outils de modélisation

- [ADN](#) (Jean-Claude Le Hir et Étienne Durup). (sous DOS : ADN et synthèse des protéines à noter l'explication d'une méthode de séquençage).
- [Airy](#) (J-P Leclerc) (L'équilibre vertical de la lithosphère continentale - simulation).
- **Glycémie** (Micarelec F. Tilquin) (simulation de la régulation de la glycémie).
- **Metamod** ([C. Nicollet](#) - CRDPd'Auvergne). (Simulation du métamorphisme).
- [Ondes P](#) (J-F Madre) (Modélisation du comportement des ondes P dans le globe terrestre pour expliquer la zone d'ombre).
- **Potact** (Jeulin) (Simulations concernant potentiel de repos et potentiel d'action)
- [Radiochronologie](#) (J-F Madre) (Simulations et calculs concernant quelques méthodes de radiochronologie).
- [Récepteur, neurone, synapse](#) (F.Tilquin). (simulation de l'intégration neuronale).
- [Réflexe de fuite de la Blatte](#) (Ph Cosentino) (simulation).
- [Sismique réflexion](#) (J-F Madre) (Simulation).
- [Sismique réfraction](#) (J-F Madre) (Simulation).
- **Win Synapses (ou Synapse - la version DOS qui lui est identique)** (CRDP d'île de France) (Simulation concernant le réflexe myotatique et l'intégration neuronale).

Illustrations

- [3 D Cellule](#) (P. Perez) (De belles illustrations de structures cellulaires en 3 d).
- **Explorer la Terre : la télédétection (CNDP)** (images et outils d'exploitation) [Présentation](#).
- **Information génétique (Infogène)** CD-ROM (CNDP) collection d'images [Présentation](#).
- [Oxygène](#) (P. Perez). (^{16}O , ^{18}O et paléoclimats - animations).
- **Surfaces d'échange (CNDP)**. (CD-ROM contenant des images.) [Présentation](#).
- [Terre](#) (P. Perez). (La Terre et les saisons....animations).

Outils généraux

- Traitement de texte, tableur, navigateur internet (pour lire les fichiers intranet).

Liste des documents tirés de sites internet :

Documents divers

- Le [manuel virtuel de T-P](#) de Didier Pol.
- [Données GPS](#) concernant le mouvement des plaques (données incluses dans le logiciel [Tectoglob](#) qui permet de choisir une zone d'étude et de tracer les vecteurs).
- Les [cartes du site de Scotese](#) (histoire de la Terre et histoire du climat).
- [CyberNat](#) données biologiques et géologiques concernant la haute Normandie.

Documents de géologie régionale

- Sur les sites académiques :
 - [Baie de Somme](#) (Amiens).
 - Panache sédimentaire à l'[embouchure de la Gironde](#) (Bordeaux)
 - Le [granite de Flamanville](#) (Caen).
 - Le [granite de Vire](#) (Caen).
 - La [Corse varisque et la Corse alpine](#) (Corse).
 - [Aquifères et nappes de Bourgogne](#) (Dijon).
 - [Géologie régionale](#) (Lille).
 - La [fournaise ancienne](#) (La Réunion).
 - [Datation des granitoïdes du Limousin](#) (Limoges).
 - Région du [Hohwald](#) (Académie de Nancy-Metz).
 - [Erquy-le cap Fréhel](#) (Rennes).
 - [Les Monts d'Arrée](#) (Rennes).
 - [De Saint Quentin-la-Tour à Camarasa](#) (Toulouse).
 - [A la frontière de L'Aquitaine et du Massif Central](#) (Toulouse).
 - [Rifts à Djibouti](#).

4. Les écrits

Ecrit secteur A

Nature et fonctions des interactions « ADN-Protéines » chez les êtres vivants

Commentaires généraux

Le sujet posé recouvre un large domaine de la biologie moléculaire. L'étendue de ce domaine contraint à délimiter clairement ses contours, à réaliser des regroupements thématiques et à sélectionner les informations pertinentes au sein d'un vaste ensemble. En clair, c'est un sujet qui impose une synthèse. De ce fait, il se révèle comme un sujet permettant de discriminer de façon graduée les performances des candidats.

Les constats réalisés au cours de la correction :

*** Les points positifs :**

- D'une façon générale, les candidats disposent de connaissances relatives au sujet. Les copies dénuées de contenu ont été très rares.
- La qualité de l'expression française aussi est tout à fait convenable en général, et les copies bénéficient presque toujours d'une présentation soignée.
- L'expression graphique est généralement acceptable mais le jury déplore néanmoins que certain(e)s candidat(e)s ne réalisent quasiment aucun schéma. Ce genre de pratique pénalise significativement les copies.
- La présence d'un plan numéroté avec titres est quasi systématique. Ce point qui favorise évidemment la lisibilité et la clarté des copies est bien sur apprécié par le jury.
- Certains points de connaissance sont aussi fréquemment bien maîtrisés. C'est par exemple le cas des complexes de transcription et de réplication. Ceci révèle que les connaissances des candidat(e)s sont bien actualisées.

L'ensemble de ces points positifs a permis au jury d'apprécier la qualité et l'efficacité de la formation dispensée dans les centres de préparation à l'agrégation SVTU.

*** Certains défauts ont néanmoins souvent été constatés :**

- La plupart du temps, la problématique du sujet n'est pas clairement posée. L'introduction annonce en général que le (la) candidat(e) va tenter de répondre à la question « Quelle est la nature et la fonction des interactions ADN-protéine ? ». Or il s'agit dans ce cas simplement du sujet mis à la forme interrogative. On attend évidemment plus de précision au moment de la formulation de la problématique.
- Les idées directrices du sujet sont rarement perceptibles dans les exposés. Ce défaut est lié à l'absence fréquente d'une problématique bien posée. Il est aussi lié au fait que le plan est souvent conçu comme une sorte de catalogue, sans lien logique explicite entre les différentes parties.
- Les bases moléculaires de l'interaction ADN-protéine ont rarement été explicitées. La nature des liaisons n'est généralement pas expliquée. Ce défaut s'inscrit dans un déficit plus global d'explication des règles physico-chimiques régissant ces phénomènes.
- Les aspects techniques et expérimentaux sont très souvent omis. Certaines techniques comme l'empreinte sur ADN, le retard de migration sur gel ou l'immuno-précipitation de la chromatine constituent en effet la base de l'étude des interactions. D'autre part le discours ne s'appuie généralement pas sur des données expérimentales. La phase d'argumentation à partir de ces données est presque toujours absente. De ce fait, les modèles sont affirmés comme des vérités, sans chercher à en donner les fondements. Nombre de copies se limitent donc à la restitution de modèles qui s'enchaînent les uns après les autres, sans aucune phase de démonstration.
- L'intervention des protéines dans les recombinaisons est fréquemment oubliée.

Les conseils du jury

Introduire correctement le sujet

La phase de définition des termes doit conduire à délimiter le sujet. Ce sujet se place explicitement au niveau moléculaire (ADN, protéines). La réflexion sur le terme interaction doit conduire à l'envisager au sens physique : établissement d'une force entre deux objets existants. L'expression du génome ne fait donc pas partie du sujet en tant que tel mais uniquement par le fait que certaines protéines agissent sur l'ADN au cours de l'expression des gènes. Les termes nature et fonction doivent amener à dégager deux axes pour le sujet :

- Tenter d'élucider les bases moléculaires des interactions : nature des liaisons, sites des liaisons, précisions sur les conformations spatiales...
- Démontrer l'intégration fonctionnelle de ces interactions : la cellule n'est pas que la somme de ses gènes, elle est le produit des interactions entre ses constituants. A ce titre, les interactions ADN-protéines participent à un système régulé.

Construire un plan intelligent

Le plan doit refléter un raisonnement. Les différentes parties doivent donc être envisagées comme les grandes étapes d'une réflexion qui doit se dérouler tout au long de l'exposé. Envisager un plan de cette façon doit permettre d'éviter des plans catalogues et de valoriser la mise en valeur des idées

directrices qui sous-tendent l'exposé. Les candidats ont souvent choisi un plan par fonctions (interactions intervenant pendant l'expression de l'ADN, pendant la réplication de l'ADN, interactions assurant la conservation de l'ADN...). Ce type de plan est tout à fait envisageable s'il conduit finalement à l'idée d'un système cellulaire régulé, idée qui doit soutenir le développement. Utiliser ce type de plan suppose aussi que les bases moléculaires des interactions soient explicitées en cours d'exposé.

Rédiger des paragraphes argumentés

La démonstration de certains points du développement est une nécessité. En Sciences de la Vie, une démonstration se fait à partir d'expériences. L'exposé doit donc démontrer l'aptitude du (de la) candidat(e) à en rendre compte. Certaines données expérimentales doivent donc être explicitées (principe, résultat, conclusion) et mises en rapport avec les caractéristiques des modèles présentés. Il n'est évidemment pas possible de tout démontrer dans une copie mais il faut obligatoirement sélectionner des paragraphes dans lesquels une argumentation expérimentale sera proposée.

Différencier modèle et faits

Un modèle ne représente pas la réalité. Il propose de regrouper un certain nombre d'idées issues de l'expérimentation et il permet de pousser plus loin la réflexion sur un sujet. Lorsqu'un modèle est utilisé par un(e) candidat(e), il doit être explicitement restitué en tant que tel, sans qu'aucune confusion ne soit possible avec un fait d'observation ou d'expérience.

Conclure efficacement

Un bilan doit être réalisé : il ne s'agit pas de répéter plus succinctement ce qui a été dit : il s'agit de franchir un pas dans la conceptualisation. Cette phase doit apporter une véritable valeur ajoutée.

Le sujet doit être mis en relation avec d'autres domaines : il s'agit simplement en général de répondre à la question : A quoi sert-t-il de connaître ce qui vient d'être exposé ?

Des idées de conclusion sont rédigées dans le document suivant.

Préambule :

Ce document n'est pas à considérer comme un corrigé type du sujet de l'écrit du secteur A de la session 2008. En effet, les sujets proposés à la réflexion des candidats sont des sujets très vastes qui ne sauraient être traités de façon exhaustive dans un corrigé type. Un écrit d'agrégation est avant tout un exercice qui doit prouver la capacité du candidat à traiter d'un sujet en biologie cellulaire avec la rigueur et le raisonnement qui feront de cet exercice une construction scientifique dûment justifiée.

Sommaire**I- Positionnement du sujet****II- Structures moléculaires des partenaires mis en jeu et contexte cellulaire****III- Processus cellulaires impliquant la reconnaissance entre ADN et protéines****IV- Méthodes d'analyses des interactions ADN - Protéines****V- Intégration fonctionnelle aux échelles de la cellule et des organismes**

- A- Compactage et décompactage de l'ADN au cours du cycle cellulaire
- B- Activation et répression de l'expression des gènes contrôlant le développement des organismes et leur acclimatation aux contraintes du milieu
- C- Réplication de l'ADN et migration des chromosomes aux pôles lors de la mitose ou de la méiose
- D- Recombinaison et insertion de fragments d'ADN au sein des génomes participent à la diversité des êtres vivants et à leur adaptation
- E- Protection des bactéries par leurs enzymes de restriction et utilisation en biologie moléculaire

VII- Conclusion et perspectives biotechnologiques

I- Positionnement du sujet

Toutes les interactions entre l'ADN et les protéines nucléaires ou celles impliquées dans les processus de division ou de réplication cellulaire, puisées chez les procaryotes et eucaryotes, pourraient être abordées dans un « sens évolutif » à l'échelle moléculaire et cellulaire. Il serait sans doute logique de s'attarder aux mécanismes (auto-assemblage, catalyse, ...) qui ont permis l'émergence du matériel génétique sous forme de la double hélice d'ADN, plus stable, à partir d'ARN possédant des propriétés à la fois génétiques et catalytiques ainsi que les enzymes produites par ces ARN qui créent l'ADN et en réalisent des copies d'ARN. On pourrait ainsi montrer pas à pas comment dans une cellule primitive se sont établies les interactions entre molécules simples puis entre macromolécules à l'origine de toutes les machineries complexes accompagnant les processus fondamentaux étudiés chez les procaryotes et organismes évolués. Mais cette connaissance reste encore beaucoup trop limitée pour s'engager dans une telle démarche explicative. Nous verrons à quel point ces relations entre macromolécules sont encore mal comprises. Il est à ce jour encore impossible de prédire, en connaissant la structure tridimensionnelle d'une protéine trans-régulatrice, la séquence nucléotidique d'ADN double brins qu'elle va reconnaître. C'est à la fois toute la complexité et toute la richesse de nos systèmes biologiques qui sont contenues dans ces phénomènes de reconnaissance. C'est la raison pour laquelle, il semble préférable d'organiser cette dissertation autour des grandes fonctions cellulaires aujourd'hui bien décrites et de ne retenir que celles mettant en jeu ces interactions ADN – Protéines, prises au sens large.

Que ce soit chez les procaryotes ou les eucaryotes, les interactions ADN - Protéine sont impliquées dans de nombreux processus cellulaires fondamentaux tels que l'expression et la réplication des gènes. La compréhension des mécanismes généraux de la reconnaissance spécifique de l'ADN par les protéines est donc capitale au niveau fondamental mais aussi au niveau appliqué puisqu'elle peut contribuer au développement de molécules d'intérêt thérapeutique par exemple. L'appréhension de ces mécanismes de reconnaissance passe par l'étude structurale des complexes ADN - Protéine, de la protéine isolée mais aussi de l'ADN lui-même. En effet, on ne sait pas encore dans quelle mesure la structure de l'ADN dans les complexes ADN - Protéine est déterminée par les propriétés physico-chimiques de la séquence de l'ADN.

II- Structures moléculaires des partenaires mis en jeu et contexte cellulaire

L'ADN est un polymère linéaire double brin constitué de 4 types de monomères différents. La molécule d'ADN est formée par des unités sucre - phosphate répétitives. Ces sucres sont des molécules de désoxyriboses liées chacune à 2 groupes phosphate par des liaisons différentes. De plus chaque désoxyribose est lié aussi à l'une des 4 bases possibles : adénine (A), cytosine (C), guanine (G) et thymine (T). Par conséquent, chaque monomère est constitué par une unité ose - phosphate et de l'une des 4 bases liées à l'ose. Comme chaque sucre est orienté de la même

manière, chaque brin de l'ADN, constitué d'un enchaînement linéaire de monomères, est polarisé avec une extrémité différente de l'autre. Enfin, les 2 brins enroulés l'un sur l'autre vont se combiner pour former une double hélice. Cette association résulte essentiellement de l'appariement spécifique entre bases (A-T et G-C) grâce à des liaisons hydrogènes plus faibles que les liaisons covalentes (*figure 1*). Cette propriété joue un rôle très important dans les processus de réplication et de lecture de l'information génétique (transcription de l'ADN en ARN) par exemple.

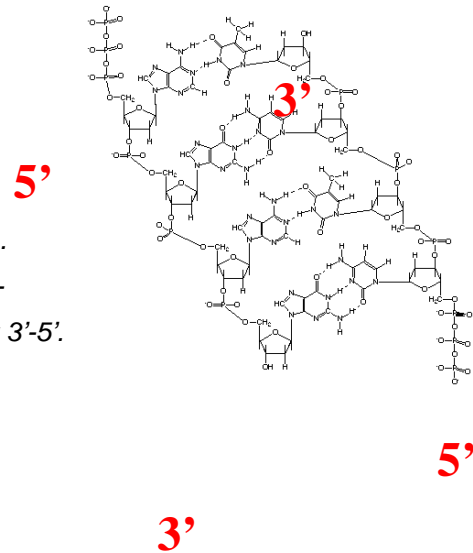


Figure 1 : Molécule d'ADN bicaténaire formée de nucléotides. L'appariement dû aux liaisons hydrogènes impose l'antiparallélisme des 2 chaînes, chacune orientée dans le sens 5'3' ou 3'-5'.

Les protéines sont des macromolécules, plus exactement des polymères constitués de l'enchaînement d'acides aminés, exerçant des rôles cruciaux très divers dans la cellule. Ce sont des catalyseurs, transporteurs, régulateurs, molécules de réserve et de structure, pouvant aussi jouer des fonctions aussi bien de mouvement que de contrôle de la croissance et de la différenciation. Toutes ces protéines sont synthétisées dans le cytosol ou en association avec le réticulum endoplasmique grâce aux ribosomes qui assurent la traduction des ARNm. D'une structure linéaire, chaque protéine va se replier (structures secondaire et tertiaire) selon l'ordre dans lequel les acides aminés ont été assemblés et ainsi, lors de leur maturation, former la structure tri-dimensionnelle fonctionnelle (*figure 2*). Enfin, chaque protéine contient de nombreux groupes fonctionnels (alcool, thiol, thioéther, acide carboxylique, amine, ...) qui sont impliqués dans la structure tertiaire finale et sont très réactifs. Ces groupements leur permettent également d'acquies une structure quaternaire en se liant avec d'autres molécules telles que les protéines, les sucres, les ions métalliques, l'ARN, l'ADN. Par exemple, la machinerie de réplication de l'ADN se compose d'une protéine à 2 sous-unités qui joue le rôle d'un véritable clamp permettant d'éviter la dissociation entre les longs brins d'ADN et les autres protéines de cette machinerie.

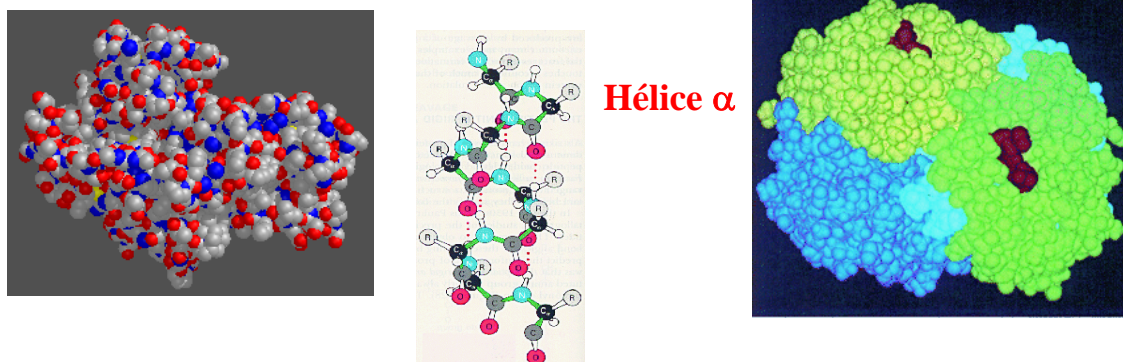
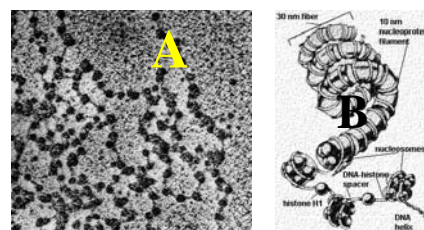


Figure 2 : Structures tertiaire et quaternaire respectivement des protéines A et B intervenant aussi bien dans les structures cellulaires que les processus catalytiques ou de régulation transcriptionnelle. Noter la structure de l'hélice alpha jouant des rôles clés dans les processus de reconnaissance entre l'ADN et les protéines.

Remarque : Les possibilités de rencontre entre ces 2 partenaires ont lieu principalement dans le noyau, mais aussi au sein d'autres organites qui ne seront pas développés ici. Ces rencontres appelées interactions se feront donc soit en surface de l'ADN soit encore au niveau des sillons constituant la double hélice d'ADN. La nature même de ces interactions sera abordée au fur et à mesure des processus décrits.

L'ADN porteur de l'information génétique est localisé principalement dans le noyau d'une cellule en interphase. Mais on trouve également de l'ADN dans 2 autres organites constituant la cellule eucaryote: la mitochondrie et le chloroplaste. On parle alors d'ADN cytoplasmiques constitués d'un nombre relativement limité de paires de bases ($4 \cdot 10^5$ pb pour l'ADN mitochondrial et $1,5 \cdot 10^5$ pb pour le chloroplaste). Ils contiennent des gènes qui sont transcrits en ARNm puis traduits en protéines fonctionnelles. La taille des génomes circulaires ou nucléaires, exprimée en nombre de paires de bases, est respectivement pour l'arabette, le riz et l'homme approximativement de $4,8 \cdot 10^6$ pb (4554 gènes), $4,2 \cdot 10^8$ pb (40000 gènes), $3,1 \cdot 10^9$ pb (35000 gènes). Par ailleurs dans une cellule eucaryote, l'ADN (sous forme de double hélice) est enroulé autour d'une véritable matrice protéique (figure 3) constituée d'histones (H1, H2A, H2B, H3 et H4) et se trouve sous des états dits condensés (hétérochromatine) ou peu condensés (euchromatine). Ces états dépendent de l'organisation propre de la chromatine au sein des noyaux et du stade auquel se trouve la cellule (cycle cellulaire). L'état le plus condensé de la chromatine correspond à la formation des chromosomes (figure 4) qui vont permettre la transmission des caractères génétiques lors de la division (mitose ou méiose) au cours de laquelle la transcription ne pourra pas avoir lieu.

Figure 3 : Structure de la chromatine observée en microscopie électronique (A) et représentée sous la forme d'un schéma (B). Elle est constituée de nucléosomes (octamères d'histones sur lesquels est enroulée la double hélice d'ADN). Noter les perles de nucléosomes entrecoupées de régions qui en sont dépourvues, régions où a lieu la transcription de manière préférentielle.



Par contre, le processus transcriptionnel nécessite généralement une chromatine très peu condensée (perles de nucléosomes entrecoupées de régions qui en sont dépourvues et sur lesquelles se lient des protéines nucléaires) qui permet aux ARN polymérases, sous contrôle des facteurs de transcription généraux, de se lier au site d'initiation de la transcription. Cette euchromatine est observée dans les noyaux des cellules en interphase et représente près de 90 % de la chromatine totale dont 10% seulement se trouve dans un état suffisamment peu condensé pour être transcrit (*figure 5*). La chromatine est donc formée d'une molécule d'ADN unique très longue organisée pour partie autour d'histones et pour partie liée à des protéines régulatrices ou des protéines enzymatiques assurant ou modulant en particulier la transcription, la réplication, les méthylations. L'ADN d'une cellule eucaryote contient 4 grands types de séquences nucléotidiques fonctionnellement importantes : les gènes, les origines de réplication, les télomères (réplication de l'ADN) et les centromères (liaison au fuseau mitotique).

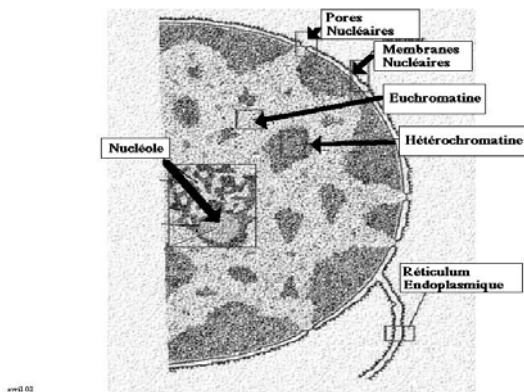


Figure 4 : Structure d'un noyau d'une cellule eucaryote délimité par son enveloppe. nucléaire. Noter la présence d'euchromatine peu condensée et d'hétérochromatine très condensée, préférentiellement localisée contre la membrane interne et de manière discontinue au niveau des pores nucléaires.

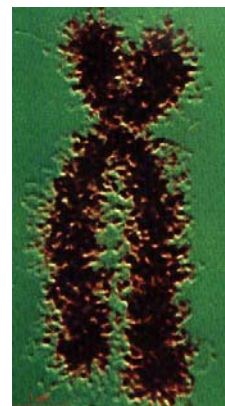


Figure 5 : Observation en microscopie électronique d'un chromosome en métaphase observée en M.E.T (x17000). On localise facilement le centromère où sont réunies les 2 chromatides ainsi que les 4 télomères formant ce chromosome

L'euchromatine en particulier va être soumise à des protéines régulatrices nucléaires qui vont agir soit globalement sur la structure de la chromatine (Polycomb et Trithorax) soit localement sur les régions promotrices (protéines trans-régulatrices) pour activer ou réprimer la transcription des gènes. Transcription qui dépend de l'activité des ARN polymérases (*figure 6*) sous contrôle des facteurs de transcription généraux liés au motif TATA des régions promotrices.

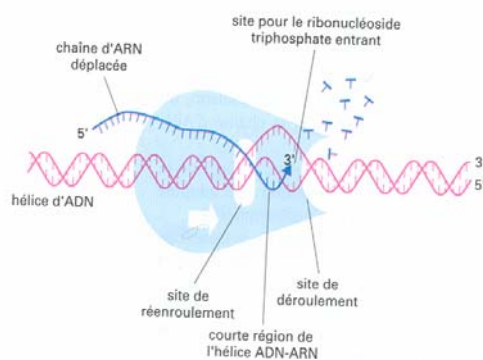


Figure 6 : Schéma montrant l'action de l'ARN polymérase le long d'un double brin d'ADN assurant la transcription du brin codant en ARN dans le sens 5' – 3'. Cet enzyme assure, tout en se déplaçant par oscillation sur l'ADN, l'ouverture de la double hélice, la lecture du brin codant, le réenroulement de la chaîne.

Ce motif est situé lui-même à proximité du site d'initiation de la transcription qui est reconnu par les ARN polymérases. La quantité de transcrits qui sera produite par les ARN polymérases dépend donc de nombreuses protéines régulatrices qui favorisent ou limitent l'activité des ARN polymérases (contrôle combinatoire).

Finalement, elles interviennent principalement par :

- Décondensation de l'ADN via l'acétylation des lysines des histones qui entraîne une diminution de l'affinité entre histone et ADN, remodelage de la chromatine, recrutement d'autres partenaires de la machinerie transcriptionnelle ou au contraire,
- Masquage des sites de fixation sur les promoteurs,
- Recrutement d'autres facteurs et stabilisation des ARN polymérases,
- Méthylation de la cytosine (carbone 5) formant l'ADN grâce à des méthyltransférases spécifiques adressées au noyau qui a comme conséquence de réprimer la transcription.
- Modulation probable de l'activité kinase du complexe protéique TFIIH phosphorylant le domaine c-terminal de l'ARN polymérase II qui marque la transition entre l'initiation et l'élongation.

Chez les procaryotes (ADN, plasmide) comme chez les eucaryotes (ADN nucléaire, mitochondrial et chloroplastique), les ARN transcrits sont traduits en protéines fonctionnelles. Ces protéines interviennent directement dans la structure cellulaire ou celle des macromolécules, dans le mouvement, la régulation (expression des gènes, flux intra-membranaires et transduction des signaux), ou encore comme catalyseur enzymatique (métabolisme, transcription, réplication, ...). Seules les protéines qui s'associent ou interagissent avec l'ADN seront ici considérées. Ceci nous conduira à analyser non seulement la nature de ces interactions mais aussi la fonction des protéines, issues de séquences codantes de l'ADN, qui vont assurer sa stabilisation, sa structuration ou son changement de conformation, sa réplication, sa duplication et son évolution au cours des générations, ses modifications chimiques selon les conditions environnementales, sa lecture incluant la régulation de l'expression des gènes, sa digestion.

III- Processus cellulaires impliquant la reconnaissance entre ADN et protéine : Les grandes familles de protéines impliquées

Problématique. Les interactions entre ces macromolécules ont un impact prépondérant sur les processus génétiques et physiologiques cellulaires qu'il est possible de présenter selon 4 principaux items :

- Compactage et décompactage de l'ADN au cours du cycle cellulaire.
- Activation et répression de l'expression des gènes contrôlant le développement des organismes et leur acclimatation aux contraintes du milieu.
- Réplication de l'ADN et migration des chromosomes aux pôles pour assurer les différentes phases du cycle cellulaire.
- Recombinaison, duplication et insertion de fragments d'ADN au sein des génomes pour permettre l'évolution des êtres vivants et leur adaptation aux facteurs environnementaux.

Ces interactions sont aussi à l'origine de l'avènement de la biologie moléculaire comme outils d'analyse des génomes et de la machinerie cellulaire grâce en particulier à des protéines enzymatiques aux propriétés originales que sont les enzymes de restriction.

Les organismes eucaryotes, le noyau interphasique est un organelle cellulaire qui disparaît en fin de prophase. Il contient de l'ADN porteur de l'information génétique constituant le génome de l'individu qui sera répliqué et stocké. Cet ADN se trouve sous la forme de chromatine, c.a.d. associé à des protéines histones assurant sa structuration et sa fonctionnalité au travers de la transcription des gènes au cours du cycle cellulaire (*figure 7*) . Le noyau est donc le siège de la synthèse des ARN (ARNm, ARNr, ARNt), eux-mêmes porteurs de l'information génétique du noyau vers le cytosol où aura lieu la synthèse protéique en liaison avec les ribosomes libres ou associés au réticulum endoplasmique. Le noyau contrôle les échanges entre les compartiments cytosolique et nucléaire *via* les pores nucléaires (*figure 8*) à savoir la sortie des ARN du noyau et l'entrée des protéines possédant un ou plusieurs types de séquences d'adressage (séquence NLS par ex.). Pour une cellule en interphase, on comprend toute l'importance de ces processus d'adressage permettant une reconnaissance spécifique des protéines nucléaires par les protéines de structure formant les pores nucléaires. Cette sélectivité conditionne par conséquent l'activité nucléaire qui est contrôlée par ces protéines adressées au noyau d'une part et celles qui interagissent directement avec l'ADN d'autre part. Ces différents aspects seront développés dans la partie V.

Le Compactage de l'ADN

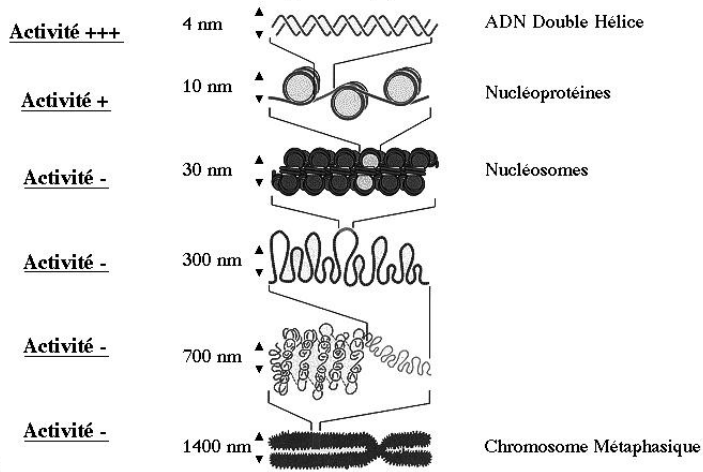


Figure 7 : Formation de la chromatine par enroulement de l'ADN autour des histones et relation entre ses états de condensation et l'activité transcriptionnelle des gènes.

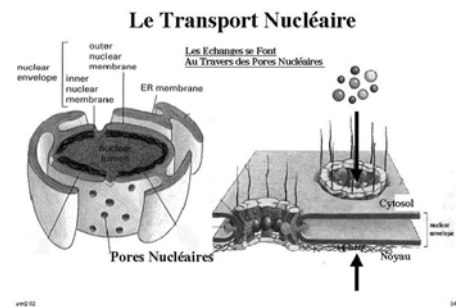


Figure 8 : Description des pores nucléaires permettant un passage sélectif des protéines du cytosol vers le compartiment nucléaire.

On distingue 5 principales familles de protéines qui interagissent avec l'ADN au sein du noyau ou sur des sites spécifiques présents sur les chromosomes lors des différentes phases mitotiques en particulier:

1- **Les histones** sont des petites protéines basiques au nombre de 5 dont 4 s'associent entre-elles (H2A, H2B, H3, H4) pour former des complexes avec l'ADN appelés nucléosomes. Chaque nucléosome est formé d'un octamère d'histones qui contient environ 200 pb d'ADN. Mais ce sont les queues N-terminales des histones sortant de la structure de la particule « core » du nucléosome et contenant des résidus lysine ou arginine qui jouent des rôles essentiels dans la modulation de l'affinité des histones pour l'ADN. De plus le core protéique entre en contact avec la superhélice de l'ADN au niveau de nombreux points le long du squelette phosphodiester et du côté du petit sillon (figure 9).

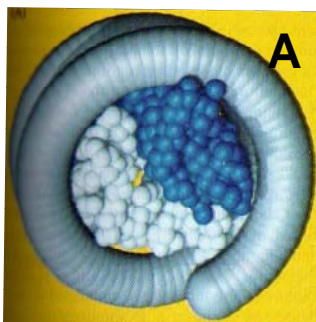
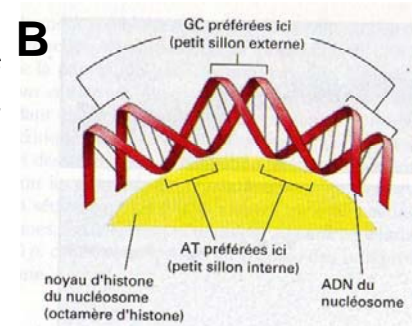


Figure 9 : Interactions entre les histones et la double hélice de l'ADN. Noter comment l'ADN est enroulé autour de l'octamère (A) et comment il se courbe grâce à des séquences riches en AT au niveau du petit sillon (B).



2- Les protéines d'identité cellulaire appartenant aux groupes « Polycomb et « Trithorax » sont des familles qui ont été découvertes chez la drosophile et qui sont capables de remodeler la structure de la chromatine et moduler ainsi l'expression des gènes du développement. Ces protéines s'associent à l'ADN ainsi qu'à des facteurs de transcription responsables de la régulation des gènes du développement. Au cours du développement d'un organisme vivant, les cellules se différencient peu à peu et chacune acquiert une « identité cellulaire » donnée (sorte de carte d'identité) qu'elle doit garder durablement tout au long de la vie : neurone, cellule musculaire, cellule du foie, cellule de la peau etc. Chez la drosophile, les gardiens de cette identité sont les protéines des groupes Polycomb et Trithorax. Celles-ci régulent l'activité des gènes homéotiques (allumée ou éteinte), en se fixant en particulier sur les séquences d'ADN correspondant. Polycomb et Trithorax ont des rôles antagonistes : les protéines Polycomb maintiennent les gènes homéotiques « éteints », alors que les protéines Trithorax les maintiennent actifs. C'est un équilibre variable entre ces deux états qui détermine l'identité et la place de la cellule dans l'organe et l'organisme. Lorsque la fonction de ces protéines est perturbée, les cellules perdent leur identité, peuvent se diviser de façon incontrôlée et induire des cancers. Chez l'Homme, le mauvais fonctionnement de ces protéines peut induire des cancers du sein, du colon, de la prostate, ainsi que certaines leucémies.

3- Les enzymes du noyau sont très diversifiées. Elles assurent de nombreuses fonctions que nous avons déjà citées en introduction. Nous nous focaliserons sur celles qui agissent soit directement sur l'ADN assurant des fonctions cellulaires essentielles soit sur les protéines liées à l'ADN qui vont ainsi modifier les relations protéine-ADN. On distingue :

- Les enzymes de la réplication et de la réparation de l'ADN (primase, ADN polymérases, topoisomérases, hélicases, ADN gyrases des procaryotes, ADN ligases, ADN glycosylases, MutS / MutL, exonucléases (MutH), intégrases, télomérases),
- Les enzymes de la transcription représentées par les ARN polymérases I, II et III qui assurent la synthèse des ARNr, ARNm et ARNt / petits ARN respectivement (*figure 10*).
- Les enzymes qui modifient l'état de la chromatine (acétylases, phosphorylases, phosphatases et méthyltransférases ou méthylases).

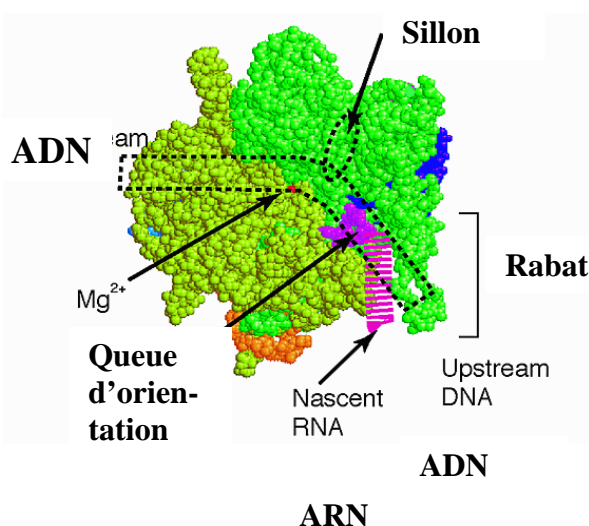


Figure 10 : Structure quaternaire tridimensionnelle de l'ARN polymérase II. Noter la localisation de l'ADN (pointillés) et de l'ARN en cours d'élongation.

- Les enzymes qui accroissent la diversité génétique tels que les intégrases et les transposases.
- Les enzymes de restriction d'origine bactérienne qui sont capables de couper l'ADN bicaténaire à des sites spécifiques de la séquence. Il s'agit d'endonucléases de 3 types : les types I et II coupent en dehors de leur site de reconnaissance et le type II est un outil indispensable au génie génétique. En effet, ces enzymes de type II coupent à l'intérieur de petites séquences d'ADN double brins (4, 6, 8 pb) très spécifiques (*figure 11*). Ces protéines sont connues pour assurer la défense des bactéries vis à vis des virus en particulier.

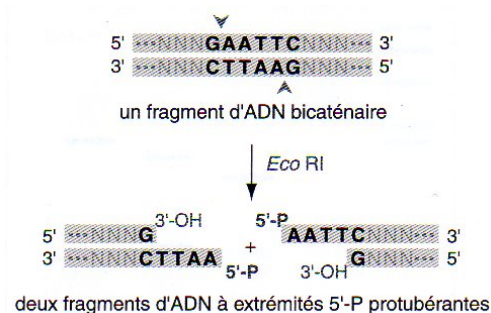


Figure 11 : L'enzyme de restriction *Eco RI* isolée de la bactérie *E. coli* coupe l'ADN bicaténaire dans la séquence palindromique G/AATTC

4- Les facteurs de transcription généraux ou spécifiques (protéines nucléaires trans-régulatrices) qui vont déterminer l'activité des ARN polymérases assurant l'initiation et le déroulement de la transcription le long des séquences codantes et non codantes des gènes. De nombreuses classes de protéines trans-régulatrices ont été identifiées chez les organismes procaryotes et eucaryotes. Elles sont synthétisées par la machinerie traductionnelle cytoplasmique et possèdent des domaines hautement conservés qui correspondent à des séquences de fixation soit avec l'ADN soit avec d'autres protéines régulatrices. Pour exemple, nous citerons les familles MADS, GBF, MYB, MYC qui sont retrouvées aussi bien chez les animaux que chez les végétaux, mais pouvant jouer des rôles très différents. Alors que les protéines à domaine MADS sont codées par des gènes dits homéotiques impliqués dans la régulation des processus de développement des organismes évolués (embryon, organes, pièces florales, ...), le groupe des protéines MYB caractérisées par des séquences répétées R2R3, très diversifiées chez les végétaux (environ 130 gènes chez *Arabidopsis thaliana*), assure pour partie la régulation des fonctions d'acclimatation et d'adaptation des plantes faces aux contraintes environnementales. Ce sont des régulateurs majeurs de la transcription des gènes codant les enzymes du métabolisme secondaire (polyphénols) chez les végétaux. Néanmoins, ces facteurs de transcription de type MYB régulent, d'une manière très ciblée, bien d'autres fonctions cellulaires comme la division cellulaire chez les animaux, chez qui seulement 10 gènes MYB ont pu être identifiés.

5- Les protéines de liaison qui vont participer à la réorganisation du matériel génétique de chaque cellule en division. En effet, elles vont jouer des rôles primordiaux dans le déplacement des chromosomes homologues ou des couples de chromatides durant la mitose ou la méiose. Il s'agit du complexe protéique kinétochorien fixé au niveau des centromères des chromosomes et établissant un pont avec les microtubules kinétochoriens formant le fuseau mitotique et mettant en jeu probablement la dynéine (protéine motrice). Lors de l'anaphase mitotique, les 2 chromatides qui sont reliés par leur centromère vont se séparer et se déplacer vers les pôles grâce aux dynéines glissant le long des microtubules au fur et à mesure qu'ils se dépolymérisent à leurs 2 extrémités (*figure 12*).

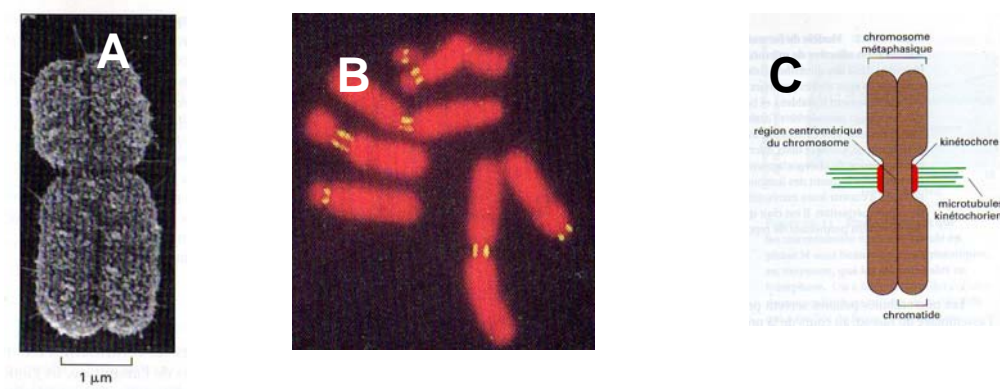


Figure 12 : Particularités structurales de chromosomes eucaryotes. A, chromosome humain mitotique constitué de 2 chromatides appariés. La zone de constriction est le centromère. B, Coloration par immunofluorescence de kinétochores au niveau des centromères de chromosomes de cellules marsupiales. C, Chaque kinétochore forme une plaque à la surface du centromère qui s'assemblent avec les microtubules.

Certains mécanismes propres à ces protéines nucléaires seront développés ci-après à titre d'exemple. Ils reposent tous sur des interactions spécifiques ADN-Protéine et Protéine-Protéine. Ces dernières seront abordées uniquement sous l'angle de la modification des propriétés d'une protéine donnée (cas d'une protéine histone) qui aura pour conséquence de modifier les interactions entre cette protéine et l'ADN. Ces interactions reposent essentiellement sur des liaisons hydrogènes, des domaines hydrophobes ou des groupements (donneurs ou accepteurs) du grand sillon de l'ADN qui vont interagir directement avec les résidus d'acides aminés particuliers (lysine, leucine, ...), résidus qui caractérisent chacune des protéines trans-régulatrices. De plus, la géométrie globale de la double hélice comme son aptitude à se déformer jouent également un rôle dans ces processus de reconnaissance. Ces propriétés dépendent de la séquence en nucléotides. Enfin, certains facteurs protéiques induisent des courbures de l'ADN appelées coudes qui favoriseront les liaisons entre ADN et protéines. Nous verrons plus en détail les différents motifs de liaison à l'ADN (Hélice-Tour-Hélice, doigts de zinc, répétition de leucines, Hélice-Boucle-Hélice) qui caractérisent les grandes familles de facteurs de transcription. Mais il est encore très difficile de prédire la séquence d'ADN qui sera reconnue par une protéine régulatrice donnée.

Par conséquent, les principaux processus cellulaires concernés par ces interactions sont la transcription, la réplication et la division cellulaire que nous détaillerons après avoir dressé un bilan des principales techniques qui permettent aujourd'hui d'étudier ces interactions.

IV- Méthodes d'analyse des interactions ADN-Protéines

Nous développerons ici essentiellement les techniques permettant d'identifier la (les) protéine(s) qui se fixe(nt) sur une séquence de nucléotides (ADN) donnée.

Criblage de banques. Il s'agit d'utiliser la technique de criblage d'une banque d'expression. La seule différence repose sur le fait que le criblage ne se fait pas avec un anticorps mais avec un oligonucléotide double brin marqué radioactivement. Les clones exprimant la protéine interagissant avec cet ADN seront donc repérés après autoradiographie du filtre. Une alternative à cette technique consiste à utiliser des phages lytiques de type lambda afin d'éviter les étapes de lyse des bactéries. On peut aussi faire du « phage display » qui consiste à fixer sur la colonne l'oligonucléotide double brin correspondant à la cible ADN au lieu de la protéine cible.

Immuno-précipitation de chromatine. Le « CHIP » (CHromatin Immuno Precipitation) consiste à purifier des complexes ADN-Protéine, liés par du formaldéhyde. Principe de la Technique : Les protéines cellulaires sont liées à l'ADN par un traitement au formaldéhyde. L'ADN est ensuite clivé en fragments de 500 à 1000 pb par sonication. La protéine d'intérêt est immunoprécipitée, l'ADN sur lequel elle était liée est récupéré puis amplifié par PCR avec des « primers » choisis sur les régions promotrices d'intérêt. Avantages: (i) Cette technique est utilisée sur cellules vivantes. (ii) Elle permet non seulement de visualiser l'occupation des sites sur les promoteurs à un moment voulu, en réponse à des traitements spécifiques, mais aussi les modifications post-traductionnelles des facteurs de transcription d'intérêt suivant les anticorps utilisés. (iii) L'utilisation d'anticorps anti-histones acétylés permet de visualiser l'état général de la chromatine au niveau de promoteurs spécifiques. Inconvénients: Cette technique est assez difficile à mettre en œuvre. Il faut trouver les conditions idéales d'immunoprécipitation, de cross-link mais aussi de fragmentation de l'ADN. Le choix des primers (sondes) est également important.

Gel retard ou electrophoretic Mobility Shift Assay (EMSA). La technique du gel retard est basée sur le retard de migration dans un gel natif de polyacrylamide de duplexes d'oligonucléotides de séquences courtes en présence de protéines ayant la propriété de reconnaître spécifiquement la séquence d'intérêt. La variation de migration des duplexes (ou sondes) complexés aux protéines par rapport aux duplexes libres est suivie grâce au marquage radioactif au ^{32}P des sondes nucléotidiques (figure 13). Le gel retard peut être réalisé à partir de protéines purifiées mais aussi à partir d'un extrait protéique plus complexe (un extrait nucléaire par exemple). La spécificité de reconnaissance des sondes marquées peut être testée par l'ajout en excès du même duplexe non radioactif qui entrent en compétition avec la forme radioactive. La présence de protéines spécifiques dans le complexe retardé peut être mise en évidence par l'ajout d'anticorps spécifiques qui permettent un retard plus important sur le gel appelé " supershift ".

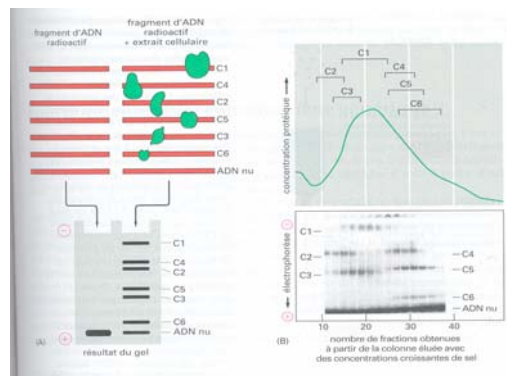


Figure 13 : Expérience de retardement sur gel de polyacrylamide effectuée à partir d'ADN marquée radioactivement (en rouge) et d'extrait protéique cellulaire (protéines représentées en vert) .

Empreintes sur l'ADN. Elles font généralement suite aux études conduites sur gel retard et permettent de définir avec précision les bases du promoteur qui interagissent physiquement avec un facteur de transcription nucléaire. **A l'exonucléase A:** L'exonucléase A est une enzyme qui a une activité 3'-5' exonucléase, mais ne s'attaque qu'aux extrémités proéminentes ou franches. Elle ne coupe ni l'ADN simple brin, ni les extrémités 3' proéminentes. Cette activité est utile pour déterminer les limites d'une interaction entre une protéine et un fragment d'ADN. Si on marque au ^{32}P une seule des deux extrémités 5' de notre fragment d'ADN, et si l'on traite celui-ci à l'exonucléase III pendant qu'une protéine en protège une partie, l'exonucléase III ne pourra digérer l'ADN que jusqu'à ce qu'elle entre en contact avec cette protéine qui l'empêche de progresser dans la digestion. La même expérience sera réalisée avec le fragment d'ADN marqué sur l'autre extrémité. La taille de l'ADN protégé que l'on détermine sur un gel dénaturant haute résolution nous permettra de déterminer où est localisée l'interaction ADN-protéine. Un des avantages de l'empreinte à l'exonucléase III est que l'ADN non-protégé par une protéine est entièrement dégradé; une interaction partielle ne génère pas de bruit de fond.

DNase I. Le fragment d'ADN double brin contenant la séquence cis du promoteur étudié est marqué radioactivement à son extrémité. Il est ensuite hybridé avec des extraits protéiques nucléaires. Le mélange est alors soumis à un traitement modéré à la DNase I, enzyme capable de couper les liaisons phosphodiester à l'intérieur de l'ADN sur un seul des 2 brins. Ce qui permet d'obtenir une collection de fragments de tailles différentes. La présence d'un complexe protéique cache un site éventuel de coupure par la DNase I et empêche ainsi l'action de l'enzyme. Par électrophorèse sur gel d'acrylamide, les fragments issus d'ADN libre ou d'ADN liés à une ou plusieurs protéines sont analysés par autoradiographie et comparés. On met alors en évidence une zone sans bande (ADN lié) qui correspond au site de fixation de la protéine sur la séquence double brin qu'il sera possible de séquencer (figure 14).

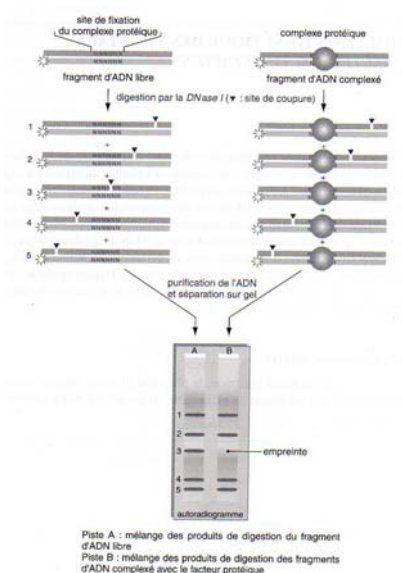


Figure 14 : Principe de la technique dite d'empreinte à la DNase I appelée aussi « Footprinting ». Il s'agit d'appliquer à des mêmes fragments d'ADN, marqués radioactivement à l'une ou l'autre de ces extrémités, qui sont libres ou complexés à des protéines une digestion par une endonucléase capable de coupler les liaisons phosphodiester au cœur des chaînes d'ADN sur un seul des 2 brins. La présence de protéines empêche l'action de la DNase I. Les produits de digestion sont ensuite analysés et comparés par électrophorèse sur gel d'acrylamide.

Système du simple hybride de levure. Cette technique est dérivée de la technique du double hybride (interactions protéine / protéine) mais appliquée à l'étude des interactions protéine / ADN. Elle permet d'identifier de nouvelles protéines interagissant avec un fragment d'ADN connu, d'accéder ainsi directement à leur gène, de vérifier une interaction entre une séquence d'ADN et une protéine et enfin d'étudier les nucléotides et/ou acides aminés impliqués dans l'interaction. Si une protéine X, provenant d'une banque d'ADNc ou d'un ADNc d'une protéine connue, se lie sur la séquence cis-régulatrice Y activée par la protéine Gal 4, il y aura activation de la transcription du gène rapporteur (β -galactosidase). Si on fait pousser les levures ayant reçu ce vecteur sur un milieu en présence de X-gal, les colonies obtenues seront bleues. Afin d'améliorer le rendement, la séquence cible Y est répétée plusieurs fois. Comme dans les cas du double hybride, un double système de sélection (β -galactosidase et un gène d'auxotrophie) est en général utilisé.

Biacore. On mesure ici l'interaction entre deux partenaires moléculaires grâce à une machine mesurant l'intensité d'un rayon de lumière. La SPR, ou **résonance de plasmon**, se produit quand un rayon lumineux est réfléchi sous certaines conditions par un film conducteur à l'interface entre deux milieux d'indices de réfraction différents. Dans le système Biacore, ces milieux sont (i) la solution dans laquelle se trouvent les molécules à analyser et (ii) le verre d'une lame qui sert de senseur. Le film conducteur à l'interface des deux est un très fin film d'or à la surface de la lame de verre. La résonance de plasmon cause une réduction de l'intensité de la lumière réfléchie à un angle spécifique de réflexion Cet angle varie avec l'indice de réfraction près de la surface du côté opposé à la lumière réfléchie (c'est donc dire du côté de l'échantillon). Dans le système Biacore (www.biacore.com), la molécule appât (séquence d'ADN) est fixée sur la feuille d'or, du côté solution. Les molécules (protéines nucléaires) avec lesquelles elle peut interagir sont ajoutées en flot continu. Si l'une d'entre-

elles interagissent avec l'appât, la concentration locale en molécules augmentera dans la région immédiate de l'appât, ce qui fera changer l'indice de réfraction local. Le changement d'indice de réfraction aura pour effet de changer l'angle pour lequel la lumière réfléchie perd un maximum d'énergie par résonance. Le système détecte un changement et enregistre une interaction. La mesure du niveau d'interaction en fonction du temps permet d'évaluer le taux d'association. Une unité de résonance (RU) correspond à un changement de 0.0001° dans l'angle donnant une intensité minimale de lumière réfléchie, ce qui pour la plupart des protéines correspond à un changement de concentration de l'ordre de 1 pg/mm^2 de surface sur la lame de verre. Le Biacore est donc extrêmement sensible.

D'autres techniques sont aujourd'hui disponibles ou en cours de développement permettant d'étudier les modes d'interactions entre une séquence d'ADN et une protéine (microscopie de fluorescence, pinces magnétiques, noyau phosphore comme sonde structurale, cristallographie aux rayons X) mais ne seront pas abordées ici.

V- Intégration fonctionnelle aux échelles de la cellule et des organismes

A- Compactage et décompactage de l'ADN au cours du cycle cellulaire.

a) **Au cours du cycle cellulaire**, le phénomène de compactage / décompactage de la chromatine repose essentiellement sur des interactions de type ADN – Protéine et va permettre de définir pour partie les phases du cycle incluant réplication, mitose, interphase. Il ne s'agit pas ici de décrire toutes ces phases, mais d'apporter quelques précisions sur les processus impliquant les relations entre ADN et protéines déjà décrit précédemment (*figure 7*). Elles sont pour partie basées sur des phénomènes d'auto-assemblage entre macromolécules, mais aussi faisant intervenir, comme nous l'avons déjà mentionné, de nombreuses protéines telles que les histones, des enzymes et autres protéines d'assemblage ou de protection des structures. C'est le cas par exemple du complexe synaptonémal qui est un ensemble de protéines unissant les chromosomes homologues sur toute leur longueur durant la méiose, du stade leptotène au stade diplotène pendant lequel le complexe se dégrade. C'est au stade pachytène que des nodules de recombinaison se lient au complexe protéique synaptonémal qui est traversé par des filaments d'ADN pour former des chiasmats (*figure 15*).

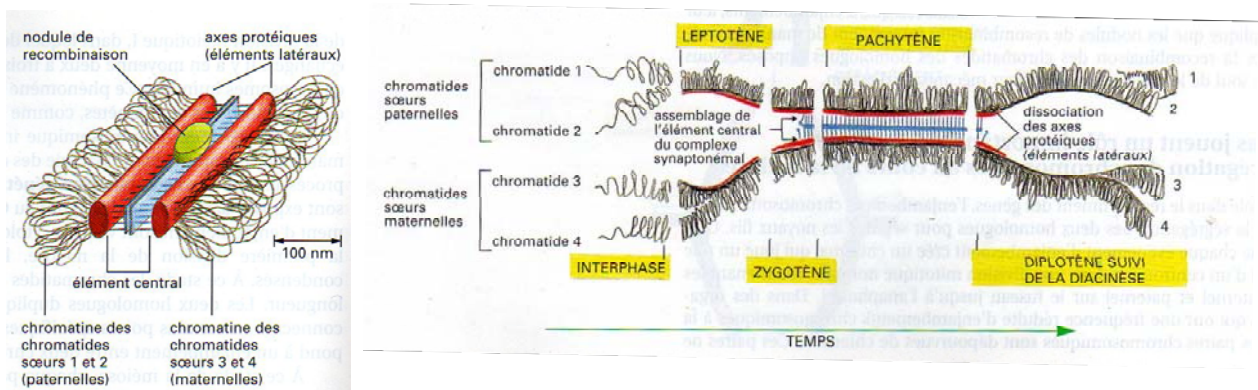


Figure 15 : Schémas du complexe synaptonémal montrant les éléments latéraux et centraux. Ce sont les éléments protéiques latéraux qui assurent les liens entre le complexe et l'ADN. Des nodules de

recombinaison se lie au complexe protéique synaptonémal qui est traversé par des filaments d'ADN pour former des chiasmas. Ces structures sont retrouvées aussi bien chez les levures que chez l'homme.

b) Rôle des histones et autres protéines dans la structuration de la chromatine : Les histones sont les principales protéines de structure des chromosomes eucaryotes (60 M de chaque type par cellule). Sans histone, les chromosomes ne pourraient être répliqués et séparés en cellule fille, sans s'emmêler et se casser. Mais il existe également des protéines chromosomiques « non histone » qui constituent avec les histones la matrice protéique de l'ADN pour former la chromatine (compactage). Ce sont les charges positives des protéines histones constituées en forte proportion de lysine et d'arginine qui vont déterminer les liaisons avec l'ADN (possédant lui-même une forte charge négative). Les interactions entre les histones (H2A, H2B, H3 et H4) et l'ADN vont dépendre : 1- De la présence de paires de bases A-T dans les petits sillons sur l'intérieur de la bobine d'ADN facilitant la courbure de l'ADN (petits sillons comprimés) et donc le positionnement des octamères d'histones. 2- De la présence d'autres protéines fortement liées à l'ADN qui empêchent la formation des nucléosomes. De plus, des protéines non-histone liées à la chromatine appelées HMG (High Mobility Group) ou d'autres facteurs se liant spécifiquement à l'ADN peuvent affecter l'espacement et le repliement du nucléofilament. Ainsi les premières étapes de l'assemblage peuvent avoir une grande incidence sur la nature finale de la chromatine dans des domaines spécifiques du noyau.

c) Acétylation des histones et facteur CAF: Par l'action des ADN acétylases, les histones formant les nucléosomes sont acétylés sur les fonctions amines des lysines basiques constituant les queues « amino-terminales » allongées des histones. Cette acétylation a pour conséquence de supprimer les charges positives des lysines et donc d'empêcher la formation des nucléosomes, permettant ainsi la transcription de l'ADN non compactée. Ce phénomène d'acétylation est réversible grâce à l'action des ADN désacétylases qui sont aussi connus par ailleurs pour recruter des ADN méthylases responsables de la méthylation de l'ADN bloquant la transcription. Par conséquent, le « greffage » de groupements acétyl ($\text{CH}_3\text{-CO-}$) sur les protéines histones diminue les interactions entre ces protéines, modifie la conformation de la chromatine (décompactage) et favorise la transcription des gènes. Par ailleurs, le facteur CAF-1 (Chromatin Assembly Factor 1) interagit avec les histones H3 et H4 acétylées nouvellement synthétisées et participe à l'assemblage de la chromatine couplé à la réplication de l'ADN.

B- Activation et répression de l'expression des gènes contrôlant le développement des organismes et leur acclimatation aux contraintes du milieu.

a) Facteurs de remodelage et d'identité cellulaire. Chez la drosophile, on comptabilise 12 gènes Polycomb responsables du contrôle de l'expression des gènes homéotiques. On connaît leurs antagonistes fonctionnels appelés Trithorax. Ces gènes codent des protéines nucléaires qui sont capables de remodeler la chromatine. Les Polycomb induiraient la conversion plus ou moins définitive

de certaines zones de la chromatine en hétérochromatine (condensée) alors que les Trithorax favoriseraient l'émergence de zones moins condensées riches en euchromatine propices à l'expression des gènes du développement. Leur fonction de régulation est fondamentale à l'échelle de la chromatine et résulterait d'interactions avec les nucléosomes et les protéines trans-régulatrices pour « stabiliser » les zones empaquetées ou « protéger » les zones régulées ouvertes et peu condensées. Les mécanismes de ces 2 grands groupes de protéines d'identité cellulaire intervenant de manière conjointe restent encore mal connus. On sait néanmoins que la liaison de la protéine Polycomb aux chromosomes géants de la drosophile, visualisés grâce à des anticorps dirigés contre Polycomb, est établie avec les complexes Antennapedia (ANT-C) et Bithorax (BX-C) ainsi qu'à 60 autres sites. On peut néanmoins les considérer comme des facteurs de remodelage, complexes multiprotéiques, dont l'activité ATPase permet au complexe de modifier la structure nucléosomale, en partie grâce à l'énergie libérée par l'hydrolyse de l'ATP. L'étude des facteurs qui favorisent un espacement régulier des nucléosomes pendant l'assemblage de la chromatine a permis d'identifier plusieurs complexes multiprotéiques capables *in vitro* de faire "glisser" des nucléosomes sur de l'ADN.

b) Méthylation de l'ADN. Chez les procaryotes, la méthylation des bases dans des séquences spécifiques est catalysée par des méthyltransférases (méthylases) associées aux endonucléases de restriction. Il s'agit d'un mécanisme de protection contre les phages et peut servir aussi dans la réparation de l'ADN. Chez les eucaryotes, la méthylation est limitée à certains résidus cytidine suivi d'une guanosine (séquence CpG). Le taux de méthylation reste faible chez les mammifères (quelques %) mais atteint 30 % chez les végétaux. Lors de la réplication, la séquence 5'-CpG-3' méthylée est reconnue et méthylée par la transférase, ce qui lui permet de se perpétuer dans une lignée cellulaire. Dans un gène ou dans ses séquences cis-régulatrices, ces méthylations empêchent la transcription de l'ADN en ARN soit en tant qu'obstacle stérique à la fixation d'un facteur de transcription soit en favorisant l'action des histones désacétylases. Ces dernières vont favoriser la stabilisation des nucléosomes (renforcement des liens histones – ADN) et par conséquent bloquer le déroulement de l'ADN nécessaire à la transcription.

c) ARN polymérases et facteurs de transcription généraux chez les procaryotes et les eucaryotes. Un gène constitué de 1500 à 2500 pb en général se définit par sa fonction cellulaire et ces 3 régions constitutives: codante (exons), non codante (introns), promotrice (boîte TATA et autres éléments cis). Pour qu'un gène soit transcrit en pré-ARNm, un ARN polymérase (exemple de l'ARN polymérase II) doit venir se fixer à l'ADN sur un site d'initiation de la transcription et reconnaître la séquence d'initiation. Mais ce positionnement n'est possible que si des facteurs de transcription généraux (FTG) sont fixés sur la boîte TATA (TFIID et TFIIB) permettant l'accueil de la polymérase. Une fois la polymérase « positionnée » sur l'ADN, d'autres FTG (TFIIE, TFIIF, TFIIH) viennent s'associer pour former ce complexe transcriptionnel. Et c'est la phosphorylation de la queue de la polymérase catalysée par la protéine TFIIH (sous unité à activité kinase) en présence d'ATP qui libère la polymérase pour qu'elle puisse initier la transcription (*Figure 16*). Ce processus transcriptionnel met en jeu finalement 2 types d'interactions avec l'ADN : TFIID – ADN et ARN polymérase – ADN,

auxquels s'ajoutent des interactions Protéine – Protéine soit entre facteurs de transcription soit entre les facteurs TFII et la polymérase (position et phosphorylation). Mentionnons que les mécanismes de lecture du brin codant par l'ARN polymérase sont actuellement étudiés au niveau moléculaire. Il montre tout d'abord que l'ARN polymérase se fixe faiblement (liaisons hydrogènes avec les bases) puis se déplace au hasard le long de la double hélice avant de se lier au promoteur du gène à transcrire. Suite à l'initiation de la transcription, l'ARN polymérase se déplace cette fois le long du brin matrice de l'ADN par oscillation d'avant en arrière grâce à des interactions physico-chimiques extrêmement précises et synthétise dans le sens 5'=>3' l'ARN. Les processus assurant la transcription chez les procaryotes et les eucaryotes sont très comparables, indiquant que les séquences mises en jeu sont hautement conservées.

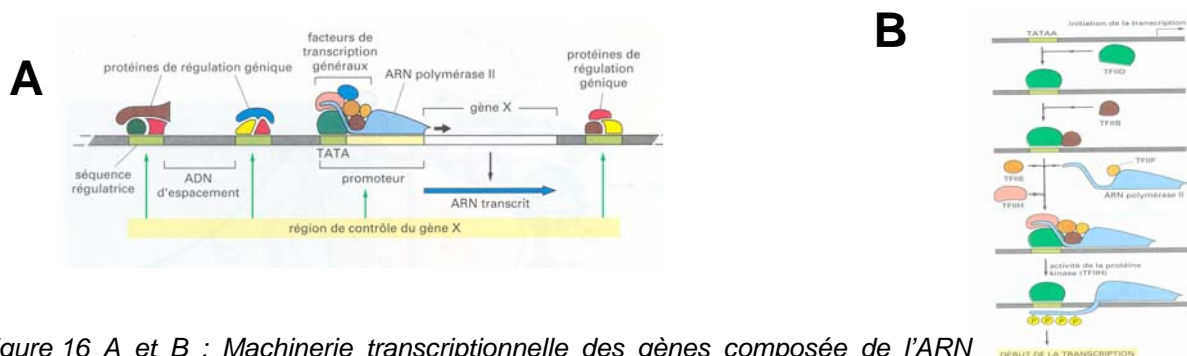
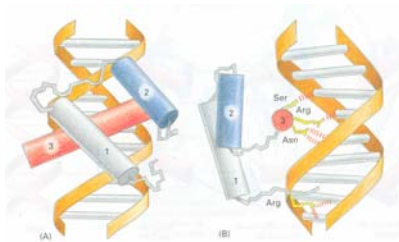


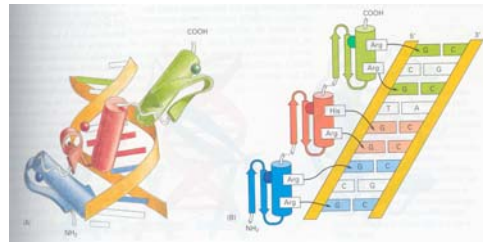
Figure 16 A et B : Machinerie transcriptionnelle des gènes composée de l'ARN facteurs de transcription généraux (dont TFIIH à activité kinase se fixant sur la boîte TATA pour initier la transcription) et des protéines trans-régulatrices spécifiques.

Protéines d'identité cellulaire, protéines trans-régulatrices et éléments cis des régions promotrices des gènes. Exemple des protéines nucléaires MADS, GBF (bZIP G-box binding factor) et MYB. La régulation de la transcription des gènes proprement dit s'opère à plusieurs niveaux et met en jeu des mécanismes spécifiques déjà cités que nous allons illustrer à partir de quelques exemples :

d) Facteurs de transcription spécifiques et phosphorylation. La reconnaissance moléculaire repose sur une correspondance exacte entre les surfaces de 2 molécules données. Les interactions ADN - protéines trans-régulatrices représentent quelques-uns des plus beaux exemples de ce principe capital en biologie. Une protéine régulatrice reconnaît une séquence d'ADN avec une grande spécificité et établit de multiples points de contacts avec l'ADN (liaisons hydrogènes, ioniques, interactions hydrophobes). Bien que chacun des contacts soit faible, la totalité des nombreux points établis à l'interface ADN - Protéine confèrent à ces systèmes une des plus fortes spécificités du domaine biologique. On distingue à ce jour 4 principaux motifs de liaison à l'ADN des facteurs de transcription (*figure 17*) : Hélice-Tour-Hélice (10 à 20 contacts), à doigts de zing (cys-cys-his-his), à répétition de leucines (2 domaines à hélice alpha), Hélice-Boucle-Hélice (double hélice alpha). Nous proposons d'aborder ces processus de régulation, basés sur les interactions ADN-protéine, au travers de quelques exemples pris chez les procaryotes et eucaryotes.



Homéodomain: Hélice-Tour-Hélice



Doigts de zinc



Dimère leucine zipper



Hélice-Boucle Hélice

Figure 17 : Principaux motifs de liaison à l'ADN par des facteurs de transcription caractérisés par des domaines spécifiques permettant de les classer selon leur structure et leur fonction.

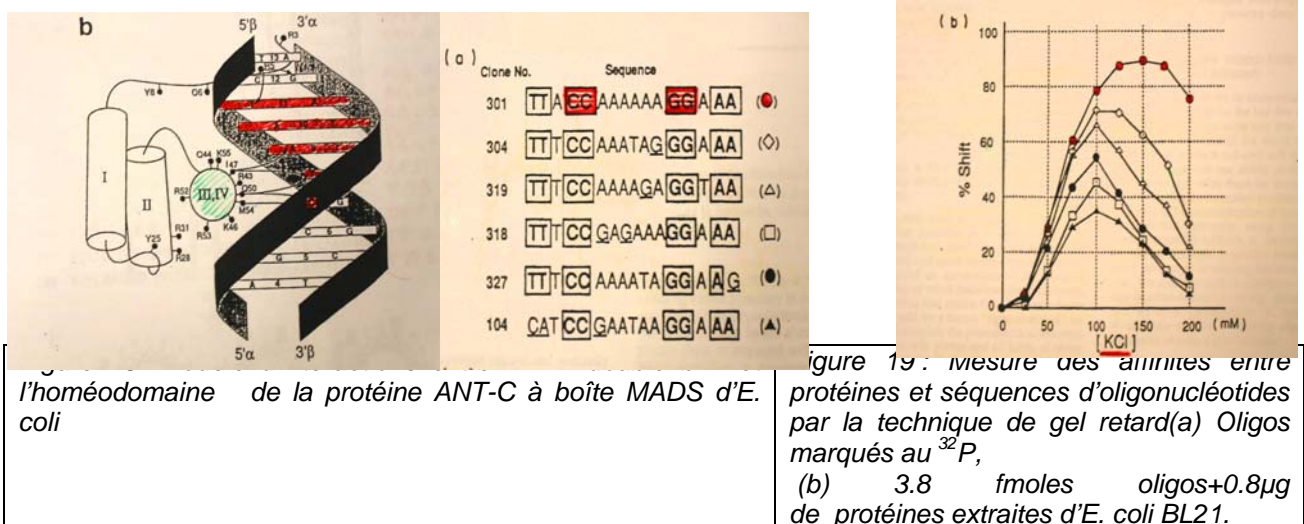
Chez les bactéries, lorsque le niveau de tryptophane est élevé dans la bactérie, il se fixe sur le répresseur de l'opéron tryptophane et l'active. Ceci se traduit par un changement de conformation du répresseur. La distance entre les 2 hélices de reconnaissance à l'ADN augmente et permet ainsi au répresseur de se fixer sur l'opéron (site de fixation du répresseur et de l'ARN polymérase sur le promoteur) qui va empêcher la fixation de la polymérase et donc la transcription des gènes codant les enzymes nécessaires à la synthèse du tryptophane. Dans le modèle de l'opéron lac (transport et catabolisme du lactose) chez *E. Coli*, le répresseur lac et l'activateur CAP coopèrent selon les conditions du milieu (\pm glucose ou \pm lactose). Il y a un double contrôle de l'opéron lac lié à l'action indirecte des taux de glucose et de lactose sur le répresseur de l'opéron lac et sur CAP.

Chez les eucaryotes, la régulation des gènes est soumise à un spectre de signaux beaucoup plus grand que les organismes doivent intégrer entraînant des modes de régulation notablement différents de celle des procaryotes. Les ARN polymérases doivent interagir avec les facteurs de transcription généraux pour initier la lecture du brin codant. Par ailleurs, de nombreuses protéines trans-régulatrices spécifiques, soumises à des changements d'état (phosphorylé en particulier), interviennent seules ou associées dans la régulation de la transcription assurée par les ARN polymérases. De plus, comme nous l'avons déjà mentionné, des phénomènes de repliements de l'ADN comme celui du remodelage de la chromatine, dépendant des protéines nucléaires liées à l'ADN, pourront aussi avoir des effets forts sur les quantités de transcrits produits dans une cellule donnée.

e) Quelques exemples fondamentaux récents. A titre d'exemple, nous analyserons plusieurs familles de facteurs de transcription qui se lient à l'ADN capables de contrôler de nombreux processus physiologiques chez la plante ou l'animal que nous détaillerons ci-après:

Les protéines à boîte MADS.

Mode d'interaction à l'ADN : Le premier modèle d'interaction provient d'études conduites chez la drosophile suite à l'analyse de mutants développementaux tels que *antennapedia* (mutant *antp*). Ce gène code une protéine à homéodomaine de type Hélice-Tour-Hélice (HTH) qui est un facteur de transcription se liant à de nombreux points de la double hélice d'ADN montrés dans la *figure 18*. Une étude de retard sur gel a permis d'évaluer les affinités entre les protéines de type AGAMOUS (AG) et une série de séquences d'oligonucléotides reconnue par ces facteurs de transcription. Ces affinités varient du simple au double et dépendent à la fois du type de bases et de leur position formant la séquence mais aussi de la concentration en sel (KCl) dont l'optimum se situe entre 100 et 150 mM (*figure 19*).



l'homéodomaine de la protéine ANT-C à boîte MADS d'E. coli

Aspects de régulation particuliers : la méthylation des éléments cis-régulateurs de fixation du domaine MADS empêche très significativement ces interactions.

Fonctions et applications: Ces protéines à boîtes MADS (AG, MCM1, SRF) sont codées par des gènes homéotiques. A titre d'exemple, ils contrôlent le développement des pièces florales (étamines et pistil) chez les végétaux, le cytosquelette (actine) chez les vertébrés, la maintenance des minichromosomes chez la levure, ...

- Les protéines GBF

Mode d'interaction à l'ADN : Ce sont des facteurs de transcription possédant un domaine riche en proline en position N-terminale, un domaine basique et un domaine leucine zipper. Il a été montré que (i) le domaine basique est responsable du transport de la protéine du cytoplasme au noyau et de sa fixation à l'ADN, (ii) le domaine leucine zipper détermine la dimérisation de la protéine et (iii) le domaine riche en proline serait impliqué dans la régulation de la transcription des gènes. La position des GBF sur l'ADN est montrée dans la *figure 20*. En fait, les 2 domaines en hélice alpha de fixation à l'ADN, réunis par leur région hélice alpha à répétition de leucines, forment ainsi une structure en Y

(fourche) qui intervient dans la fixation à la G-box par exemple. Cette structure typique est marquée par 2 phénomènes importants : 1- L'agrégation des 2 hélices monomériques grâce aux résidus leucines, conséquence d'interactions électrostatiques formant une zone interne hydrophobe. 2- La courbure des hélices (fourche flexible) qui interagissent avec l'ADN au niveau des domaines basiques.

Figure 20 : Mode de liaison des protéines GBF à la double hélice d'ADN. Ces facteurs de transcription possèdent un domaine nommé leucine zipper qui joue rôle essentiel dans l'interaction entre les 2 hélices alpha venant se positionner comme une pince au niveau du grand sillon de l'ADN. Les GBF reconnaissent en particulier un élément cis-régulateur appelé G-box ou boîte G dont le cœur de la séquence nucléotidique est connue.

Aspects de régulation particuliers: Les GBF (bZIP G-box binding factors), comme leur nom l'indique, se fixent avec une forte affinité sur les motifs de type G-box (motif qui a pour séquence centrale : CACGTG) et d'une manière moins courante sur les motifs de type C-box. Par ailleurs, comme de nombreux facteurs de transcription, les GBF voient leur activité moduler en fonction de leur degré de phosphorylation. En effet, la phosphorylation de sérines conservées bien spécifiques du domaine basique cause une perte totale de l'aptitude des GBF à se fixer à l'ADN. Cependant chez les plantes, la phosphorylation de la GBF-1 de l'arabette par une caséine kinase s'est traduite par une augmentation de l'affinité entre la protéine AtGBF-1 et la G-box.

Fonctions et applications: Les GBF interviennent dans les processus de régulation dépendant de la lumière bleue, elles sont capables d'intervenir dans la modulation des voies de biosynthèse des alcaloïdes, elles sont aussi impliquées dans la régulation des gènes pendant le développement du fruit et semblent capables de moduler les gènes régulés par l'auxine. Enfin, dans le cadre de l'ingénierie métabolique, l'étude des fonctions régulatrices des GBF chez la pervenche de Madagascar (*Catharanthus roseus*) a permis de déréguler, par une stratégie antisens GBF, plusieurs gènes de la voie de biosynthèse des alcaloïdes indoliques monoterpéniques et permettre ainsi la production de molécules d'intérêts.

- Les protéines MYB à domaine R2R3

Mode d'interaction à l'ADN : Les protéines MYB possèdent un domaine de fixation à l'ADN composé de plusieurs motifs incomplets de type Hélice-Tour-Hélice (HTH) constitués de résidus hydrophobes. Trois hélices de type HTH (50 aminoacides chacune) se répètent le plus souvent 2 à 3 fois et

correspond à la super famille R2 et R3 (R = Répétition). R1 quand il est présent n'affecte pas l'affinité avec l'ADN. Le groupe des protéines MYB R2-R3 est la plus importante (figure 21).



Figure 21 : Positionnement des 2 hélices R2 et R3 du domaine de fixation des protéines MYB sur la double hélice de l'ADN représentée en couleur orange.

Aspects de régulation particuliers: Les motifs cis-régulateurs reconnus par les protéines MYB de type R2R3 sont à titre d'exemple: Motif H-box (CCTACC), cas du gène PAL (Phénylalanine amonia-lyase) qui code les enzymes de la voie de biosynthèse des acides hydroxycinnamiques, régulé par un facteur MYB. Motif P-box (AACCTAAC), cas du gène CHI (chalcone isomérase) qui code les enzymes de la voie de biosynthèse flavonoïdes, régulé par un facteur MYB. Cependant d'autres éléments cis-régulateurs ont été identifiés ne permettant à ce jour ni de dresser une liste complète des séquences reconnue par les facteurs MYB ni d'établir une règle dans la reconnaissance entre partenaires. Ceci vaut pour l'ensemble des interactions ADN – Protéine.

Fonctions et applications : Ces facteurs MYB contrôlent le développement des plantes et la morphogenèse. Ils interviennent sur la forme de cellules (cellules épidermiques coniques des pétales, expansion des cellules des trichomes). Ils contrôlent la division cellulaire via l'activation des gènes *cdc2* chez les animaux en particulier. Ils entrent dans les voies de transduction des signaux hormonaux (GIB, ABA, AIA, CK et C_2H_4) et des signaux environnementaux (UV, stress osmotique et hydrique). Ils régulent le métabolisme des phénylpropanoïdes et des flavonoïdes responsables de la couleur des fleurs et de la lignification des parois cellulaires en particulier (figures 22). Ce dernier point les place au tout premier plan dans le domaine de l'ingénierie métabolique, visant à maîtriser des voies de biosynthèses complexes chez les végétaux afin de produire des molécules d'intérêts (alimentation, santé). C'est dans cet optique qu'une étude conduite chez le maïs a montré l'existence de 2 gènes régulateurs codant 2 facteurs trans-régulateurs C1 et R capables de réguler de manière coordonnée les synthèses aboutissant à l'accumulation des anthocyanes au niveau de la couche à aleurone du caryopse. Ces 2 protéines présentent une forte homologie avec les protéines appartenant aux familles cMYB (pour C1) et cMYC (pour R) déjà caractérisées chez les vertébrés. Ces gènes ont été ensuite utilisés pour modifier la biosynthèse des antocyanes chez 2 autres espèces végétales : l'arabette et le tabac. Des plants ont été transformés par *Agrobacterium* de manière à faire sur-exprimer les gènes C1 et R du maïs. Les plantes transgéniques obtenues ont sur-accumulé des anthocyanes dans une grande partie de leurs organes. Cette sur-expression a provoqué la synthèse et l'accumulation d'anthocyanes dans des tissus qui n'en synthétisaient pas (racines) et de montrer que près de 150 gènes étaient activés incluant ceux responsables de leur transfert dans la vacuole (transporteur). Ces travaux ont permis de prouver qu'il était possible de réguler des voies métaboliques complexes (flavonoïdes) en utilisant seulement 2 protéines. Il montre aussi qu'un

processus biologique donné peut donc être contrôlé par un nombre très limité de protéines trans-régulatrices et laisse penser que des connaissances approfondies de ces interactions ADN – Protéine deviendront des outils performants et intégrateurs dans le domaine des biotechnologies.

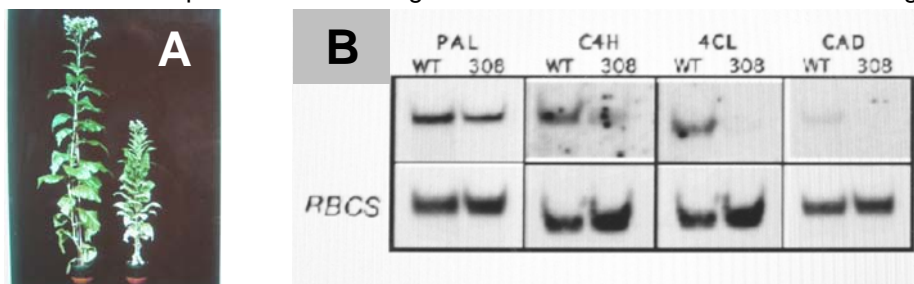


Figure 22 : (A) Effets d'une sur-expression du gène *AtMYB 308* (M) sur le développement de plants de tabac. C, témoin. (B) Expression des gènes codant 4 enzymes de la voie de biosynthèse des acides hydroxycinnamiques (PAL et C4H) et des monomères de lignines (4CL et CAD) chez le tabac sauvage (WT) ou sur-exprimant le gène *AtMYB 308* (308). Analyses effectuées par Northern blot de 15 µg d'ARN poly(A)+ de feuilles. La protéine *AtMYB308* est un répresseur. RBCS, témoin interne.

C- Réplication de l'ADN et migration des chromosomes de la plaque métaphasique aux pôles lors de la mitose ou de la méiose.

Fourche de réplication et machinerie enzymatique. Les modèles de la réplication de l'ADN sont aujourd'hui bien décrits, en particulier au travers des fragments d'Okazaki, et permettent de comprendre comment l'ADN se réplique dans toutes les cellules en division avec une grande fidélité. Ce processus vital met en jeu une machinerie protéique extraordinaire et raffinée pour contrôler un processus aussi complexe. Il faut non seulement répliquer des quantités phénoménales d'ADN dans chacune des cellules, mais aussi conserver toute l'intégrité de ces séquences d'ADN au cours de la réplication. Des mécanismes de véritables corrections sur épreuves sont opérationnels dans la cellule. L'originalité de ce processus réside dans le fait que, puisque les 2 chaînes filles d'ADN formant la fourche sont synthétisées dans le sens 5'=> 3', l'ADN synthétisé sur la chaîne tardive doit être initialement fabriquée comme une série de courtes séquences d'ADN nommées fragments d'Okazaki (Figure 23). Il s'agit d'une machinerie bien décrite chez *E. coli*, parfaitement orchestrée, constituée de protéines qui sont regroupées en un grand complexe multienzymatique et qui se déplacent rapidement le long de l'ADN. De nombreuses interactions entre ce complexe protéique et l'ADN ont lieu, qui peuvent être de nature très différente. Par exemple un système de clamp formé par 2 sous-unités entoure l'ADN et maintient l'ADN polymérase en mouvement sur l'ADN (Figure 24). D'autres protéines de type hélicase interviennent directement sur la conformation de l'ADN (déroulement de la double hélice) et maintiennent l'ouverture de la fourche ou de type monomérique déstabilisent la double hélice pour linéariser l'ADN simple brin de la chaîne tardive (Figure 25). Ces processus sont retrouvés d'une manière très similaire chez les eucaryotes, mais on comprend facilement, vu la taille du génome humain par exemple, qu'il faudrait 800 heures pour le répliquer avec une seule fourche de réplication (pour une vitesse de 50 nucléotides répliqués par seconde). C'est la raison pour laquelle on a pu mettre en évidence à l'aide d'un marquage à la ³H-Thymidine la présence de plusieurs origines de réplication (unités de réplication) pouvant être activées par groupes de 20 à 80 au cours de la phase S du cycle cellulaire. Cette activation dépend de protéines d'initiation liées aux origines de réplication

suite à la mise en place d'une hélicase, première enzyme intervenant dans ce processus de synthèse et participant à sa réparation.

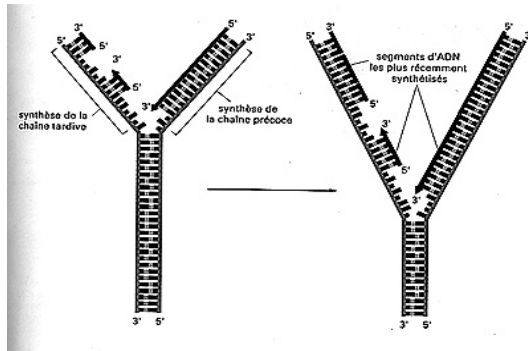


Figure 23 : Fourche de réplication constituée de 2 brins précoces et tardifs en cours de progression.

Figure 24: Véritable nœud coulant de nature protéique fixant l'ADN polymérase sur l'ADN à répliquer. Clamp trouvé chez *E. coli* mais présent aussi chez les eucaryotes.

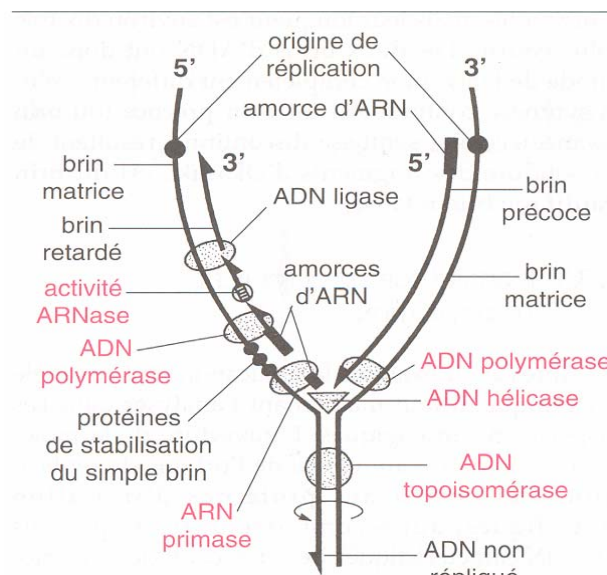


Figure 25: Principales activités enzymatiques impliquées dans le fonctionnement de la fourche de réplication. L'ADN Polymérase polymérise dans le sens 5'-3' et fonctionne en continue le long du brin 3'-5', mais en discontinue et à reculons, le long du brin 5'-3': «fragments d'Okazaki»

Kinétochores des chromatides dès le stade prophase et rôles dans la division cellulaire. Les kinétochores se forment au niveau des centromères de chaque chromosome dupliqué (formé de 2 chromatides sœurs) et vont les diriger dans le fuseau mitotique. Il s'agit de complexes protéiques spécialisés qui s'assemblent au niveau de chaque centromère. Il y a donc 2 kinétochores par chromosome (un sur chaque chromatide sœur) qui peuvent être visualisés en microscopie électronique sous la forme d'une structure plane multi-laminaire. On connaît chez la levure les séquences d'ADN qui servent à assembler les protéines kinétochoriennes au niveau des chromatides.

Grâce aux auto-anticorps produits dans le cadre de la sclérodermie chez l'homme, il est aujourd'hui possible de produire de grandes quantités de protéines kinétochoriennes recombinantes qui permettront de caractériser à terme leurs interactions entre elles, avec l'ADN et les microtubules. En effet, ces kinétochores s'associent aux extrémités + des microtubules kinétochoriens via des protéines motrices selon une véritable stratégie de capture lors de l'allongement de ces microtubules formant le fuseau mitotique. Comme nous l'avons déjà mentionné, ces complexes ADN – kinétochores jouent donc un rôle clé dans la migration des chromatides de la plaque métaphasique vers les pôles du fuseau (stade anaphase de la mitose). Ces mécanismes d'alignement et de séparation des chromosomes lors des divisions I et II de la méiose sont en tous points identiques à ceux utilisés au cours de la mitose normale, mis à part le fait que les kinétochores des chromatides sœurs fusionnent à la métaphase I alors qu'ils redeviennent distincts à la métaphase II. Mais d'une manière spécifique à la première phase méiotique, les chromosomes homologues s'apparient grâce au complexe protéique synaptonémal qui semble indispensable à la recombinaison génétique par l'intermédiaire des nodules de recombinaison (complexe enzymatique) distribués régulièrement sur le complexe synaptonémal. Cette association repose sur des interactions multiples entre la matrice protéique formée d'éléments latéraux et d'enzymes et l'ADN des chromatides sœurs déployées de part et d'autre en une série de boucles (*Figure 15*).

D- Recombinaison et insertion de fragments d'ADN au sein des génomes participent à la diversité des êtres vivants et à leur adaptation aux facteurs environnementaux.

Recombinaisons et mutations. Les mécanismes des recombinaisons génétiques générales et spécifiques permettent le déplacement de longs segments de la double hélice d'ADN d'un chromosome à un autre. On distingue la recombinaison conservative spécifique de site qui produit un court hétéroduplex et la recombinaison transpositionnelle qui n'entraîne pas de jonction décalée et qui ne nécessite pas de séquence spécifique sur l'ADN cible. Ces mécanismes sont sous le contrôle d'un enzyme appelé intégrase qui possède également une activité topoisomérase. Elle a été découverte chez le virus bactérien (bactériophage lambda) qui utilise ce moyen pour intégrer son génome chez celui d'*E. coli* et de l'en sortir. Cette enzyme catalyse un processus de recombinaison qui débute quand de multiples copies de cette protéine se lient à une séquence d'ADN spécifique sur le chromosome circulaire du bactériophage. Ce complexe protéine-ADN se lie alors à une séquence d'ADN différente spécifique sur le chromosome bactérien.

Les éléments transposables sont des entités génétiques très bien définies qui codent des fonctions spécifiques nécessaires à leur propre transposition au sein du génome. Il existe un très grand nombre d'éléments transposables regroupés en 2 classes : Rétroéléments et transposons à ADN. Dans le cas des rétroéléments avec (rétrovirus et rétrotransposons) ou sans (rétroposons) LTR (répétition terminale longue), une intégrase excise de l'ADN double brin d'un rétrovirus qui va ensuite s'intégrer dans le génome d'une cellule animale. L'intégrase coupe un des brins à chacune des extrémités de la séquence d'ADN viral exposant ainsi un groupement 3'OH sortant. Ce groupement va attaquer au

hasard une liaison phosphodiester sur les brins opposés d'un site de l'ADN cible. Dans le cas des transposons à ADN bordés de TIR (répétition terminale inversée), c'est une transposase codée généralement par le transposon lui-même qui va couper au niveau des séquences TIR puis coller l'élément bicaténaire ailleurs dans le génome. Chez les eucaryotes, la transposition d'un élément est normalement conservative. L'action de ces 2 enzymes sur l'ADN double brin entraîne de profonds remaniements chromosomiques et ils sont une source importante de diversité génétique.

Transfert de l'ADN-T dans la cellule végétale. *Agrobacterium tumefaciens* est une bactérie du sol gram négatif, connue pour provoquer chez de nombreuses espèces végétales ligneuses une maladie appelée galle du collet. Suite à une blessure, la bactérie infecte les tissus de la plante au niveau des racines ou du collet et induit la formation d'une excroissance (cal) des tissus infectés résultant d'une stimulation de la prolifération cellulaire. Il a été mis en évidence que ce symptôme était dû au transfert de matériel génétique de la bactérie vers la cellule végétale. Plus précisément, cette bactérie utilise toute une machinerie cellulaire de nature protéique qui permet de transférer une partie de l'ADN de son plasmide (l'ADN-T) à une cellule végétale et d'insérer cet ADN-T dans son génome. Cette séquence d'ADN bactérien ainsi intégrée contient plusieurs gènes codant des enzymes responsables de la production d'opines, d'auxine et de cytokinines. Ces gènes vont alors s'exprimer dans la cellule hôte. Ce qui va assurer la survie des agrobactéries (utilisation des opines) et déclencher la formation de la tumeur (hormones végétales). Ce phénomène aujourd'hui bien décrit a fortement contribué au développement des biotechnologies végétales et en particulier de la transgénèse végétale. On utilise des souches d'agrobactéries dites désarmées (délétion de leurs oncogènes), mais capables de transférer des séquences d'ADN cibles introduites dans un vecteur de transformation qui seront ensuite intégrées par simple ligation dans un plasmide fonctionnel. Toute cette machinerie cellulaire met en jeu des gènes identifiés codant des protéines VIR dont plusieurs d'entre-elles vont interagir directement avec l'ADN plasmidique pour assurer ce transfert de la bactérie vers la cellule végétale (figure 28). En effet, les protéines VIR G, VIR D1, VIR D2 et VIR E2 vont interagir avec l'ADN bactérien à 3 niveaux : 1- VIR G, après avoir été activé par le récepteur membranaire VIR A lui-même activé par l'acétosyringone (composé phénolique), va se comporter comme un régulateur positif de la transcription des gènes *VIR B, D, E, ...* 2- VIR D1 et D2 sont des endonucléases qui vont exciser l'ADN-T de 20 Kb en coupant au niveau des bordures droite et gauche (séquences répétées de 24 pb). La protéine VIR D2 va alors se fixer de manière covalente à l'extrémité 5' de cette ADN-T monobrin par une liaison phospho-tyrosine. 3- Les protéines VIR E2 ainsi que l'ADN-T lié à VIR D2 sont transférés dans la cellule végétale via un canal formé par les protéines VIR B. Une fois dans le compartiment cytosolique de la cellule hôte, 600 molécules de VIR E2 vont envelopper l'ADN-T et former le « T-complex », forme de protection vis à vis des nucléases de la cellule végétale et forme de transport dans le noyau via les pores nucléaires. Plusieurs copies de cet ADN d'origine bactérienne vont être insérées au hasard dans le génome de la cellule végétale mettant en jeu des digestions enzymatiques et des réplifications de l'ADN-T selon des processus encore peu étudiés. Cet exemple montre là encore toute l'importance de ces interactions multiples dans ces processus biologiques très élaborés mettant en jeu l'expression des gènes de virulence, l'excision spécifique d'une séquence

d'ADN du plasmide, la protection de séquences par des liaisons faibles (enveloppe) ou covalente (extrémité 5') et l'insertion de l'ADN-T dans le génome de la plante.

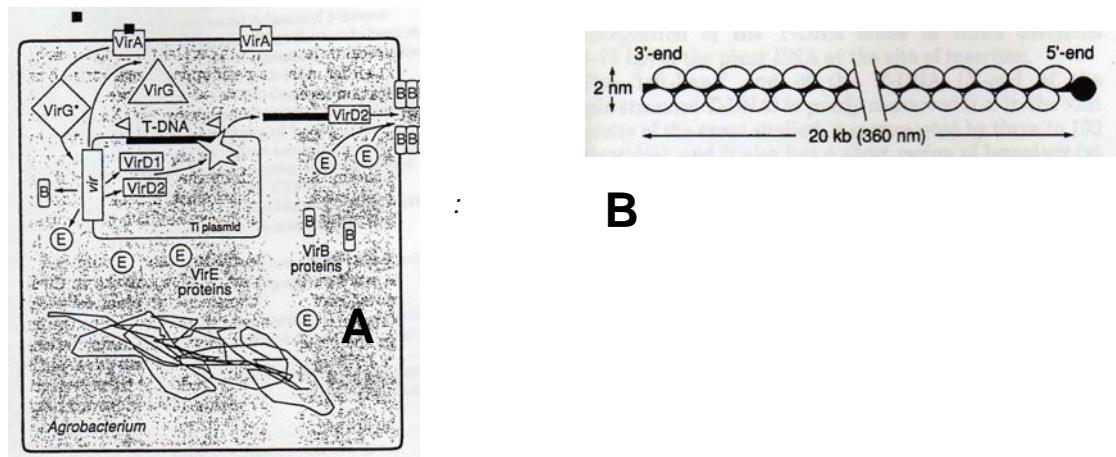


Figure 26 : Machinerie cellulaire d'*Agrobacterium tumefaciens* mettant en jeu les protéines VIR suite à une activation de la protéine membranaire VIR A par des composés de nature phénolique produits par la plante. Ce récepteur va activer VIR G qui est un activateur transcriptionnel des gènes VIR B, D, E, ... Les protéines VIR D coupe l'ADN-T sur les 2 bordures (24 pb), VIR D2 se lie de façon covalente avec l'extrémité 5' de l'ADN-T (A) et les protéines VIR E forment une gaine tout le long de l'ADN-T monobrin dans la cellule végétale pour forme le complexe-T (B) après que l'ADN-T et VIR E aient été transportés dans la cellule végétale via un canal formé par les protéines VIR B.

E- Protection des bactéries par leurs enzymes de restriction et utilisation en biologie moléculaire

Les enzymes de restrictions, d'origine bactérienne, sont aujourd'hui indispensables pour l'analyse des chromosomes, le séquençage de très longues molécules d'ADN, l'isolement des gènes et la création de nouvelles molécules d'ADN qui peuvent être clonées. Chez les bactéries, les sites de restriction de leur ADN ne sont pas reconnus par ces enzymes car les sites sont méthylés. Mais ces enzymes sont capables de cliver et neutraliser n'importe quel ADN étranger à la bactérie. Ces enzymes très diversifiées ont comme point commun de reconnaître très spécifiquement des séquences spécifiques et d'hydrolyser une liaison phosphodiester dans chaque brin d'une séquence particulière. Par ailleurs, une caractéristique des sites de clivage est qu'ils possèdent une symétrie de rotation d'ordre 2. Cela veut dire qu'il s'agit d'une unité répétitive inversée et que les sites de clivage sont positionnés symétriquement. Comme mentionné ci-dessus, on parle de séquence palindromique. Cette symétrie correspond d'ailleurs à celle des enzymes de restriction eux-mêmes. L'important est bien la spécificité entre séquences nucléotidiques et enzymes de restriction: EcoRI – GAATTC / CTTAAG ; BamHI – GGATCC / CCTAGG. Enfin les fragments de restrictions d'ADN sont facilement séparés par électrophorèse sur gel d'agarose ou d'acrylamide et visualisés par autoradiographie ou par fluorescence grâce au bromure d'éthidium (*figure 27 et 28*). Sur la base de cet exemple, on peut par extension signaler les nombreuses techniques de biologie moléculaire disponibles. On citera plus spécialement les méthodes qui servent à l'analyse de l'ADN et celles qui reposent principalement sur l'utilisation de protéines enzymatiques d'origine bactérienne. Quelques méthodes utilisées en biologie

moléculaire: 1- le séquençage de l'ADN par terminaison de chaîne (ADN polymérase). 2- l'amplification des séquences d'ADN par PCR (ADN polymérase thermostable). 3- la formation de molécules d'ADN recombinant (enzymes de restriction et ADN ligases). 4- la mutagenèse dirigée, le clonage moléculaire (enzyme de restriction, ligase). 5- le marquage de l'ADN (DNase I, ADN polymérase). 6- la construction d'une banque d'ADN génomique. 7- le criblage d'une banque. 8- les marqueurs génétiques moléculaires. Ceci montre toute l'étendue de la maîtrise que nous avons aujourd'hui de ces outils moléculaires qui reposent une nouvelle fois les interactions entre ADN et protéines.

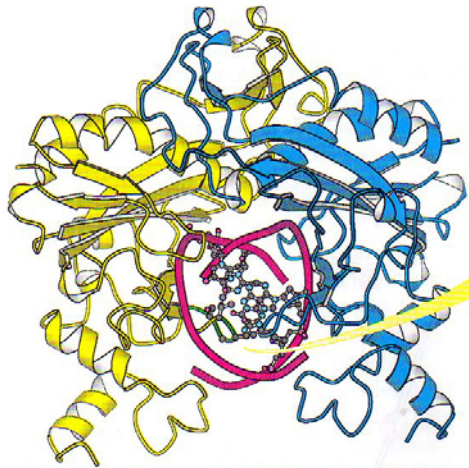


Figure 27 : Interactions par des liaisons hydrogènes entre l'endonuclease EcoRV et son ADN en tant que substrat. Une des boucles de fixation à l'ADN (en vert) de l'enzyme est en interaction avec les paires de bases du site de fixation de son ADN de reconnaissance. Les liaisons établis entre les paires de bases et les résidus d'acides aminés de l'endonuclease sont : C – G / Gly182, Gly184, Asn185 et T – A / Asn185, Thr186.

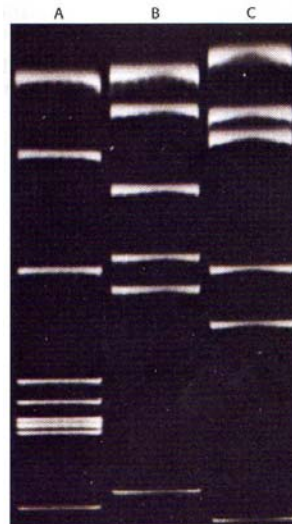


Figure 28 : Electrophorèse sur gel d'acrylamide de 3 digestions d'ADN circulaire double brin de 5,1 kb du virus oncogène SV40 par 3 enzymes de restriction A, B et C. Ces fragments sont rendus fluorescents orange par coloration du gel avec le bromure d'éthidium. Ce réactif se fixe sur les molécules d'ADN en double hélice.

VI- Conclusion et perspectives biotechnologiques

Nous avons distingué 5 principales familles de protéines telles que les histones, les enzymes, les facteurs de transcription, les facteurs de remodelage et certaines protéines structurantes qui sont capables de se lier à l'ADN mono- ou bicaténaire. Ceci nous a conduits à considérer 4 principaux processus cellulaires : le compactage de la chromatine, la régulation de la transcription, la réplication de l'ADN accompagnée d'une redistribution du matériel génétique dans la cellule en division et le brassage de séquences d'ADN génomique. Ces processus se déroulent tout au long du cycle cellulaire reposant sur le principe d'un contrôle combinatoire qu'il adviendra à terme d'élucider par des approches analytiques massives de ces interactions et des traitements bioinformatiques indispensables pour étudier un tel degré de complexité. Bien entendu cette science des interactions entre molécules ne se limite pas à celles traitées ici. De très nombreuses interactions basées sur le principe de réversibilité entre 2 partenaires (fixation / dissociation) mettent en jeu également des liaisons électrostatiques faibles, des environnements hydrophobes, des conformations structurales spécifiques des molécules. Hormis les interactions ADN – Protéine et Protéine – Protéine déjà abordées, les relations telles que ARN – Protéine, Protéine – Polyphénol, Protéine – Indole, Protéine – Sucre, ADN – Polyphénol, Sucre – Sucre, ... déterminent également de nombreux processus intra- et intercellulaires, mais également sont directement responsables des relations hôtes – parasites et hôtes – symbiotes mettant en jeu des phénomènes de reconnaissance à haute spécificité.

Quelles perspectives biotechnologiques peut-on envisager sur la base des connaissances actuelles ?

Le développement de grandes plateformes européennes semblent être une clé pour déterminer de manière systématique les interactions ADN - Protéine et Protéine - Protéine d'un génome au cours de son développement soumis ou non à des contraintes environnementales fortes. Dans ce contexte scientifique marqué par la « omique » (génomique, protéomique, métabolomique), on parle déjà d'« interactomique » ou de « régulomique » qui permettra d'envisager une meilleure compréhension des réseaux de gènes ou réseaux de régulation gouvernant les processus physiologiques et génétiques d'une cellule, d'un tissu, voire même d'un organisme entier. Le système Biacore apparaît comme une des techniques d'avenir pour acquérir des données massives déterminant ces relations d'affinité entre protéines nucléaires et séquences d'ADN cibles par exemple. Il devient alors possible d'établir des cartes mettant en relations chacun des gènes ou groupe de gènes soumis à la régulation d'un autre via un ou plusieurs partenaires protéiques. Il s'avère alors crucial de développer, de manière complémentaire, des approches fonctionnelles de telles interactions pour connaître cette fois non seulement le niveau d'affinité entre partenaires mais aussi leurs fonctions en termes d'activation et de répression. Fonctions qui se traduisent par des niveaux de transcrits et de protéines variables dans les différents compartiments cellulaires, adaptant ainsi les cellules à leurs besoins pour survivre et se développer. C'est en effet une des voies passionnantes de la biologie qui devrait nous permettre d'acquérir à terme une vision novatrice du fonctionnement des génomes et du développement des organismes.

Domaines porteurs d'avenir :

- L'identification des facteurs régulateurs de l'expression des gènes a contribué grandement au développement de l'ingénierie métabolique visant à maîtriser la production de métabolites d'intérêts chez les végétaux cultivés au champ ou en culture *in vitro*. C'est le cas de la production d'alcaloïdes indoliques monoterpéniques chez des suspensions cellulaires de *Catharanthus roseus* qui est sous le contrôle de plusieurs facteurs de transcription régulant l'expression des gènes codant les enzymes des voies de biosynthèse du tryptophane, de la sécolaganine et de l'ajmalicine. L'identification de protéines trans-régulatrices de type ORCA, MYC, GBF couplée à des méthodes de transformation transitoire indiquent qu'il est possible de favoriser la biosynthèse des alcaloïdes, donc moduler de manière coordonnée l'expression de gènes codant des enzymes appartenant à une même voie métabolique à l'aide d'un nombre très limité de facteurs de transcription. Des résultats similaires, déjà signalés, ont été obtenus sur le contrôle de la voie de biosynthèse des flavonoïdes aboutissant à la production d'anthocyanes. Ces travaux confirment bien le fait qu'en maîtrisant les systèmes de régulation se déroulant au niveau des régions promotrices des gènes, il est possible aujourd'hui de contrôler des voies métaboliques complexes entières à l'aide d'un nombre extrêmement réduit de protéines nucléaires.

- La transformation génétique des plantes repose sur les mécanismes de transfert de l'ADN-T qui sont contrôlés par les protéines VIR dans les cellules végétales. Cet outil moléculaire est utilisé aussi bien pour la recherche en biologie (étude de la fonction des gènes *via* l'utilisation de transformants sur-exprimant ou bloquant l'activité de gènes cibles) que pour la création de nouvelles variétés présentant des caractères agronomiques d'intérêts (résistance à un herbicide, résistance aux insectes ravageurs, peupliers hypolignifiés pour l'industrie papetière, amélioration de la qualité nutritionnelle d'un aliment tel que le riz enrichi en vitamine A). Dans le cas du riz, l'équipe de Potrykus à Zurich a introduit plusieurs gènes codant des enzymes contrôlant la transformation du géranyl-géranyl-diphosphate en carotène, précurseur de la vitamine A. Le promoteur de ces transgènes a été choisi de façon à n'activer la transcription des gènes que dans le grain en formation prenant une couleur jaune doré, d'où le nom de riz doré de cette nouvelle variété transgénique. Grâce à ces techniques, des molécules d'intérêts thérapeutiques ont pu être produites à partir de plantes transgéniques (tabac, colza, pomme de terre, tomate) telles que la lipase gastrique du chien (mucovisidose et insuffisance gastrique), l'hémoglobine humaine (transfusion), la sous-unité de l'entérotoxine d'E. coli (immunisation de la souris, vaccins oraux), les glycoprotéines de la rage (vaccination), l'interféron gamma (antiviraux).

- Le décryptage de certaines maladies cancéreuses en particulier qui permettront la découverte de nouvelles stratégies de traitements reposent également sur les interactions ADN – protéine. L'apparition de tumeurs chez l'homme dépend de 2 classes de gènes essentielles : les suppresseurs de tumeurs et les proto-oncogènes. Les pertes et les gains de fonctions par mutation de ces

différents gènes sont à l'origine du développement des cancers. Cas de la protéine p53 (suppresseur de tumeurs): Impliquée dans la plupart des tumeurs malignes, la dérégulation de p53 compromet l'apoptose habituellement programmée par toute altération du génome. Les mutations du gène p53 concernent environ 50% des cancers et, dans les tumeurs où le gène n'est pas muté, il existe fréquemment une altération fonctionnelle de la protéine. Cette altération est fréquemment le fait d'une dégradation anormale de p53 par le protéasome. Deux rôles connus pour cette protéine : soit l'arrêt du cycle cellulaire entre la phase G 1 et la phase S, soit la mort cellulaire par apoptose. La protéine p53 se lie avec une séquence spécifique d'ADN, interagit avec des acétylases et des complexes de remodelage, déstabilisant la chromatine. Sa fonction est de bloquer le cycle cellulaire par l'intermédiaire d'un gène appelé WAF1 / Cip1, (pour Wild Type p53-activated fragment et cdk2 inhibiting protein) dont la protéine p21 se lie aux kinases cdk2, et inhibe leur activité. La cellule s'arrête avant la synthèse de l'ADN et peut réparer d'éventuels dommages. De nombreux stimuli provoquent l'augmentation de la p53, notamment l'irradiation par les rayons X ou gamma. Dans d'autres cellules, l'augmentation de la protéine p53 induite par l'irradiation provoque l'induction de l'apoptose ou mort programmée, que l'on peut interpréter comme la solution préférentielle pour l'organisme quand la réparation de l'ADN n'est pas possible.

- La thérapie génique consiste à faire exprimer chez l'homme des gènes spécifiques pour contrecarrer certaines déficiences dues à des anomalies génétiques graves. Une autre approche est de modifier des gènes contenant des variations de séquences ayant des conséquences fâcheuses pour les organismes malades. C'est le cas d'une affection appelée « déficit immunitaire combiné sévère » liée à un gène non fonctionnel codant l'adénosine désaminase. L'expression fonctionnelle de gènes codant cette enzyme a pu être conduite avec succès par introduction dans les cellules des patients des vecteurs dérivés de rétrovirus, faisant appel là encore à une machinerie cellulaire basée sur les relations ADN – Protéines. Mais même si les symptômes cliniques ont été réduits, il reste à prolonger la durée de l'effet thérapeutique et éliminer les effets secondaires.

La recherche dans ce grand domaine porte en elle l'espoir de faire de la thérapie génique des outils importants pour la médecine de demain. Elle contribuera sans l'ombre d'un doute au développement des biotechnologies, y incluant naturellement les nanotechnologies, qui seront mises au service de l'homme pour préserver à la fois sa qualité de vie (santé et alimentation) et celle de son environnement.

Quelques références d'ouvrages et d'articles utilisées

- Alberts B. *et al.*, 2001. Biologie moléculaire de la cellule. 3^{ème} édition, Médecine-Sciences Flammarion. ISBN : 2257152190. 1294p.
- Berg J.M., Tymoczko J.L., Stryer L., 2008. Biochimie. 6^{ème} édition, Médecine-Sciences Flammarion. ISBN : 9782257000033. 1026p
- Borevitz J.O. *et al.*, 2000. Activation tagging identifies a conserved MYB regulator of phenylpropanoid biosynthesis. *Plant Cell*, 5, 1497-1512.
- Latchman D.S., 1994. Transcription factors, a practical approach. IRL Press. ISBN : 0199633428. 206p.
- Shiraishi H., Okada K., Shimura Y., 1993. Nucleotide sequences recognized by the AGAMOUS MADS domain of *Arabidopsis thaliana* *in vitro*. *Plant Journal*, 4, 365-398.
- Sibéril Y., Doireau P., Gantet P., 2001. Plant bZIP G-box binding factors. Molecular structure and molecular mechanisms. *Eur. J. Biochem.*, 268, 1-13.
- Sing K.B., 1998. Transcriptional regulation in plants : the importance of combinatorial control. *Plant Physiol.*, 118, 1111-1120.
- Tamagnone L. *et al.*, 1998. The AmMYB308 and AmMYB330 transcription factors from *Antirrhinum* regulate phenylpropanoid and lignin biosynthesis in transgenic tobacco. *Plant Cell*, 10, 135-154.
- Theissen G. *et al.*, 2000. A short history of MADS-box genes in plants. *Plant Molecular Biology*, 42, 115-149.
- Tourte Y., 2001. Les OGM, la transgénèse chez les plantes. Dunod. ISBN : 2100052799. 139p.
- Tinland B., 1996. The integration of T-DNA into plant genomes. *Trends in Plant Sciences*, 1, 178-184.
- Tagu D., Moussard C., 2003. Principes des techniques de biologie moléculaire. 2^{ème} édition, INRA Edition. ISBN : 2738010679. 176p.

Agrégation SV-STU 2008 Épreuve du secteur A		n° de copie	signatures des correcteurs		/20
si la copie est blanche, mettre cb ou CB dans la case jaune de la note harmonisée					
Nature et modalités des interactions ADN / protéines (320 points)	Introduction		Définition des termes du sujet (ADN, Prot, Interactions, EV)		
			Problématique		
	B - Structure de l'ADN			Double hélice	
				Liaisons chimiques (nucléotides, bases,...)	
				Schéma(s)	
	C - Structure des protéines			Structures II, III et IV	
				Types d'acides aminés et conséquences sur les interactions	
	D- Localisation et conséquences sur les interactions		(ADN, transport des protéines, mitochondrie, chloroplaste)		
	E- Interactions			En surface ou dans le grand sillon de la double hélice	
				Séquences spécifiques (ADN, box, palindrome) et non spécifiques (déformation, cassure, autres...)	
				Nature des liaisons et des domaines protéiques (Leucine zipper, HLH...)	
	F - Les méthodes d'analyse des interactions ADN - protéines	Techniques d'identification des protéines / séquences d'ADN		exemple_1	
		Criblage de banques, immuno-précip. de chromatine, gel retard,		exemple_2	
		empreinte sur l'ADN, simple hybride de levure, pinces magnétiques		exemple_3	
		RMN du noyau phosphore, BIACORE (résonance plasmon)			
	G. Maintien de l'intégrité de l'ADN			Compactage et décompactage / activité des gènes	
				Histones et structuration de la chromatine	
				Acétylation des histones et autres modifications	
				Interaction matrice nucléaire (notion de SAR/MAR)	
				Réparation	
				Enzymes de restriction	
	H - Expression et régulation de l'expression du matériel génétique			ARN polymérase et FT généraux	
				Facteurs de remodelage et identité cellulaire	
				Méthylation de l'ADN	
				FT spécifiques (bactérie) + mécanismes	
				FT spécifiques (eucaryotes) + mécanismes	
				Régulation des protéines trans-régulatrices (phosphorylation...)	
	I - Transmission de l'information génétique	Réplication de l'ADN	Initiation de la réplication (origine de réplication...)		
Fourche de réplication (géométrie)					
Clamp protéique et fragment d'Okazaki					
Machinerie enzymatique (fidélité, processivité)					
Migration des chromosomes		Protéines kinétochoriennes et pontage ADN microtubules			
		Phases mitotique ou méiotique			
		Complexe synaptonémal			
J - Remaniements évolution et diversité du génome			Recombinaison et mécanismes		
			Eléments transposables et mécanismes		
			Insertion d'éléments étrangers au génome		
K- Intégration à l'échelle cellulaire et de l'organisme (régulations)			Bonus si exemple de régulation bien traité		
L- Applications des interactions aux biotechnologies			e génétique (PCR, enzymes de restriction...)		
M - Conclusion		Interaction ADN-protéines dans le sens évolutifs des organismes, limite de la reconnaissance entre ses partenaires moléculaires, bilan des interactions, perspectives biotechnologiques, plateformes, ingénierie métabolique, transformation			
Forme (50 points)	Clarté de l'exposé	Phrases claires			
		Points forts ressortent			
	Plan	Titres signifiants			
		Logique et organisation			
	Schémas	Nombre et clarté			
		Titres, légendes			
	Aspects expérimentaux	Capacités à présenter une expérience & interprétations			
Coup de cœur positif (diversité des exemples : pro, eu, animal, végétal...)					
MALUS				Forme, écriture illisible, orthographe	
				Fond	

Ecrit secteur B

Les réponses adaptatives aux conditions de la vie en milieu aérien chez les métazoaires

Ce document n'est pas à considérer comme un corrigé type du sujet de l'écrit du secteur B de la session 2008. En effet, les sujets proposés à la réflexion des candidats sont des sujets très vastes qui ne sauraient être traités de façon exhaustive dans un corrigé type envisageable en 5 heures. Un écrit d'agrégation est avant tout un exercice qui doit prouver la capacité du candidat à traiter d'un sujet en SV-STU avec la rigueur et le raisonnement qui feront de cet exercice une construction scientifique dûment justifiée.

Le texte qui suit est donc avant tout à considérer comme une réflexion sur le sujet qui doit permettre au lecteur : 1) de comprendre dans quel esprit les membres du jury du secteur B ont appréhendé la correction de cette épreuve et 2) et d'envisager les points principaux qui pouvaient être abordés dans un tel sujet. Bien évidemment, la liste des points abordés n'est pas exhaustive mais telle qu'elle est présentée, elle reprend quasiment l'ensemble des points que les correcteurs ont pu apprécier dans les différentes copies. Le lecteur remarquera que dans la grille de correction proposée (en fin de document), une ligne dite bonus est à la disposition du correcteur. Elle lui permet de valoriser soit des idées proposées par des candidats qui n'auraient pas été prévues dans la grille initiale, soit des raisonnements particulièrement pertinents sur des items inclus dans la grille.

Cette réflexion sur le sujet sera accompagnée par des commentaires en italiques. En dehors de l'introduction et de la conclusion, les paragraphes débutant par une puce renvoient à des points précis du barème de correction. Seules quelques parties clés, et notamment une proposition d'introduction sont entièrement rédigées. En effet, la réflexion sur la rédaction de l'introduction conditionne énormément la façon dont le sujet sera traité et nécessite donc que l'on s'y attarde de façon plus approfondie que sur d'autres points.

Sujet :

Les réponses adaptatives aux conditions de la vie dans le milieu aérien chez les métazoaires

Le premier contact avec le sujet pour un candidat se limite à quelques mots : un intitulé. Dans le cas présent, ces mots ne formaient pas une question. Pourtant, un exposé scientifique n'a de sens que s'il permet, dans une démarche raisonnée d'apporter une (ou des) réponse(s) à une question clairement énoncée. En conséquence une analyse rigoureuse des termes employés dans le titre doit permettre de dégager une problématique scientifique à partir du sujet proposé. Cette problématique servira alors à justifier le plan adopté. L'introduction ne sert donc pas à annoncer un plan, mais à justifier d'une problématique et à exposer une idée directrice ou une méthode de travail que le plan soutiendra.

Introduction :

La vie est apparue sur terre il y a un peu plus de 3 milliards d'années. Dans des sédiments datés de -3.4 Ga ont en effet été identifiées des structures bio-sédimentaires, les stromatolithes, qui sont considérées comme des témoignages de l'activité biologique de cyanophycées. Au départ, la vie est aquatique, parce que l'eau est le solvant de la biochimie. C'est donc dans l'eau que sont apparus successivement les premières cellules eucaryotes (vers -1.4 Ga), puis les premiers métazoaires (vers -650 Ma). Ces **métazoaires, ou animaux, sont des organismes pluricellulaires dont le collagène constitue l'essentiel des matrices extracellulaires (caractère dérivé)**. Ces organismes sont par ailleurs hétérotrophes, et obtiennent donc leur carbone et énergie à partir de composés organiques d'autres organismes.

Les premiers métazoaires incontestables sont datés de -640Ma (Gisement d'Ediacara, Australie). Ces premiers métazoaires n'élaborant pas de structures bio-minérales, il ne peut être certifié pour l'instant qu'il n'y en a pas de plus anciens. Cent millions d'année plus tard, (Faune de Burgess Pass, Canada), le nombre de plans d'organisation a considérablement augmenté, et notamment, ces fossiles témoignent de l'apparition massive de carapaces et de coquilles bio minérales.

Au Cambrien apparaissent notamment les premiers arthropodes, mollusques et vertébrés. Il faut attendre la fin du Dévonien (-350Ma) pour trouver des traces d'une conquête du milieu aérien par les métazoaires. Depuis cette période, 3 taxons ont particulièrement marqué la conquête du milieu aérien : les gastéropodes ; les euarthropodes et les vertébrés. Cette conquête est donc tardive, et surtout, au vu de la place de ces 3 taxons dans la classification phylogénétique, ces conquêtes doivent être considérées comme indépendantes.

Le milieu aérien est en particulier un milieu déshydratant, et de ce point de vue, il est à priori antinomique avec la vie, puisque l'eau est un milieu réactionnel indispensable à la vie. Il apparaît alors évident que si des groupes zoologiques ont pu conquérir ce nouveau milieu de vie, **cela n'a pu se faire que grâce à de nombreuses adaptations biologiques.**

De façon générale, la grande majorité des candidats a su replacer le sujet dans un contexte plus vaste pour analyser les termes du sujet et donc aboutir à une problématique explicite. Le rôle essentiel d'une introduction est donc bien compris. Cependant, trop souvent cette étape ne conduit qu'à une mise à la forme interrogative de l'affirmation initiale.

« Comment les métazoaires répondent ils aux conditions de la vie en milieu aérien ? Pour répondre à cette question nous étudierons successivement I) II) III) etc.»

L'analyse des termes du sujet doit être plus poussée. Il faut que les candidats passent du temps pour prendre du recul sur le sujet, et se l'approprier pour que la problématique énoncée devienne une démarche personnelle, clairement justifiée, c'est à ce moment que la mise en forme de l'angle sous lequel le candidat choisit de traiter le sujet lui permettra d'expliquer dans quel esprit –avec quelle méthode- il va le traiter. De ce fait, ce n'est pas une annonce de plan qui conduit conclure l'introduction, mais l'annonce d'une démarche scientifique

Le milieu aérien est en particulier un milieu déshydratant, et de ce point de vue il est à priori antinomique avec la vie, puisque l'eau est un milieu réactionnel indispensable à la vie. Il apparaît alors évident que si des groupes zoologiques ont pu conquérir ce nouveau milieu de vie, **cela n'a pu se faire que grâce à de nombreuses adaptations biologiques.**

Dans ce paragraphe, l'ajout d'une évidence : le milieu aérien est déshydratant, corroborée à une autre évidence, l'animal est un système aqueux permet déjà d'enrichir la problématique au-delà d'une simple reformulation interrogative de l'affirmation initiale

Dans cet exposé nous allons étudier ces réponses, c'est-à-dire étudier les solutions anatomiques et/ou physiologiques qui ont été sélectionnées chez les métazoaires et qui nous permettront de comprendre comme ces organismes animaux survivent en milieu aérien. **Un soin particulier sera apporté à la mise en relation des solutions retenues avec les conditions de vie (paramètres physico-chimiques) imposées par le milieu aérien.**

Cependant, comme nous l'avons vu précédemment, la conquête du milieu aérien a au moins été réalisée 3 fois, et ce à partir de plans d'organisation radicalement différents. Les solutions sélectionnées sont donc logiquement très différentes. En quoi la comparaison (anatomie et physiologie comparées) des solutions retenues par des embranchements différents face à des paramètres physico chimiques identiques peut-elle nous livrer quelques clés de compréhension pour dégager, dans les solutions retenues, les points réellement fondamentaux qui sont à la base de l'adaptation des espèces aériennes aux conditions de leur milieu de vie, au-delà des impératifs conditionnés par le plan d'organisation initial ?

La réflexion qui est ici menée montre qu'appréhender le sujet proposé à la lumière de la diversité des métazoaires va enrichir considérablement l'étude et la portée des conclusions.

Cette analyse nous permettra de dégager ce qui est réellement une réponse adaptative aux conditions de vie du milieu aérien de ce qui est l'expression de cette réponse adaptée aux contraintes préexistantes des plans d'organisation.

La problématique enfin posée, la dernière fonction de l'introduction est d'expliquer la méthode, l'axe directeur que le candidat souhaite mettre en œuvre pour traiter le sujet. Cette idée directrice devra guider le candidat tout au long de sa leçon en ne perdant pas de vue sa problématique initiale. En effet, un exposé scientifique n'est pas un simple exposé de connaissances illustrées liées à un titre, mais une progression logique avec des arguments articulés qui permettent de construire progressivement au long de la leçon une réponse à une problématique proposée dans l'introduction.

Pour répondre à ces questions, **deux stratégies pourraient être envisagées**. La première consisterait à appréhender le sujet en l'organisant à partir des contraintes du milieu aérien, et donc, contrainte par contrainte analyser les réponses adaptatives des métazoaires. Cette stratégie présenterait cependant un lourd désavantage. En effet, une même contrainte pourra intervenir sur la réalisation de plusieurs fonctions biologiques. De ce fait, cette analyse du point de vue de la biologie des organismes, risque d'être fragmentaire et/ou décousue. Une deuxième stratégie consisterait à se centrer sur l'organisme, et à définir les fonctions biologiques qui vont être concernées par des changements du milieu extérieur. Par exemple, la physiologie générale du neurone ne sera évidemment pas concernée par un changement de milieu de vie. Nous commencerons donc par appréhender l'organisme animal comme un système fonctionnel en interaction avec son environnement, pour pouvoir définir les fonctions biologiques qui seront à étudier dans le cadre d'une analyse de l'adaptation des systèmes biologiques aux conditions de vie du milieu aérien.

Des paragraphes précédents, il ressort clairement que l'analyse des réponses adaptatives des fonctions biologiques nécessite à tout niveau une mise en relation explicite des solutions retenues avec les caractéristiques/contraintes du milieu aérien. De fait, un simple énoncé des solutions retenues n'apporte pas grand-chose au sujet. En conséquence, pour tous les paragraphes de la grille de correction, les correcteurs ont appliqué les critères de correction suivants :

Pour tous les items abordés dans le barème et notés sur 4xn pts : 0 : aucune information ; 1xn informations partielles ; 2xn : informations précises mais non analysées (pure description); 3xn : informations précises et analysées par une mise en relation explicite des solutions retenues avec les caractéristiques/contraintes du milieu aérien; 4xn : informations précises, analysées et conduisant à une conclusion qui sert de base à une transition.

I) Le métazoaire : un système biologique en interaction avec son environnement

I.A) Les fonctions biologiques en interaction avec l'environnement

La difficulté principale dans un sujet de ce type est de savoir par où commencer. Le paragraphe suivant est une réflexion pour résoudre ce dilemme et permettre au candidat de justifier un choix. Ce type de développement pourrait parfaitement se trouver dans une introduction rallongée.

L'organisme vivant est défini comme un édifice macromoléculaire capable de s'élaborer, de s'entretenir et ensuite de s'auto-reproduire selon une succession d'étapes très complexes dont la seule justification découle, non pas de l'expression des conditions du milieu extérieur, mais de l'expression d'un plan interne d'organisation contrôlé par l'expression d'un patrimoine génétique. L'organisme vivant est donc, entre sa naissance et sa mort, une parenthèse autonome que l'on pourrait qualifier de singularité de la vie. L'expression de cette autonomie ne peut cependant avoir de sens que grâce à une dépense permanente d'énergie indispensable pour maintenir la stabilité ou l'équilibre de l'édifice macromoléculaire qu'est l'organisme vivant. Bien évidemment, cette énergie sera tirée, directement ou indirectement du monde extérieur, énonçant ainsi les limites de l'autonomie de l'organisme vivant. De ce point de vue, réductionniste par nécessité, l'organisme vivant est un consommateur obligatoire et permanent d'énergie pour assurer " *le maintien de la composition et de la structure de l'organisme (Claude Bernard)* ". C'est certainement selon cette approche que l'on pourra identifier de la façon la plus globale (sans être exclusive) un organisme animal. En effet, les animaux sont hétérotrophes au carbone, ils dépendent donc nécessairement, directement ou indirectement de l'activité photosynthétique des végétaux. Ce que nous retiendrons ici, c'est que l'organisme animal, en tant que système physico-chimique, est avant toute chose un convertisseur d'énergie. L'animal convertit l'énergie chimique potentielle des aliments qu'il absorbe en des formes d'énergie nécessaires au maintien de son intégrité (production de chaleur, production d'ATP utilisé secondairement pour effectuer des synthèses, des sécrétions, des travaux mécaniques, ...).

Les différentes fonctions peuvent donc être appréhendées selon la logique suivante :

- Les métazoaires sont hétérotrophes : prise alimentaire, digestion, assimilation, distribution (*spatiale : système circulatoire et temporelle : mise en réserve*)

- Les métabolites distribués vont permettre le fonctionnement/métabolisme cellulaire. L'énergétique cellulaire est optimisée par les processus oxydatifs : la respiration, et donc l'apport en dioxygène et le rejet du dioxyde de carbone. *Si les modalités cellulaires de la respiration sont toujours les mêmes, du point de vue de la biologie des organismes, ce sont les échangeurs respiratoires qui seront à étudier : toute surface qui permettra une diffusion du dioxygène extérieur vers le milieu intérieur et vice versa pour le CO₂.*
- Ce métabolisme est à l'origine de déchets, ce qui nécessitera une régulation du milieu intérieur : régulation du CO₂ (la respiration), de l'excrétion des déchets azotés, des concentrations ioniques et du bilan hydrique
- Le métazoaire se déplace dans son environnement : c'est la fonction de locomotion : *la locomotion, fonction qui permet à l'animal de se déplacer dans son milieu en particulier pour la recherche de la nourriture, et qui de ce fait va avoir un corollaire : se déplacer pour être un prédateur, et se déplacer pour ne pas être une proie !*
- Le tégument une structure de protection de l'organisme, mais également une structure d'échange : les fonctions tégumentaires.
- Fonction ultime de l'individu : la fonction de reproduction *La seule fonction qui n'est pas indispensable à la survie de l'individu !*
- Le raisonnement logique exposé dans cette partie permettra de justifier le plan exposé dans la suite de ce document, et notamment l'ordre dans lequel sont traitées les différentes fonctions biologiques.

Point essentiel : le raisonnement logique qui va permettre de dégager les fonctions qui seront à étudier sous l'angle de la relation adaptations/caractéristiques du milieu aérien : respiration, régulation hydrominérale et excrétion azotée, locomotion, reproduction, régulation thermique. Limitation du sujet : avec 1 exemple : la prise alimentaire dont les modalités ne dépendent que très peu du milieu sauf la microphagie,

I.B) Les conditions de vie du milieu aérien

Les paramètres physiques et chimiques du milieu aérien devaient, à un moment ou à un autre être clairement exprimés soit au fur et à mesure du devoir soit dans un paragraphe initiale, par exemple sous la forme d'un tableau :

Ci-dessous quelques valeurs utiles :

	T°	EAU DISTILLÉE	AIR	EAU DIST./AIR
Coefficient de capacitance n mol.ml ⁻¹ .Torr ⁻¹ βO ₂ βCO ₂	20° C 20° C	1,82 51,4	54,7 54,7	1/30 1/1
Contenu (ml STPD,L ⁻¹) VO ₂ VCO ₂	20° C 20° C	6,5 0,26	195 0,28	1/30 1/1
Coefficient de diffusion en cm ² .sec ⁻¹ DO ₂ DCO ₂	15° C 15° C	0,000025 0,000018	0,178 0,139	1/7120 1/7722
Densité Kg.L ⁻¹	15° C	0,999	0,00123	812/1
Viscosité (Poise)	15° C	0,0114	0,00018	63/1
Capacité thermique cal.L.°C ⁻¹ .	15° C	1000	0,295	3400/1
Conductivité thermique μcal. cm ⁻¹ .sec ⁻¹ .°C ⁻¹	15° C	1440	60,3	24/1

L'attention des candidats est attirée sur l'importance des unités et des ordres de grandeurs et leur cohérence qui nécessite un minimum de bon sens. De fait, la masse volumique de l'eau ne saurait être de 1023 kg.cm⁻³ (valeur trouvée lors de la correction).

II) Les surfaces d'échanges respiratoires en milieu aérien

II.A) L'air est un fluide léger et riche en dioxygène

- Le milieu aérien n'est pas porteur : les branchies s'effondreraient (poussée d'Archimède 812 fois inférieure à celle de l'eau). Une explication claire de la poussée d'Archimède est attendue. Elle est à mettre en relation avec le fait que l'organisme, et donc ses expansions, ont une densité qui est proche de celle du milieu aquatique, puisque l'eau est le constituant essentiel des êtres vivants.

A ce propos, il est rappelé que la compréhension de la biologie des organismes fait appel à des notions élémentaires de chimie et de physique. Il est par exemple anormal que beaucoup de candidats ne maîtrisent pas les notions de forces et de pression.

- Si les branchies sont inadéquates, quelle(s) structure(s) pour les remplacer ? dans les cas les plus simples, les parois de la cavité branchiale peuvent suffire : exemple (particulièrement

parlant) de certains gastéropodes prosobranches, ou bien la surface de cavités primitives comme c'est le cas chez les gastéropodes pulmonés. Ces constats posent une question : comment des surfaces respiratoires assez réduites peuvent-elles suffire en milieu aérien ? Cette question doit servir de lien avec une 2^{ème} caractéristique du milieu aérien : l'air est un milieu riche en O₂. Dans ce paragraphe, la notion de capacitance (βx), la PO₂ dans l'air et dans l'eau et la relation avec les concentrations disponibles doivent impérativement être clairement explicitées. La capacitance est l'équivalent d'une solubilité, quantité de gaz que l'on va rajouter dans une unité de volume, pour que, dans ce volume, la Px du gaz augmente d'une unité. Dans l'air comme dans l'eau (eau en équilibre avec l'air) la pression partielle d'oxygène est de 21 Kpa. En revanche, la concentration de dioxygène dans l'air est de 210 ml/l alors qu'elle est au maximum de 7 ml/l dans l'eau. Le gradient de PO₂ est le moteur de la diffusion, en revanche, le recours aux concentrations est indispensable pour réellement aborder le nombre de moles d'O₂ disponibles pour les processus oxydatifs.

II.B) Le milieu aérien est déshydratant et peu visqueux

- L'air est un milieu déshydratant : ceci pose un problème assez paradoxal, comment limiter les pertes d'eau occasionnées par une surface d'échange, et notamment par l'échangeur respiratoire ? Les points principaux à aborder sont : une réduction des interfaces entre l'invagination et le milieu extérieur (diamètre des orifices réduits), fermeture du pneumostome chez les gastéropodes pulmonés, mais également réabsorption de la vapeur d'eau dans les voies aériennes. Un exemple au choix était attendu : abaissement de la pression de vapeur saturante, par une diminution de la température, réabsorption par la paroi des cornets nasaux (ex du dromadaire) etc.
- Un renouvellement rapide par mouvement alternatif est possible car l'air est peu visqueux (63 fois moins que l'eau).

II.C) Unité et diversité des échangeurs respiratoires en milieu aérien

Les invaginations simples

- Le poumon est une solution parmi d'autres : 1 autre exemple est attendu (cavité buccale ex *Clarias* ; vessie natatoire ex *Lepisosteus* ; tégument ex Anguille,...). Le poumon n'est qu'une évagination parmi d'autres, illustrant l'importance de l'opportunisme et du bricolage dans l'évolution.
- Poumons sacculaires : L'air est riche en dioxygène. En conséquence, la surface de l'échangeur pulmonaire est faible comparée à la surface des branchies de Téléostéens (même en tenant compte de la part cutanée de la respiration des batraciens qui ne représente que 30% des de la consommation maximale de dioxygène d'une grenouille. Chez un

téléostéen, la surface branchiale est \pm de 0.5 à 2 m²/kg. La surface pulmonaire d'une grenouille est proportionnellement beaucoup plus faible (quelques dizaines de cm²)).

- Le coefficient de diffusion des gaz dans l'air est très élevé : la diffusion simple suffit pour expliquer la diffusion de l'oxygène depuis le centre du poumon jusqu'à la surface de l'échangeur, alors qu'en milieu aquatique, la sélection de systèmes qui fragmentent l'eau en couches de fines épaisseurs (distance interlamellaire de 50 μ m dans des holobranchies) est, pour de nombreux auteurs, une adaptation à un faible coefficient de diffusion des gaz dans l'eau (de 8000 à 9000 fois plus faible que dans l'air). Un raisonnement identique pourrait être mené sur le poumon des gastéropodes pulmonés.
- Ventilation par déglutition et opportunisme évolutif : le poumon est une invagination du pharynx. La mécanique de base ne fait donc que réutiliser ce qui existe déjà. Une innovation cependant : la glotte.

Le poumon alvéolaire des Mammifères

- Organisation générale : les voies aériennes (orifices réduits - déshydratation, cf ci-dessus), le système pleural (une pression négative permanente qui soutient la structure alvéolaire). Une description précise de la mécanique ventilatoire, du cycle respiratoire, de la musculature intercostale (valeur des pressions mises en jeu très faible), de l'expiration passive (élasticité pulmonaire) et des relations avec la viscosité du milieu aérien était attendue.
- Le système pleural est un système coelomique qui sert de squelette hydrostatique, les forces mises en jeu lors de l'inspiration sont donc réparties de façon homogène sur l'ensemble de la paroi pulmonaire. L'air est 63 fois moins visqueux que l'eau, un mouvement alternatif est donc possible avec une force très faible. Le système peut donc avoir des voies aériennes de faible diamètre, c'est une adaptation à la lutte contre la déshydratation. La notion de volume courant de repos (\pm 0.5 l) .
- Pour ce paragraphe, des dessins et des valeurs chiffrées étaient indispensables : évolution des volumes pulmonaires, des pressions partielles au cours du cycle respiratoire, etc. Quelques valeurs chiffrées sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Valeurs en mm Hg					
	Air inspiré	Air expiré	Air alvéolaire	Sang artériel	Sang veineux
P _{CO2}	0,2	32	39	40	44
P _{O2}	150	118	97	91	42
P _{N2}	563	569	572	575	575
P _{H2O}	47	47	47	47	47
Total	760	760	760	754	704

Valeur en Kpa					
	Air inspiré	Air expiré	Air alvéolaire	Sang artériel	Sang veineux
P _{CO2}	0,03	4,3	5,2	5,3	5,9
P _{O2}	20,0	15,7	12,9	12,1	5,6
P _{N2}	75,1	75,9	76,3	76,7	76,7
P _{H2O}	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3
Total	101,3	101,3	101,3	100,5	93,9

- Les échanges alvéolo-capillaires : cette interface est une surface d'échange entre 2 milieux différents. C'est donc sous cet angle que ce paragraphe doit être abordé. Les échanges air/sang sont régis par la loi de Fick. Le flux dépend donc de l'épaisseur, de la surface et du gradient de pression partielle. Il faut ici se rappeler que la capacitance n'est pas la même dans le milieu extérieur (air) et le milieu intérieur (aqueux). Quelques faits : Surface totale $\pm 140 \text{ m}^2$, épaisseur à traverser : $0.6\mu\text{m}$, volume des capillaires sanguins très faible : $\pm 210 \text{ ml}$, de ce fait, tous les globules rouges sont contre la paroi des capillaires (garantit une distance minimale de diffusion), la PO_2 dans les alvéoles est quasiment constante.
- Adaptations des poumons alvéolaires aux contraintes du milieu aérien : 1) la tension superficielle de l'eau à la surface des parois de l'alvéole risque d'entraîner un collapsus et donc une obstruction de l'alvéole. Réponse adaptative : les pneumocytes II qui sécrètent du surfactant : di palmitoyl phosphatidyl choline, qui forme une couche mono moléculaire et réduit cette tension superficielle ; 2) l'air qui pénètre dans les voies aériennes contient logiquement des poussières volatiles qui menacent les alvéoles. Réponse adaptative : mécanique muco-ciliaire du système trachéen, avec une forte ciliature des systèmes bronchiques et une production de mucus (cf la mucoviscidose).
- Relations circulation respiration : le passage à une respiration pulmonaire s'accompagne chez les tétrapodes de l'acquisition d'une double circulation. La circulation pulmonaire est en fait une circulation à basse pression. Le point important ici n'est pas la simple description de la double circulation, mais le fait d'avoir une circulation systémique à haute pression (120 mm Hg), et une circulation pulmonaire à basse pression (25 mm Hg) qui limite les risques d'une ultrafiltration au travers de la paroi pulmonaire, alors qu'en milieu aquatique, la circulation dans les branchies est à haute pression. Une différence, la pression transmurale dans un

système branchial est contrebalancée par une pression de confinement due à un fluide beaucoup plus dense que l'air.

Le système trachéen des insectes

- L'organisation générale de ce système est attendue (Stigmate, invagination tégumentaire, trachées, tronc trachéens, trachéole, cellule trachéolaire). Dans les trachées, il y a de la cuticule, mais elle est très fine au niveau des extrémités trachéennes. La cuticule est, en absence de tannage et de tout autre traitement secondaire (cirres, etc.) perméable à l'eau et aux gaz.
- Dans ce paragraphe, il faut insister sur l'adaptation de cette solution aux contraintes du milieu aérien. L'air est peu dense et faiblement visqueux. Réponse adaptative : la structure est invaginée et il existe une ventilation entre les stigmates et les troncs trachéens. Le coefficient de diffusion des gaz dans l'air est très élevé : la diffusion simple suffit pour expliquer les flux de gaz des troncs trachéens aux extrémités trachéolaires. L'adaptation aux conditions déshydratantes du milieu aérien peut être illustrée de façon pertinente avec les exemples de respirations périodiques, et notamment avec un exemple classique, les larves de *Cecropia* (Lépidoptères). Les stigmates ne s'ouvrent que périodiquement quand l'accumulation du CO₂ devient trop importante. Ce point permet en particulier d'exploiter l'idée que le paramètre limitant de la respiration en milieu aérien n'est pas la disponibilité de l'oxygène comme c'est le cas en milieu aquatique, mais l'accumulation du CO₂.
- A noter, une particularité de ce système trachéen : le système respiratoire est le système de distribution

Le poumon tubulaire des Oiseaux

- Le poumon des oiseaux est un système très particulier. C'est en effet un poumon dit tubulaire, qui répond aux contraintes générales de la respiration en milieu aérien (masse volumique, viscosité, etc.), mais qui répond également à d'autres impératifs : la contrainte du vol. L'échangeur au sens strict fonctionne à volume constant. Les sacs aériens, c'est-à-dire le système de ventilation, ne sont pas des surfaces d'échange respiratoire. Ce poumon tubulaire est rigide. C'est une adaptation au vol, et notamment à la contrainte musculaire des structures alaires pectorales. Ce poumon n'est donc pas à présenter comme un exemple supplémentaire d'échangeur en milieu aérien mais comme une solution adaptée au vol.
- Par ailleurs, ce poumon présente un système d'échange dit à courant croisé. Une description anatomique et fonctionnelle (diagramme d'échange) de ce système est attendue. Ce système n'est apparemment efficace que sur l'expulsion du CO₂ (voir les travaux de K Schmit-Nielsen) qui est le paramètre limitant de la respiration en milieu aérien.

Autres systèmes

- Pseudo trachée, poumon diffusif, etc. Ces exemples ne sont pertinents que si les solutions retenues sont mises en relation avec les caractéristiques du milieu et servent le raisonnement général, en apportant notamment des arguments supplémentaires pour la conclusion de ce chapitre.

II.D) Synthèse

A ce stade, il apparaît important de souligner les intérêts de l'anatomie et de la physiologie comparée pour dégager ce qui est réellement une réponse adaptative aux conditions de vie du milieu aérien de ce qui est l'expression de cette réponse adaptée aux contraintes préexistantes du plan d'organisation. Les exemples abordés dans ce chapitre permettent de dégager des convergences parmi les nombreuses solutions retenues qui sont toutes adaptées aux contraintes et caractéristiques du milieu aérien. En d'autres termes, au-delà des différences anatomiques extrêmes, le chapitre traité illustre l'unité et la diversité des systèmes respiratoires en milieu aérien.

III) Régulation du milieu Intérieur : excrétion, régulation hydrique et minérale et milieu aérien

- **Réflexion introductive : la déshydratation n'existe pas que dans le milieu aérien.**
L'exemple des téléostéens marins est très intéressant : ces organismes sont hypoosmotiques et sont soumis à un flux hydrique permanent au niveau des branchies occasionnant une perte d'eau de 1 à 10 ml/h/Kg. Ces téléostéens marins présentent donc une régulation hydrominérale singulière : urine peu concentrée, excrétion ionique branchiale.

Attention, l'urine n'est pas très concentrée en ions Na^+ et Cl^- . Par contre, on y trouve beaucoup d'ions bivalents Ca^{2+} , MgSO_4^{2-} , Mg^{2+} , etc. Cependant, le volume d'urine est très faible. De ce fait, cela signifie que les ions chlorure et sodium sont expulsés ailleurs ! Comme cette urine n'est pas très concentrée, la part de l'urée dans l'excrétion azotée est paradoxalement relativement faible, et la majorité de l'azote sera expulsé au niveau des branchies par les ionocytes. Il ne s'agit cependant pas d'une excrétion passive ou gratuite comme pour les espèces hyper ou iso osmotiques, car cela se fera contre une entrée globale de Na^+ et Cl^- qu'il faudra expulser activement.

III.A) Limiter les pertes d'eau liées à l'évaporation tégumentaire :

- Ici ou dans le paragraphe II, le problème de la perte hydrique par les surfaces d'échange respiratoires (tégumentaire ou non) doit être abordé. Ce point est déjà commenté plus haut.

Modification comportementale et physiologique

- Limiter les pertes d'eau peut se faire de façon théorique au moins de 2 façons (c'est une ré exploitation de la loi de Fick). Soit en diminuant la perméabilité tégumentaire, soit en diminuant le gradient hydrique trans-tégumentaire, ce qui ne peut se faire qu'en plaçant l'animal dans un milieu où l'humidité relative est élevée. Il s'agit alors d'adaptations comportementales. De nombreux exemples existent chez les batraciens, et les gastéropodes : adaptation comportementale (rester dans un milieu où l'humidité relative est élevée : se soustraire au stress). Exemple : estivation des gastéropodes désertiques (l'escargot se retranche dans sa coquille dont il ferme l'opercule). D'autres exemples existent avec des entrées en vie ralentie, etc.

Adaptation tégumentaire

Deux exemples pertinents peuvent être ici développés : le modèle arthropodes et le modèle vertébrés. Là encore, multiplier les exemples n'est pas un but en soi. Il s'agira de pouvoir tirer des enseignements de cette physiologie comparée.

- Le tégument des insectes : il est important de rappeler ici que la chitine n'est pas une substance qui confère l'imperméabilité à la cuticule. Cette erreur fait partie des quelques contrevérités les communément retrouvées dans les copies. De fait, ce sont des modifications secondaires de la cuticule qui la rendent imperméable, et en particulier la couche de cires qui est répandue à la surface. Les expériences rapportant une augmentation des pertes hydriques tégumentaires quand la température externe atteint et dépasse la température de fusion des cires sont d'ailleurs connues par un grand nombre de candidats. Dans ce paragraphe, une coupe transversale dans un tégument d'insecte était attendue.
- La kératinisation chez les amniotes : une coupe dans un épiderme kératinisé (par exemple de mammifère) était attendue. La structure de l'épiderme, l'accumulation de la kératine, la mort des cellules et la formation d'une barrière imperméable devaient être commentées: la kératinisation n'est pas toujours complète. Deux exemples pouvaient illustrer ce point : une kératinisation imparfaite chez les squamates et plus poussée chez les mammifères.
- Protection contre les UV : le tégument des métazoaires aériens remplit cette fonction et ce notamment par la kératinisation (couche de cellules mortes) et l'accumulation de pigments tégumentaires.
- Si la principale adaptation tégumentaire est de limiter les pertes hydriques, au niveau de certains tissus, une adaptation inverse peut être observée : c'est le cas par exemple de la surface oculaire dont l'humidification permanente est garantie par des sécrétions lacrymales.

III.B) Limiter les pertes d'eau urinaire

Dans le paragraphe I, il a été montré que le métabolisme cellulaire conduisait à la production de déchets que l'organisme doit évacuer. L'urine a un rôle clé dans l'évacuation de nombreux déchets que l'organisme évacue sous forme de solutés. Cette excrétion entraîne donc inévitablement une perte hydrique. Limiter ces pertes d'eau est un enjeu important de l'adaptation au milieu aérien.

L'une des solutions les plus évidentes à envisager est donc de concentrer l'urine, c'est-à-dire réabsorber de façon plus ou moins spécifique l'eau de l'urine. Cependant, si l'idée est assez évidente, sa mise en place n'est pas sans conséquence. En effet, chez la grande majorité des espèces aquatiques, l'excrétion azotée est réalisée par le rejet d'ammoniac ou d'ions ammonium (ce point n'est pas à commenter) et concentrer l'urine est incompatible avec l'ammoniémie. En effet, la toxicité de l'ammoniac est très élevée : l'uréotémie et l'uricémie sont donc les deux modalités de l'excrétion sélectionnées en milieu aérien. Ce paragraphe nécessite que les principales propriétés de ces 3 composés soient clairement explicitées : toxicité, solubilité, volume urinaire nécessaire à l'excrétion d'un gramme d'azote sous ces différentes formes. Des discussions intéressantes peuvent être menées sur des modèles biologiques dont le milieu de vie change en fonction des stades de développement : insectes dont la vie larvaire est aquatique, amphibiens en comparant des larves aquatiques et des adultes vivant dans différents milieux (*Rana temporaria* ou *R. esculenta* et *Bufo bufo*), etc.

Mécanisme de concentration de l'urine ; un modèle le néphron des mammifères

Si la concentration de l'urine est une hypothèse assez évidente, et de fait elle est retrouvée dans tous les taxons qui ont conquis le milieu aérien, sa mise en œuvre présente une très grande variabilité. Différents exemples pourront être décrits, mais comme dans les parties précédentes, citer les différentes solutions retenues n'est pas un objectif en soi, cela n'a d'intérêt que si la comparaison des différentes solutions exposées apporte une plus value à la pertinence de l'exposé.

Le modèle le plus classique, et que la majorité des candidats a présenté, est de toute évidence le rein des mammifères :

- Le rein des mammifères : une description du néphron avec un schéma est indispensable, pour mettre en évidence le contre courant qui existe entre la branche ascendante et la branche descendante. Ce système ne concentre nullement l'urine, il permet cependant la mise en place du gradient de concentration cortico-médullaire. Ce gradient servira alors de compartiment de référence pour concentrer progressivement l'urine contenue dans le tube collecteur. Cette réabsorption est sous le contrôle de l'ADH (aquaporines).
- La longueur de l'anse de Henlé conditionne l'amplitude du gradient cortico médullaire, et, par conséquent, la réabsorption de l'eau et donc le pouvoir de concentration de l'urine. De fait, chez les espèces désertiques, l'anse est beaucoup plus longue et le pouvoir de concentration

de l'urine, qui est de 4 chez l'homme peut passer à 16 fois chez un rat kangourou ou un rat des sables et même à 25 fois chez *Notomys alexis*.

- Il est important de noter que dans ce modèle du rein des mammifères, la concentration de l'urine au niveau du tube collecteur se fait par rapport à un milieu de référence qui est hypertonique par rapport au contenu du tube collecteur. En conséquence les échanges entre la lumière du tube et les compartiments qui l'entourent peuvent se résumer à un flux hydrique qui suit un gradient osmotique. Il s'agit véritablement d'une concentration de l'urine par réabsorption d'eau sans que les autres composés de l'urine ne soient concernés.

Uricotélie, concentration de l'urine et organes excréteurs

Nous sommes ici devant une discussion assez similaire à celle que nous pourrions mener sur l'excrétion urinaire des téléostéens marins. Si le volume urinaire est faible est ce que cela signifie pour autant que l'urine est fortement concentrée ? La question peut a priori sembler paradoxale. En effet, il semble évident que la teneur en acide urique de l'urine des hexapodes ou des sauropsidés est élevée, et que les volumes urinaires sont très faibles. Cependant, il ne faut pas oublier que l'acide urique précipite, et qu'il n'est donc pas strictement sous forme de soluté, donc que la notion de concentration est à analyser avec plus de précautions. En effet, chez les sauropsidés, à l'exclusion des oiseaux, l'urine est le plus souvent hypotonique. Chez les oiseaux, elle peut être hypertonique (jusqu'à 2 fois la pression osmotique du plasma, mais n'atteindra jamais la valeur de l'eau de mer).

Nous sommes donc ici dans une situation où l'excrétion urinaire, grâce aux propriétés de l'acide urique permet de résoudre l'excrétion azotée avec une perte hydrique minimale mais où la régulation hydrominérale n'est pas résolue. De fait, de façon globale, l'eau est réabsorbée dans ce système parce que les sels (Na^+ et Cl^-) sont réabsorbés et que l'eau suit. La régulation hydrominérale (Na^+ , Cl^- , et H_2O) est assurée par un autre organe (morphologie multiple) : les glandes à sels.

- Le fonctionnement d'une glande à sel est attendu, avec un schéma explicatif.

La situation chez les sauropsidés est donc très différente de celle décrite dans le rein des mammifères. En effet, nous voyons ici que ce sont 2 organes au final qui assurent l'excrétion hydrominérale et azotée alors que chez les mammifères, le rein assure ces deux fonctions simultanément.

Chez les insectes, la situation est a priori assez similaire : l'eau de l'urine riche en acide urique est réabsorbée au niveau du rectum, et comme chez les sauropsidés, suit une réabsorption ionique, ce qui, là non plus, ne règle pas de façon évidente la régulation hydrominérale en condition déshydratante. Les solutions sélectionnées sont tout à fait singulières. Plusieurs exemples de structures rectales existent (papilles rectales ou coussinets rectaux), et dans ces structures, l'eau est réabsorbée à la suite d'un transport actif de potassium qui est recyclé dans le système d'absorption, donc globalement la solution réabsorbée est hypotonique.

- Un exemple clairement décrit est attendu.

Conclusion

La conclusion devra mettre l'accent à la fois sur la diversité des solutions retenues par exemple au sein du taxon des tétrapodes : biochimie, organes excréteurs, mécanisme de concentration, et sur les exemples de convergences évolutives notamment entre insectes et sauropsides.

III.C) Apports d'eau

Malgré l'efficacité des solutions retenues, des pertes hydriques sont inévitables. Il est à noter que chez certains mammifères désertiques, la plus grande part des pertes hydriques n'est pas due à l'excrétion urinaire mais à la thermorégulation (sudation/évaporation). Le bilan net n'est donc nul que si l'animal peut compenser ses pertes par des apports en eau qui peuvent être ainsi décomposés.

- L'eau de boisson
- L'eau contenue dans les aliments
- L'eau métabolique produite par l'oxydation des métabolites. En particulier, le stockage des lipides (bosse du dromadaire) est par oxydation une formidable réserve énergétique mais également hydrique ($\text{lipides} + \text{O}_2 = \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$)

IV) La locomotion

IV.A) L'air est un fluide léger

L'air est un fluide léger, 812 fois moins dense que l'eau. De fait dans l'air, il y a une diminution équivalente de la poussée d'Archimède, qui était dans l'eau quasiment égale à celle du poids du corps : le corps devient donc toujours plus lourd que le milieu. Les conséquences sur la biologie des organismes sont de 2 types.

- 1) L'organisme est, en absence de toute force supplémentaire, toujours posé sur le substrat. De ce fait, si sa surface de contact avec le substrat est proportionnelle à sa longueur, alors les forces de frottements, sont elles aussi proportionnelles à la longueur de l'animal et surtout très importantes. Pour diminuer le coût énergétique de la locomotion, la seule solution est donc logiquement de diminuer les forces de frottements et donc de diminuer la surface de contact avec le substrat, ce qui ne peut se faire qu'en soulevant le corps du sol.

- 2) Cependant, soulever le corps du sol signifie dépenser une autre force puisque le milieu ne porte plus les organismes. De ce fait, l'animal devra en permanence se supporter, ce qui ne sera pas sans conséquence sur les squelettes.

IV.B) Alléger et adapter le squelette

Une des adaptations squelettiques les plus remarquables aux conditions de la vie en milieu aérien est l'allègement du squelette que l'on retrouve dans tous les taxons, mais bien évidemment avec des mises en œuvre tout à fait spécifiques aux plans d'organisation concernés.

- Comparaison de l'os plein des Téléostéens, l'os creux des vertébrés terrestres et l'os pneumatiqué des Oiseaux. Ce qui est à discuter ici n'est pas simplement l'allègement de l'os mais également l'évolution de la forme, du diamètre optimisant le rapport masse/résistance. Ce point est magnifiquement illustré par les os des oiseaux où l'on observe une forte du diamètre d'une structure creuse (os pneumatiqué).
- La courbure de la colonne vertébrale : concavité ventrale et corde musculaire thoraco-pelvienne qui porte le poids de la masse viscérale pour diminuer la contrainte exercée sur la seule structure squelettique.
- La cuticule des insectes n'est pas minéralisée. Par contre, la rigidité est assurée par la sclérotinisation, c'est-à-dire le tannage des protéines (bien que ce processus existe également chez les autres pan-crustacés comme les malacostracés). De fait, la cuticule des insectes a une masse volumique inférieure à celle d'une cuticule minéralisée.

IV.C) Soulever le corps du sol

L'allègement du squelette évoqué dans le paragraphe précédent est bien évidemment une réponse adaptative tout à fait efficace pour pouvoir soulever le corps du sol à moindre coût. Si le corps n'est plus porté mais posé sur le sol, le déplacement est limité par les forces de frottement comme cela a été évoqué précédemment. Pour limiter cette contrainte, deux types de solution ont été sélectionnés: la sécrétion de mucus qui facilite le déplacement par reptation (Gastéropodes et Oligochètes) ou le soulèvement du corps par rapport au sol.

Les Arthropodes

- Les appendices des arthropodes et notamment des insectes : Un dessin détaillé est attendu. Il faut cependant noter que la marche n'existe pas qu'en milieu aérien. En effet, les crustacés à cuticule minéralisée sont aussi des organismes plus lourds que leur milieu, et qui, pour certains d'entre eux, marchent au fond de l'eau (convergence évolutive ?). L'adaptation à la marche des appendices des arthropodes aériens n'est donc pas une nouveauté.
- La notion de rapport poids / puissance pourrait être discutée.

Les Vertébrés

- Acquisition du membre chiridien : ce membre est l'innovation des Sarcoptérygiens. Un dessin détaillé est attendu.
- Le membre chiridien des tétrapodes se décompose en 3 parties : autopode, zeugopode, stylopode. Une comparaison avec les appendices des arthropodes est attendue. La disposition de ce membre chiridien est à discuter. En effet, les contraintes mécaniques, et notamment les bras de levier s'exerçant sur le stylopode ont eu de fortes conséquences sur la musculature. Le passage d'un membre horizontal, à un membre transversal, puis parasagittal dressé est à expliquer. Notamment, il s'agit de bien faire ressortir que dans le cas du membre parasagittal dressé les 3 segments se font suite dans un même plan, la masse est donc portée par le squelette, la seule dépense musculaire nécessaire est en conséquence celle qui bloque l'articulation.

IV.D) Mettre le corps en mouvement

- Anatomie et biomécanique : développement de la marche, de la course, et du saut. Un parallélisme avec les adaptations au saut développées par certains insectes comme le criquet doit être mené.
- Le coût énergétique des différentes formes de déplacement est à aborder, avec notamment l'exemple du cheval en comparant la dépense énergétique des 3 modes de déplacement (pas, trot et galop) en fonction de la vitesse de déplacement.
- Certains aspects biomécaniques plus complexes sont également à détailler, et notamment le développement de bras de levier (calcaneum) ou bien encore déplacement des muscles qui conduit à un allègement du membre.
- L'ensemble de ces adaptations des membres locomoteurs est à replacer dans le cadre d'une discussion plus vaste sur la locomotion en milieu aérien. En effet, si l'organisme en se soulevant s'affranchit des forces de frottement avec le substrat, si par la marche ou le saut, il perd même le contact avec le sol, alors les principales forces de frottement qui vont limiter sa vitesse seront le frottement avec l'air. L'air étant un fluide peu visqueux, un déplacement à haute vitesse en milieu aérien est possible sans adaptation particulière (en milieu aquatique, des vitesses élevées nécessitent des adaptations hydrodynamiques tout à fait singulières : forme, aspect de la surface, mucus, etc.).
- Nous voyons dans cette partie que soulever le corps du sol est une condition indispensable pour assurer un déplacement efficace en milieu aérien. Ce principe a été poussé à son paroxysme avec la sélection du vol, qui constitue donc la forme ultime du soulèvement du corps. Ce point ne saurait être abordé en ne menant pas une étude comparée du vol des insectes, des oiseaux, et même des quelques exemples de mammifères volants. Les points à

aborder peuvent être résumés de la façon suivante : ailes et convergences, développement des surfaces portantes, rapport poids/surface/rigidité, différents types de vol, mise en mouvement de la surface alaire, atterrissage, etc.

- Nous voyons dans ces nombreux exemples de la locomotion en milieu aérien, que l'animal n'est plus en contact en permanence avec le sol système. C'est bien évidemment particulièrement vrai avec le vol, mais également avec la marche ou la course. De fait, les métazoaires aériens ont développé ce que l'on pourrait appeler un équilibre dynamique : le déplacement est efficace mais plus instable (à discuter) et a été accompagné par le développement d'un système dynamique de contrôle permanent de la position et de la motricité. La locomotion à haute vitesse des tétrapodes ne peut donc pas être abordée sans au moins mentionner ses conséquences sur le système nerveux, et notamment sur le développement des systèmes de contrôle de la motricité.

V) La reproduction

Le milieu aérien est un milieu déshydratant. Nous avons vu dans la 3^{ème} partie de nombreux exemples d'adaptation des organismes aériens à cette contrainte, qui leur permet de se soustraire à ce stress. Dans le cas de la fonction de reproduction, cette contrainte redevient prépondérante. En effet, quelles que soient les espèces, les gamètes, la cellule-œuf et l'embryon ne peuvent pas survivre/se développer en milieu aérien. Leur rapport surface sur volume est toujours très important, et leur développement en milieu déshydratant est donc inconcevable. Cette partie sera donc consacrée à l'étude non pas des adaptations des embryons à la vie en milieu aérien, mais des solutions sélectionnées pour soustraire les embryons à ce stress.

V.A) Les animaux aériens à reproduction aquatique

Ce paragraphe décrit la solution la plus simple qui soit. Elle concerne les animaux aériens qui retournent dans le milieu aquatique pour y assurer leur reproduction.

- Ce paragraphe pourra être facilement illustré en utilisant comme exemple la reproduction des batraciens.

V.B) La fécondation interne

Si les animaux ne retournent pas dans le milieu aquatique pour y déposer leurs gamètes, alors la seule alternative pour que les gamètes puissent se rencontrer en n'étant pas soumises à la déshydratation est le développement et la sélection de la fécondation interne. La fécondation interne consiste à mettre en présence les gamètes dans une cavité corporelle où l'humidité relative est toujours saturante.

- L'acquisition de la fécondation interne nécessite deux impératifs absolus : le développement d'organes copulateurs appropriés et la mise en place de comportements reproducteurs (Il est à noter que la fécondation interne existe également en milieu aquatique).

V.C) Protection hydrique, croissance tridimensionnelle et développement de l'embryon

Le développement embryonnaire ne peut pas se réaliser en milieu aérien pour les raisons citées précédemment. S'il ne se déroule pas dans un milieu aquatique naturel, le développement embryonnaire ne peut donc se réaliser que dans un milieu hydrique reconstitué. Ce n'est pas le milieu intérieur de l'un des 2 organismes parentaux, mais un milieu que l'on pourrait qualifier d'artificiel. Le meilleur exemple est celui de la cavité amniotique des vertébrés : c'est un milieu aquatique reconstitué qui protège de la dessiccation, mais restaure également la poussée d'Archimède qui permet donc à l'embryon d'être porté par le milieu et donc d'assurer sa croissance tridimensionnelle sans structure de soutien.

- Les insectes et les vertébrés : comparaisons et convergences.
- La cavité amniotique est un milieu extérieur artificiel. Son développement est accompagné par la mise en place d'annexes embryonnaires. En effet, le milieu extérieur est fondamentalement le milieu donneur d'O₂, le milieu où l'animal puise ses réserves alimentaires et où il rejette ces déchets. L'une conséquence de la cavité amniotique est que de ce point de vue le véritable milieu extérieur est éloigné de l'embryon. Les annexes embryonnaires peuvent donc être abordées sous cet angle : un relais entre le l'organisme en développement et le milieu extérieur.
- Les annexes embryonnaires des Vertébrés amniotiques : comparaison d'un vivipare (Mammifère) et d'un ovipare (Oiseau)
- La relation qui existe entre les modalités de l'excrétion azotée (uréotélie *versus* uricotélie) et le mode de développement embryonnaire peut être ici abordée. En effet, l'urée qui est très soluble ne peut être stockée dans un œuf, l'acide urique si !
- Dans ces 2 exemples de développement vivipare et ovipare qui ont été sélectionnés chez les vertébrés, un fort investissement énergétique est réalisé par au moins l'un des 2 parents. Une discussion sur les modalités de la reproduction, les soins parentaux, etc...pourrait être développée.

V.D) Reproduction aérienne et saisonnalité

Le milieu aérien est un milieu très variable : sous nos latitudes, les organismes sont soumis à de fortes variations saisonnières des températures, de la disponibilité en ressources alimentaires. De ce fait, la majorité des espèces présentent une saisonnalité de la reproduction. Les notions de photopériodisme sont à aborder. Ce paragraphe pourrait être construit de la façon suivante :

- La naissance, ou l'éclosion, des jeunes se fait en général au printemps, c'est-à-dire la saison la plus propice à leur développement car la plus éloignée de la saison difficile suivante.
- Chez les vertébrés, la reproduction se déroule donc à une période de l'année qui correspond à une naissance au printemps mais corrigée par la durée de la gestation.
- Il faut donc distinguer des espèces dites de jours courts et des espèces de jours longs.
- Le facteur environnemental le plus utilisé est la photopériode, car c'est également le plus fiable d'une année à l'autre.
- Chez les vertébrés, les variations annuelles de la photopériode sont traduites par la glande pinéale en variations saisonnières de la durée de la sécrétion nocturne de mélatonine qui contrôle alors l'activation ou l'inactivation de l'axe hypothalamo-hypophyso-gonadique.

VI) Les réponses adaptatives à un environnement thermiquement fluctuant

- Le milieu aérien est un milieu très variable : en particulier les variations de température présentent une gamme d'amplitude très élevée. D'un autre côté, le métabolisme cellulaire et notamment la cinétique des réactions enzymatiques sont directement impactés par des variations de la température. Les réponses adaptatives pour limiter les contraintes liées aux variations (se soustraire aussi bien aux plus basses qu'aux plus hautes températures) sont très nombreuses: Régulation comportementale, diapause, vie ralentie, migration etc. Des exemples clairement exposés et détaillés étaient attendus.
- En particulier, une stratégie développée pour limiter l'impact des fluctuations des températures de l'environnement est la sélection de l'homéothermie. Ce qui définit de la façon la plus précise cette stratégie est la sélection d'une température centrale de référence (notion de point de consigne).

VI.B) L'homéothermie et les caractéristiques du milieu aérien

- Le milieu aérien est un milieu très variable (faible inertie thermique de l'air dont la capacité calorifique (heat capacity, $J/L^{\circ}C$) est 3400 fois plus faible que celle de l'eau), d'où l'avantage évolutif de l'homéothermie. Un gradient thermique peut être maintenu en milieu aérien car l'air est isolant (conductivité thermique 24 fois plus faible que celle de l'eau) et cette couche isolante se chauffe à moindre coût (capacité calorifique).

VI.C) La physiologie d'un homéotherme

- Le passage à l'homéothermie a entraîné une augmentation de 5 à 10 fois du métabolisme de base. Le document ci-dessous (extrait de « Physiologie Animale, de K Schmit-Nielsen, Dunod ») illustre parfaitement ce point.

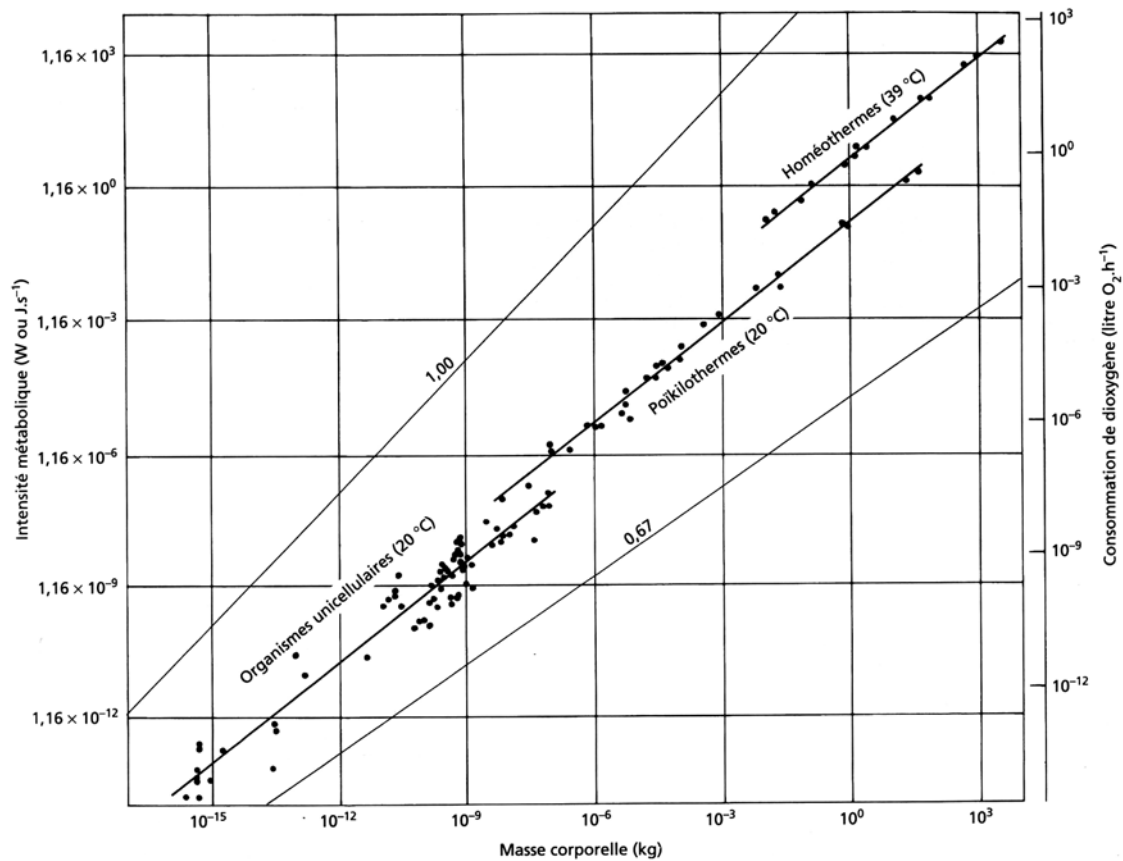


Figure 5.11 Les consommations de dioxygène en fonction de la masse (en coordonnées logarithmiques) pour une très grande variété d'organismes montrent une répartition des points autour de droites de régression de pente 0,75. Il faut noter que chaque division correspond à un facteur de multiplication par 1000 [Hemmingsen 1960].

- Cette forte augmentation du métabolisme a des conséquences sur tous les systèmes : augmentation de la prise alimentaire, de la respiration, de l'excrétion, etc.
- Pour maintenir cette température à moindre coût, des adaptations pour limiter les échanges thermiques avec l'extérieur ont été sélectionnées, avec notamment des adaptations tégumentaires et comportementales : tortue chez les Manchots, l'isolation thermique par les phanères, ou par le tissu adipeux.
- Pour maintenir une température constante, il faut pouvoir élever la température interne, c'est la thermogenèse réalisée par endothermie (frisson thermique, tissus adipeux brun, etc.) mais il faut également pouvoir l'abaisser : c'est la thermolyse
- Se soustraire aux fluctuations thermique de l'environnement peut conduire les animaux homéothermes dans des situations assez paradoxales : c'est pendant la saison hivernale où l'effort de thermogenèse devrait être le plus important que les ressources alimentaires seront les plus faibles. Les réponses adaptatives à cette nouvelle contraintes seront très variées

mais à chaque fois l'objet de régulation physiologiques et comportementales très élaborées : la torpeur, les migrations, l'hibernation etc.

CONCLUSION

La conclusion ne doit pas être un paragraphe qui revient sur les différentes parties abordées en les résumant.

Si l'objectif de l'introduction est de permettre au candidat de poser une question personnelle (sa problématique) à partir de l'analyse du sujet proposé, et donc d'orienter tout son devoir, la conclusion quant à elle doit apporter une réponse à cette question initiale. Pour se faire, elle va s'appuyer sur quelques idées fortes qui peuvent ressortir de l'ensemble du devoir, et qui, articulées entre elles, vont permettre au candidat de faire ressortir un enseignement qu'il souhaite particulièrement mettre en valeur dans sa conclusion. Une relation évidente doit donc exister entre l'introduction (la question), le développement (l'exposé des faits et le raisonnement) et la conclusion (la réponse). Dans un dernier temps la conclusion servira à ouvrir le sujet vers d'autres perspectives. Dans un sujet comme celui ci les ouvertures possibles ne manquent pas : adaptations aux milieux extrêmes, retour secondaire au milieu aquatique ou encore, adaptations aux futurs changements climatiques, adaptations des végétaux aux conditions de vie en milieu aérien.

Tout au long de cet exposé, nous avons étudié de nombreux exemples d'adaptions anatomiques, physiologiques et comportementales des métazoaires aux conditions de la vie en milieu aérien. Ces adaptations concernent toutes les fonctions qui sont en relation avec le milieu extérieur. Bien qu'il n'y ait aucune logique évolutive à dégager de cette étude, nous pouvons cependant noter que les adaptations étudiées peuvent se décliner en trois grandes catégories. La première concerne des adaptations qui sont des modifications mineures ou plus profondes de systèmes qui existaient au préalable et notamment en milieu aquatique (le rein des mammifères, les appendices des arthropodes ou du poumon des gastéropodes). La deuxième catégorie est caractérisée par l'apparition de réelles nouveautés, c'est le cas du poumon des tétrapodes, du membre chirodien). Enfin, la troisième catégorie est la sélection de solutions qui reconstituent artificiellement en milieu aérien des conditions qui existaient préalablement dans le milieu aquatique; c'est notamment le cas avec l'apparition de la cavité amniotique. Au travers des nombreuses réponses étudiées, les exemples de convergences évolutives sont très nombreux, illustrant vraisemblablement que les solutions qui présentent un réel intérêt évolutif, si elles peuvent présenter une diversité quasi infinie dans leurs adaptations spécifiques aux différents plans d'organisation, présentent des similitudes très précises que l'on peut sans doute considérer comme la réponse adaptative des métazoaires aux conditions de la vie aérienne : la sélection d'invaginations respiratoires, la sélection de téguments imperméables, la sélection de structures concentrant l'urine, etc. Ce sujet aurait donc très logiquement pu s'intituler : unité et diversité des adaptations des métazoaires aux conditions de la vie en milieu aérien. Cependant, la

conquête d'un nouveau milieu n'est pas un objectif, et les taxons qui ont conquis les biotopes aériens sont aujourd'hui également retournés secondairement dans le milieu aquatique. Doit-on envisager ces exemples comme des régressions évolutives ou bien comme la conquête d'un milieu très singulier pour des espèces aériennes ? Est-ce que, dans ce contexte, leurs adaptations aux conditions de la vie aérienne ont pu être des avantages évolutifs expliquant leur survie dans un milieu qui n'étaient plus le leur ? Les questions ne manquent pas, elles sont pour nous autant de prétextes pour sans cesse décrire, analyser, essayer de comprendre pour au final enseigner les sciences du vivant.

Commentaires spécifiques sur les copies des candidats

Les correcteurs de l'écrit du secteur B souhaitent profiter de ce rapport pour faire ressortir un certains nombres d'erreurs ou de maladroites qui ont été trouvées dans les copies. Il ne s'agit nullement de mettre en exergue telle ou telle confusion, mais bien d'utiliser des exemples concrets rencontrés pour attirer l'attention des futurs candidats sur des points qui d'évidence posent plus de problèmes que d'autres.

Problèmes de fond :

- La grande majorité des introductions débutent bien en replaçant le sujet dans un contexte plus large propice à une redéfinition efficace des mots clés du titre, et le jury s'en félicite. Cependant, trop peu de copies se servent de cette redéfinition pour réellement s'appropriier le sujet et donc formuler une problématique qui leur tienne à cœur. De fait, très souvent l'introduction ne conduit qu'à une mise à la forme interrogative de l'affirmation initiale. Elle ne permet donc pas de dégager un véritable axe directeur, et donc l'annonce de la méthode se résume à une annonce du plan, étape intellectuellement inutile. En effet, le lecteur n'a pas besoin de savoir à l'avance que la respiration sera traitée après l'excrétion ou avant, mais il doit savoir comment l'exposé sera aborder, quels raisonnements dirigeront la démarche, etc.
- Cette faiblesse de nombreuses introductions se retrouve dans la conclusion : l'absence de question originale au début du devoir se traduit inévitablement par l'absence d'une réponse à cette question à la fin de l'exposé. La conclusion devient alors un exercice imposé, où le candidat reprend

quelques idées qu'il aura dégagées au cours de l'exposé mais sans en tirer un enseignement nouveau. En revanche, la majorité des conclusions se terminent par une ouverture appropriée.

- Dans un sujet comme celui-ci, il apparaît clairement que l'analyse des réponses adaptatives des fonctions biologiques nécessite à tout niveau une mise en relation explicite des solutions retenues avec les caractéristiques/contraintes du milieu aérien. De trop nombreuses copies cèdent à la tentation de la litanie anatomique : elles se limitent à des descriptions de tel ou tel système mais sans en tirer ni d'analyse ni de conclusion. En sciences, les étapes qui relient l'objet à une exploitation menée à son terme sont 1) Description, 2) Analyse, 3) Interprétation, 4) Conclusion, 5) Transition. S'arrêter à la description du fait, de la structure, du tissu, ou même du comportement c'est donc s'arrêter à la première étape !

Problèmes ou erreurs spécifiques au sujet les plus rencontrées :

- Un pourcentage non négligeable de candidat n'a pas restreint le sujet aux métazoaires. Les grandes subdivisions de la classification phylogénétique du vivant sont aujourd'hui incontournables et leur connaissance est un pré requis indispensable pour se présenter aux concours de recrutement.
- Pour de trop nombreuses copies, « la gravité n'existe pas en milieu aquatique », ou encore, « le poids d'un animal est supérieur en milieu aérien ». Le jury souhaite rappeler que les principes physiques, chimiques et biochimiques de base sont indispensables à la compréhension au premier ordre des phénomènes biologiques abordés.
- Dans la grande majorité des copies, les correcteurs ont pu lire que la disponibilité en oxygène était plus faible en milieu aquatique, cependant seule une minorité de copies présentaient des valeurs concrètes, et là encore dans de nombreux cas, de grosses confusions existaient entre pourcentage, pression partielle et concentration. La notion de capacitance, qui est pourtant indispensable pour aborder ces questions est, quant à elle, quasiment taboue.
- Dans de trop nombreuses copies la chitine est considérée comme imperméable et rigide.
- Le surfactant diminue la tension superficielle de l'eau dans les alvéoles pulmonaires. Il n'est ni secrétée pour permettre au gaz de se dissoudre ni pour éviter l'effondrement des alvéoles. De même, le liquide trachéolaire n'est pas un liquide secrété pour améliorer les échanges gazeux. Le mucus n'est pas non plus une adaptation au milieu aérien
- La vue, la chémoréception, l'audition, l'écholocation et les squelettes (exo-et endosquelettes) ne sont pas des nouveautés liées à la conquête du milieu aérien.
- Les parades nuptiales et le mimétisme ne le sont pas plus.
- Les échanges respiratoires des oiseaux ne présentent pas de système à contre courant mais à courant croisé.

Afin de limiter la répétition des erreurs ou des problèmes de forme d'une année sur l'autre, le jury tient à attirer l'attention des formateurs sur l'importance pour les candidats de lire attentivement les rapports du jury.

Problèmes de forme :

- L'orthographe, le soin, la rigueur et la cohérence d'un plan ne sont pas des éléments facultatifs dans une copie. La forme, qu'elle soit écrite ou orale, sous forme d'un texte ou d'une représentation graphique, est le vecteur de la communication. Elle est donc le seul outil à la disposition de l'enseignant pour assurer une transmission efficace du savoir.

Agrégation externe SV-STU 2008 Épreuve du secteur B		n° de copie	signatures des correcteurs		/20	REMARQUES
Introduction			Contexte			
			Analyse des termes du sujet à partir du contexte			
			Problématique clairement posée (2) et justifié par l'analyse du sujet (3)			
			Axe directeur de la composition explicité (2) et bien justifié (3)			
Pour tous les items abordés dans le barème et notés sur 4n pts : 0 : aucune information ; 1n : informations partielles ; 2n : informations précises non analysées ; 3n : informations précises et analysées ; 4n : informations précises, analysées et conduisant à une conclusion qui sert de base à une transition. L'analyse des fonctions nécessite à tout niveau une mise en relation explicite des solutions retenues avec les caractéristiques/contraintes du milieu aérien						
A - Le métaboaire : un système biologique en interaction avec son environnement	Les fonctions biologiques en interaction avec l'environnement	• 1) Les métaboaires sont hétérotrophes ; fonction de nutrition: prise alimentaire, digestion, assimilation, distribution, et donc approvisionnement de la cellule 2) L'énergétique cellulaire est optimisée par les processus oxydatifs : la respiration. 3) ce métabolisme est à l'origine de déchets : régulation du milieu intérieur et bilan hydrique 4) le métaboaire se déplace dans son environnement: la locomotion 5) Le tégument une interface avec le milieu extérieur 6) fonction ultime de l'individu : la fonction de reproduction • Point essentiel : le raisonnement logique qui va relier les différentes fonctions les unes aux autres, montrer celles qui sont en interaction avec l'environnement et permettre de limiter le sujet (exclure la circulation systémique, les systèmes de communication, etc.). • Dégager les fonctions qui seront à étudier sous l'angle de la relation adaptations/caractéristiques du milieu aérien : respiration, régulation hydrominérale et excrétion azotée, locomotion, reproduction, régulation thermique. Limitation du sujet				
	Les conditions de vie du milieu aérien	Masse volumique, viscosité, pressions et concentrations des gaz, chaleur massique, conductivité thermique, teneur en eau, .. (tableau ou comparaison air/eau attendu). Grande variabilité.				
B - Les surfaces d'échanges respiratoires en milieu aérien	L'air est un fluide léger et riche en oxygène	Le milieu aérien n'est pas portant : les évaginations s'effondrent (poussée d'Archimède 812 fois inférieure à celle de l'eau). Seule solution : une invagination. Exemple d'une invagination très simple : la cavité palléale des gastéropodes (prosobranches) Comment une surface d'évidence réduite peut-elle suffire ? Relation avec une 2 ^{ème} caractéristique du milieu aérien : L'air est un milieu riche en O ₂ : notion de capacitance (βx): pO ₂ dans l'air et dans l'eau, relation avec les concentrations disponibles				
	Le milieu aérien est déshydratant et peu visqueux	L'air est un milieu déshydratant : limiter les pertes d'eau par une surface d'échanges : par une réduction des interfaces entre l'invagination et le milieu extérieur (diamètre des orifices réduits, analyse attendue), fermeture du pneumostome chez les gastéropodes pulmonés , mais également réabsorption de la vapeur d'eau dans les voies aériennes avec 1 exemple au choix : abaissement de la pression de vapeur saturante, par une diminution de la température, réabsorption par la paroi des cornets nasaux (exemple du dromadaire). Un renouvellement rapide par mouvement alternatif est possible car l'air est peu visqueux (63 fois moins que l'eau)				
	Unité et diversité des échangeurs respiratoires en milieu aérien	Les invaginations simples	Le poumon est une solution parmi d'autres invaginations (1 exemple autre que le poumon est attendu : cavité buccale, vessie natatoire, ..)			
			Poumons sacculaires des batraciens : air riche en oxygène donc faible surface comparée aux branchies de Téléostéens. Ventilation par déglutition ; opportunisme évolutif : le poumon est une invagination du pharynx			
		Le poumon alvéolaire des mammifères	Organisation générale : les voies aériennes (orifices réduits - déshydratation, cf ci dessus), le système pleural (pression négative permanente) soutient (squelette hydrostatique) la structure alvéolaire, la ventilation : cycle, la musculature intercostale (valeurs des pressions mises en jeu très faibles), l'expiration passive (élasticité pulmonaire) et relation avec la viscosité du milieu aérien Dessins et valeurs chiffrées indispensables : évolution des volumes, des pressions, etc...)			
			Les échanges alvéolo-capillaires : surface d'échange entre 2 milieux différents , épaisseur, gradient de Px : optimisation des paramètres de la loi de Fick. Px et Cx : la capacitance n'est pas la même dans le milieu extérieur (air) et le milieu intérieur (aqueux). Adaptation à d'autres contraintes : la tension superficielle alvéolaire : les pneumocytes II, les poussières volatiles : mécanique mucociliaire des voies aériennes			
			Relations respiration-circulation : le passage à une double circulation avec une circulation pulmonaire à basse pression			
		Le système trachéen des insectes	Organisation générale (stigmates, invaginations tégumentaires, trachées, troncs trachéens, trachéoles, cellules trachéolaires), démonstration de l'adaptation de cette solution aux contraintes du milieu aérien (invagination, ventilation des stigmates aux troncs trachéens, milieu déshydratant et respirations périodiques). Particularités de ce système : le système respiratoire est système de distribution			
		Le poumon tubulaire des oiseaux	Un système très particulier : système tubulaire, qui répond aux contraintes abordées ci-dessus, mais qui répond également à d'autres impératifs : la contrainte du vol (l'échangeur au sens strict est à volume constant). Sélection d'un système à courants croisés : description anatomique et fonctionnelle , diagramme d'échanges. Ce système n'est apparemment efficace que sur l'expulsion du CO2 qui est le paramètre limitant de la respiration en milieu aérien.			
	Autres systèmes	Pseudo-trachée, poumon diffusif, etc. : relations avec les caractéristiques du milieu				
Conclusion	Intérêts de l'anatomie et de la physiologie comparées pour dégager ce qui est réellement une réponse adaptative aux conditions de vie du milieu aérien de ce qui est l'expression de cette réponse adaptée aux contraintes préexistantes du plan d'organisation. Convergences des solutions retenues, adaptées aux contraintes et caractéristiques du milieu aérien. Bricolage évolutif. Unité et diversité des systèmes respiratoires					
Fond xcrétion, régulation hydrique et lieu aérien	Réflexion : la déshydratation n'existe pas que dans le milieu aérien, les téléostéens marins sont hypoosmotiques, d'où une régulation hydrominérale singulière : faible volume urinaire, excrétion ionique branchiale, adaptation tégumentaire.					
	Limiter les pertes d'eau liées à l'évaporation tégumentaire	Modification comportementale et physiologique	Chez les batraciens, et les gastéropodes : adaptation comportementale (rester dans un milieu où l'humidité relative est élevée : se soustraire au stress). Exemple : estivation des gastéropodes désertiques : l'escargot se retranche dans sa coquille dont il ferme l'opercule. Vie ralentie, etc			
		Adaptation tégumentaire	Le tégument des insectes : la chitine est perméable, c'est avant tout la couche de cire qui limite l'évaporation. CT tégumentaire attendue			
			La kératinisation chez les amniotes : structure de l'épiderme, l'accumulation de la kératine, mort des cellules, formation d'une barrière imperméable d'imparfaite à excellente. 1 exemple détaillé attendu			
			Autre fonction du tégument : Protection contre les U.V.			

C - Régulation du milieu intérieur : osminérale et minérale	Limiter les pertes d'eau urinaire	Concentrer l'urine : incompatible avec l'ammoniotélie : toxicité de l'ammoniac (uréotélie <u>urinaire</u> chez les téléostéens marins) : l'uréotélie et l'uricotélie sont les 2 modalités de l'excrétion sélectionnées en milieu aérien (relation avec les propriétés de ces 2 composés)			
		Mécanisme de concentration de l'urine	Le rein des mammifères : système à contre-courant de l'anse de Henlé qui permet une concentration de l'urine du tube collecteur. Gradient cortico-médullaire.		
			Longueur de l'anse de Henlé, pouvoir de concentration et vie désertique.		
		Uricotélie, concentration de l'urine et organes excréteurs	Les glandes à sels chez les sauropsides : l'organe de la régulation hydrominérale (NaCl et H ₂ O)		
			Chez les insectes : la réabsorption de l'eau se fait au niveau du proctodeum ; un exemple détaillé : papilles rectales ou coussinets rectaux		
	Conclusion	Diversité des solutions retenues (biochimie, organes excréteurs, mécanismes de concentration), et convergences évolutives (insectes, tétrapodes, ...)			
Apports en eau		L'eau de boisson, l'eau contenue dans les aliments, l'eau métabolique et même la vapeur d'eau dans certains cas			
D - La locomotion	L'air est un fluide léger	Perte de la poussée hydrostatique : le corps devient systématiquement plus lourd que le milieu			
	Alléger et adapter le squelette	Comparaisons os plein/os creux ; l'os pneumatisé des oiseaux. La courbure de la colonne vertébrale (concavité ventrale et corde musculaire thoraco-pelvienne). La cuticule des insectes n'est pas minéralisée			
	Soulever le corps du sol	Les appendices des arthropodes. Remarque : la marche n'existe pas qu'en milieu aérien ; les contraintes mécaniques sur les appendices sont faibles, animal suspendu à ses appendices.			
		Le membre chiridien des tétrapodes : autopode, zeugopode stylopode ; comparaison avec les appendices des arthropodes (dessin attendu) ; Contrainte mécanique, bras de levier sur le stylopode : conséquence sur la musculature appendiculaire			
	Mettre le corps en mouvement	Le membre parasagittal dressé : les 3 segments se font suite dans un même plan, la masse est portée par le squelette. Anatomie et biomécanique : développement de la marche, de la course, et du saut : développement d'un déplacement à haute vitesse dans un fluide peu visqueux. Déplacement des muscles (allègement du membre)			
		Parallélisme avec les adaptations au saut du criquet : convergence évolutive			
		Le vol : ailes et convergences. Aile d'oiseau, aile d'insecte, surface portante, rapport poids/surface/rigidité, différents types de vol, mise en mouvement de la surface alaire, atterrissage, etc.			
		Développement d'un équilibre dynamique : contrôle de position et de la motricité et leurs conséquences sur le système nerveux.			
E - La reproduction	Les gamètes, la cellule-œuf et l'embryon ne peuvent pas survivre/se développer en milieu déshydratant (S/V, etc..)				
	Les animaux aériens à reproduction aquatique	Un exemple: les batraciens, etc.			
	La fécondation interne	Organes copulateurs et comportements reproducteurs (attention existe aussi en milieu aquatique !)			
	Protection hydrique, croissance tridimensionnelle et développement de l'embryon	Les insectes et les vertébrés amniotes ; convergence évolutive. La cavité amniotique : un milieu extérieur artificiel ; conséquences sur le développement des annexes embryonnaires.			
		Les annexes embryonnaires des vertébrés amniotiques: comparaison d'un vivipare et d'un ovipare			
	Reproduction aérienne et saisonnalité	Relation entre les modalités de l'excrétion azotée et le mode de développement : uréotélie versus uricotélie			
F - Les réponses adaptatives à un environnement thermiquement fluctuant	Régulation comportementale, diapause, vie ralentie, migration etc. Ectothermie, endothermie, point de consigne.				
	L'homéothermie et les caractéristiques du milieu aérien	Le milieu aérien est un milieu très variable (faible inertie thermique de l'air dont la capacité calorifique (heat capacity, J/L°C) est 3400 fois plus faible que celle de l'eau). Un gradient thermique peut être maintenu en milieu aérien car l'air est isolant (conductivité thermique 24 fois plus faible que celle de l'eau) et la couche isolante se chauffe à moindre coût : homéothermie, une réponse adaptative spécifique du milieu aérien.			
	La physiologie d'un homéotherme	Coût métabolique de l'homéothermie (de x5 à x10). Conséquences sur tous les systèmes			
		Limiter les échanges thermiques : fonctions tégumentaires et comportementales (manchots) ; la thermogénèse et la thermolyse			
		Torpeur, hibernation, migration, etc.			
Conclusion	Quelques idées clés ...				
	... qui permettent de dégager des réponses concrètes aux questions posées en intro				
	Ouverture pertinente				
Forme	Plan	Logique, cohérence			
		Titres informatifs, adéquation entre titres et contenus des paragraphes			
	Transitions	absentes, artificielles, logiques, et bien justifiées			
	Illustrations	Clarté, taille, qualité des légendes, échelles, etc			
	Rédaction	Clarté, concision			
		Orthographe, syntaxe			
	Présentation				
			Bonus		
Commentaire général					

Le temps : dates, durées et vitesses des événements géologiques

Introduction

Le temps est un continuum. On le subdivise avec des repères pour qu'il soit « utilisable ». Ces subdivisions sont des segments aboutés ou des limites (les piquets ou les intervalles des mathématiques d'école primaire).

Les géologues ont oscillé entre ces deux approches : Cuvier et ses révolutions du globe avait tendance à mettre l'accent sur les événements (les piquets), alors que d'Orbigny le mettait sur les intervalles de stabilité des faunes (les couches les renfermant), ses événements étaient des catastrophes touchant les organismes. Cette approche favorisait la distinction de stratotypes de couches. Aujourd'hui on revient à la notion de stratotype de limite. On décide par convention d'un fait marquant, généralement l'apparition d'un fossile caractéristique.

Disposer d'une échelle permet de replacer les objets géologiques, les événements dans un ordre d'antériorité - postériorité. Pour pouvoir avoir accès aux processus, à la cinétique des phénomènes il convient, en plus, de disposer de chiffres pour les événements, pour les durées.

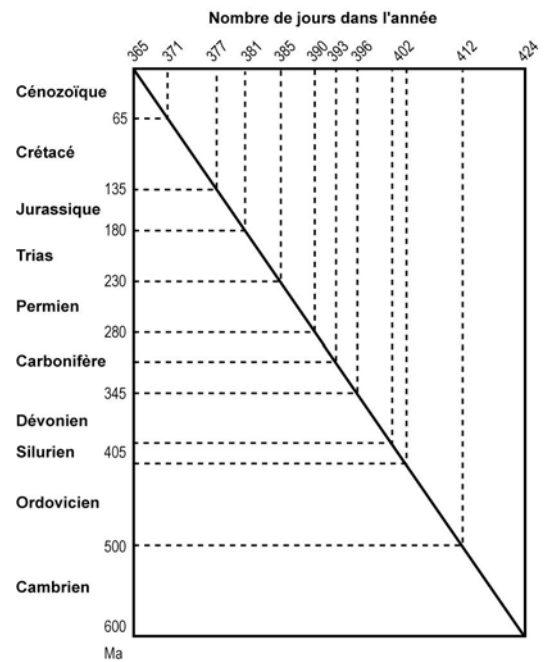
Le temps possède diverses acceptions. Il peut-être ressenti comme cyclique (le renouvellement des saisons) ou comme vectoriel (la flèche du temps qui passe). De nombreuses appréhensions du temps sont possibles selon les cultures, les religions, et les sciences. La notion du temps la plus fréquente reste celle du temps vectoriel, celui de l'histoire. C'est celui des sciences de la Terre.

La meilleure définition date du IV^e siècle : « *qu'est-ce que le temps ? Si personne ne me le demande, je le sais, mais si on me le demande et que je veuille l'expliquer, alors je ne le sais plus* » disait Saint Augustin. Il reste difficile à définir, de même que la vie ou la conscience nous paraissent des concepts évidents alors qu'il est difficile de les définir de façon simple et concise.

La notion de temps est toujours attachée à un référentiel, donc l'intervalle de temps n'est pas indépendant du référentiel.

Fig. 1 - **Des unités de temps hétérogènes**

Une manière de mesurer des phénomènes consiste en compter le nombre de jours, ou de saisons, ou de cycles astronomiques. Cette méthode peut être efficace à une certaine échelle (ex. humaine), mais ne l'est plus à une autre (échelle géologique): une année au Silurien durait 400 jours ex. stries de croissance de coraux, de lamellibranches. Leur croissance est soulignée par des fines stries qui correspondent à des cycles journaliers, et saisonniers. Le jour et la nuit n'ont pas la même durée. Qui plus est, leur rapport varie tout au long de l'année et selon les latitudes et on sait en outre que les jours n'ont pas la même durée sur les durées géologiques



Le temps est simple et compréhensible quand il est court, il devient plus flou, plus difficile d'accès quand il est long. Il est alors nécessaire de disposer de repères.

La durée d'un phénomène géologique est l'intervalle de temps pendant lequel il se déroule. Le début et la fin d'un phénomène sont certes eux-mêmes des phénomènes; mais leur statut de points de repère nous les fait qualifier d'événements. Les événements peuvent être instantanés, ou avoir eux-mêmes une certaine durée ; En outre le même événement peut être considéré comme « bref » ou « long » selon l'échelle de temps où on l'observe. Ainsi un séisme peut être considéré comme un événement dans le cadre du phénomène de mouvement de plaques, mais il est lui-même considéré comme un phénomène par le sismologue qui en analyse le début, le déroulement etc.

La vitesse est une grandeur qui mesure le rapport de la variation d'un paramètre sur la durée de cette variation. Exemple: vitesse de déplacement d'une plaque continentale, vitesse de sédimentation, vitesse d'une réaction chimique, vitesse de refroidissement d'un magma etc.

Le temps est une notion fondamentale de l'approche de la nature. Il est en effet ce qui caractérise l'approche scientifique du géologue. La biodiversité et l'environnement actuels ne sont que la dernière image d'un film que les géologues reconstituent. Certaines images anciennes s'estompent, ou ont été gommées, ou n'ont jamais été enregistrées. Le travail du géologue est de restaurer le film à partir de données fragmentaires, d'où certaines méthodes spécifiques.

Trois concepts fondamentaux : simultanéité, succession et durée.

Dans le temps géologique écoulé, il importe de déterminer si deux événements sont synchrones, c'est la corrélation stratigraphique. On peut ensuite ordonner les événements afin de constituer une succession chronologique : c'est l'échelle stratigraphique. L'aspect quantitatif, la durée, ne peut être apprécié que si une évaluation est possible. La connaissance de la durée est indispensable pour une approche phénoménologique de la géologie telle que la transformation de roches, la formation de plis ou de chevauchements, les transformations successives d'espèces

Un évènement est un fait qui survient à un moment donné. Il se caractérise par une transition relativement brutale, voire une rupture, dans le cours des choses, et par son caractère relativement soudain ou fugace, même s'il peut avoir des répercussions par la suite. Au sens général, il signifie tout ce qui arrive et possède un caractère peu commun, voire exceptionnel. Un séisme, une éruption volcanique sont des événements même s'ils s'inscrivent dans le cadre d'un phénomène plus pérenne tel qu'une subduction. De la même façon une crise de la biodiversité, qui sert à délimiter l'échelle des temps géologiques et un événement, c'est cette brièveté relative, cette rupture dans l'évolution, qui est utilisée. Les événements sont donc généralement utilisés pour définir le début ou la fin d'un phénomène.

1- Replacer les événements dans un ordre temporel (Chronologie relative)

L'actualisme est né en réaction au catastrophisme ambiant d'une certaine époque, mais il est aussi sujet à certaines réserves. Le présent est donc la clé mais pas la réplique du passé.

Quatre questions traduisent la problématique de l'estimation du temps : (1) le marqueur est-il régional ou global ?, (2) l'événement est-il synchrone ou diachrone ?, (3) avons-nous affaire à un phénomène continu ou discret ?, (4) la sémantique est-elle uni- ou plurivoque ?

L'idéal pour effectuer des corrélations sur de grandes distances est de disposer d'un marqueur enregistré sur une très grande surface. Ce type de marqueur est fourni par exemple par les cendres volcaniques dispersées lors d'une grande éruption. En effet même si les cendres mettent quelque temps à se déposer, elles peuvent être considérées comme parfaitement synchrones à l'échelle géologique.

1.1- Les grands principes :

11.1- Principe de superposition : de deux strates superposées, la supérieure est la plus récente. On aboutit à « plus jeune que » , « plus vieux que ». Principe fondamental de la stratigraphie, mais restreint aux structures proches de leur position de dépôt. Les critères de polarité de couches (granulométrie, traces d'activité) permettent de le vérifier. Dérogent à cette règle les coulées basaltiques (inversion du relief) et les terrasses fluviales (fig.2).

11.2- Continuité latérale : une strate continue est de même âge sur toute son étendue quel que soit son faciès. NB ce principe n'est néanmoins valide que pour une extension réduite (passage latéral de faciès)

11.3- Principe d'identité paléontologique : deux strates contenant les mêmes fossiles sont de même âge

L'association des fossiles est significative, non l'absence de l'un d'eux. A partir de ce principe il a été possible de définir des « bons » fossiles ou encore des « fossiles stratigraphiques », ceux qui répondent à 3 critères principaux : évolution rapide de l'espèce, vaste répartition géographique, grand nombre d'individus.

Différents indicateurs sont utilisés pour établir une chronologie relative (figure 2) **La figure fournie n'a pas valeur de modèle mais est inspirée du Massif Central.**

Fig 2

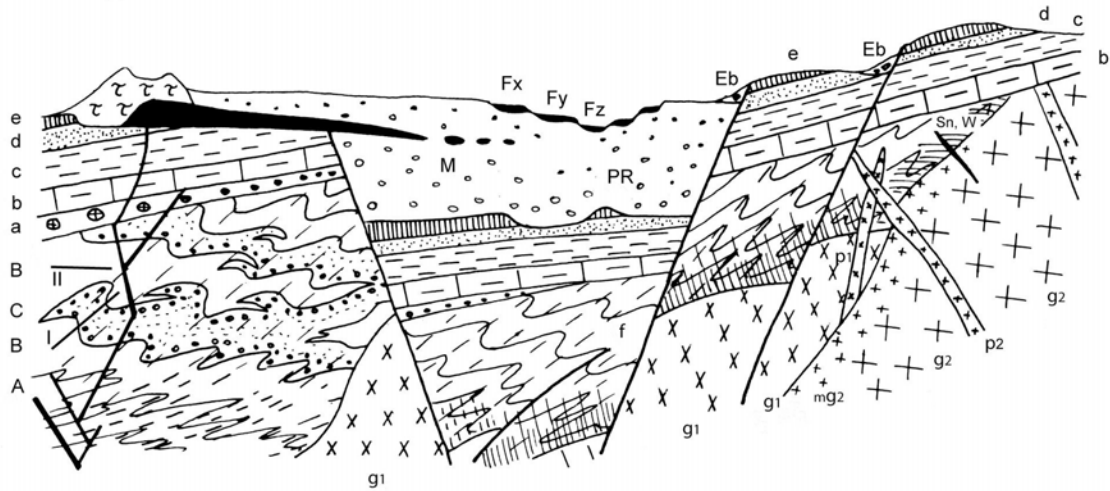


Figure 2-

Schéma présentant la plupart des structures géologiques et leurs éventuelles relations chronologiques.

(d'après Caron & al. – 2003

1. dépôt des séries A,B,C
2. plis couchés de la première phase (I) avec un métamorphisme général
3. plis déjetés de la deuxième phase (II)
4. granite γ_1 et métamorphisme de contact
5. filons d'aplite et de pegmatites π_1
6. chevauchement ϕ
7. granite γ_2 avec sa bordure figée $\mu\gamma_2$
8. filon π_2 et minéralisations (Sn, W)
9. érosion et pénéplanation
10. dépôt de la série sédimentaire a, b, c, d, e et remaniement de γ_1 et γ_2 à la base
11. début d'érosion
12. faille en extension
13. début du remblaiement M et ennoyage des paléoreliefs PR
14. filons diabasiques et coulées volcaniques (en noir)
15. brèches et scories trachytiques τ
16. fin de remblaiement
17. terrasses Fx, Fy et Fz, et éboulis Eb
18. brèches et scories trachytiques τ
19. fin de remblaiement
20. terrasses Fx, Fy et Fz, et éboulis Eb

11.4- Quelques rapports géométriques entre les éléments

- Le recoupement

Le recoupement est une des techniques élémentaire pour établir une chronologie relative : une structure recoupée est antérieure à celle qui la recoupe (dérivée du principe de superposition).

- L'inclusion

Un objet inclus dans un autre lui est antérieur. Cette règle, valable dans le cas des échantillons macroscopiques ou des lames minces de roches, ne peut être appliquée à l'échelle de la carte géologique : les filons par exemple sont toujours postérieurs au batholite.

11.5- Les filiations

On regroupe sous ce concept les phénomènes irréversibles et leurs conséquences (métamorphisme, érosion). La datation d'un événement érosif est délicate : si la fin est calée sur l'âge de la formation qui le cache, son début est incertain, ex. une discordance.

La première démarche de la stratigraphie a consisté à essayer de regrouper des strates en ensembles homogènes et génétiquement liés.

NB : L'épaisseur d'une strate n'est en aucun cas un indicateur de temps.

Diverses approches, ont permis d'élaborer des échelles. Les premières ont été fondées sur les faciès lithologiques (lithostratigraphie) et biologiques (biostratigraphie). D'autres échelles ont été basées sur des caractéristiques chimiques (chimiostratigraphie) ou physiques : magnétostratigraphie) ou encore basées sur les répétitions de strates (cyclostratigraphie).

Pour chaque méthode il est attendu : principe, méthode, avantages/inconvénients possibilités/limites)

1.2- Biostratigraphie

L'échelle des temps géologiques fut initialement basée sur de grandes modifications du contenu fossilifère des couches sédimentaires. Elle a donc une base fondamentalement biostratigraphique, aussi est-il normal de constater que les grandes crises du monde vivant correspondent à de grandes coupures temporelles puisqu'elles en sont issues.

Principe : la biostratigraphie est fondée sur le principe de l'irréversibilité de l'évolution.

On peut établir une succession biostratigraphie à partir d'événements (apparition, disparition, relai d'espèces...) ou à partir d'association d'espèces co-existantes. Dans le deuxième cas, seules les présences sont considérées comme informatives. La deuxième catégorie a donc tendance à être préférée. Le canevas biostratigraphique obtenu est soit **continu** : une zone succède à une autre sans discontinuité de temps, soit **discontinu** : une zone succède à une autre après un certain intervalle de temps. Un canevas chronologique peut être établi à partir des apparitions (FAD) , des disparitions (LAD), des abondances maximales (acmé) ainsi que des associations de diverses espèces ...

Les fossiles restent encore aujourd'hui le moyen le plus rapide, le plus fiable et le moins cher pour dater des couches... pour peu qu'elles en contiennent. Certes les fossiles n'ont pas tous la même qualité de finesse pour découper le temps, et cette méthode n'est applicable qu'aux temps phanérozoïques, mais ils constituent la très grande majorité des affleurements.

Une espèce (ou un taxon plus généralement) présente une répartition dans le temps (entre son apparition sur Terre et sa disparition) et une extension géographique. Cette distribution temporelle et spatiale est

déduite des observations de terrain, elle résulte donc de la qualité de la documentation.

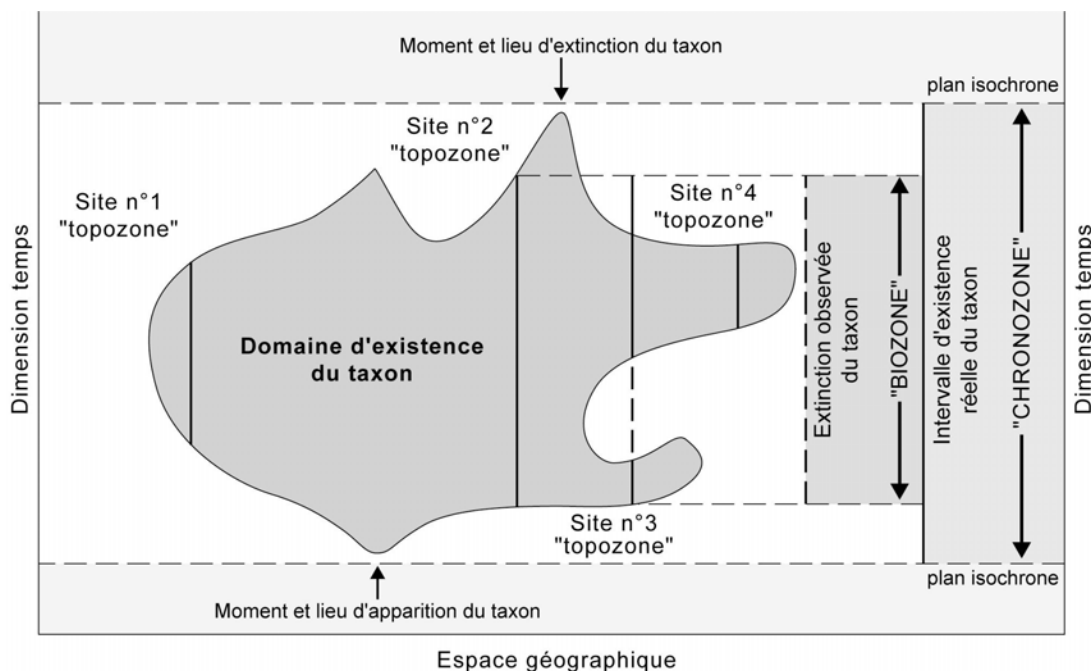


Figure . 3 Relations entre taxon, temps et espace.

Un taxon A, naît au temps t_1 et disparaît au temps t_2 . Selon le point de l'espace considéré (ici seulement deux dimensions de l'espace) le taxon apparaîtra exister seulement entre des bornes plus restreintes que t_1 et t_2 .

Le fait de ne considérer qu'un seul taxon est insuffisant pour le découpage du temps, en associer plusieurs permet, à la fois d'effectuer un découpage temporel fin et de corrélérer des terrains éloignés qui sont caractérisés par des associations d'organismes différents, selon les environnements.

La biozone :

Sur le terrain une biozone correspond à un ensemble de couches comprenant verticalement (dimension temps) et latéralement (dimension espace) la même succession de taxons. Cette unité est donc limitée par l'apparition, et/ou la disparition, d'une (ou plusieurs) espèce(s). Plusieurs types de biozones sont utilisées (figure 4). Fondamentalement on distingue deux types de biozones : les biozones continues (basées sur des présence/absences d'espèces et les biozones discontinues (basées sur des présences).

Figure 4 Représentation schématique des principaux types de biozones [CF CALQUE](#)

La biozone, définie par la répartition spatiale d'un taxon ou d'un groupe de taxons, ne peut pas définir en soi un intervalle de temps. La notion de **chronozone** a alors été introduite afin de s'affranchir du caractère spatial de la biozone.

Sur la base de successions de zones, une échelle relative de subdivision du temps –échelle biochronologique- peut être établie. L'objectif étant *in fine* d'établir les grands traits de l'histoire de la Terre, l'établissement de limites biostratigraphiques à valeur mondiale reste une priorité, quelle que soit la période.

Méthodes d'établissement des biozones.

Les approches empiriques manuelles ont longtemps prévalu (zones d'acmé, d'intervalle ...), elles sont les plus connues (voire les seules connues et enseignées). Des méthodes quantitatives sont élaborées depuis une trentaine d'années.

Bonus Méthodes quantitatives, 5 types d'approches :

1- l'approche **statistique**, qui s'appuie sur les représentations graphiques qui permettent de mettre en évidence les niveaux synchrones de deux ou plusieurs coupes : méthode des distances minimales, corrélation graphique de Shaw,

2- la deuxième : l'approche **semi empirique** regroupe des méthodes issues des travaux de l'approche statistique expurgés de leur bagage statistique : approche de Miller, Corrélations graphiques supplémentées, méthode de graphiques de position relative (= « *no space graph* »),

3- la troisième approche, celle des **techniques multivariées**, est liée à l'analyse des données (analyse de groupe, analyse en composantes principales), leur objectif est la mise en évidence de zones d'associations : Analyse de groupe (= *cluster analysis*) et mesure de similarité ; analyse en composantes principales ; traçage latéral.

4- la quatrième approche, **probabiliste** synthétise, à partir des nombreuses coupes, les séquences les plus probables des premières et dernière occurrences des espèces : classement (= *Ranking*) et échelonnement (= *Scaling*).

5- la cinquième approche, **déterministe**, est fondée sur les relations de co-existence entre les espèces. Elle est dite déterministe car une seule observation d'une telle relation suffit à l'établir. Nécessitant de nombreuses corrélations, cette méthode utilise la théorie des graphes pour son élaboration : Associations Unitaires (méthode particulièrement adaptée pour les informations nombreuses mais très fragmentaires).

Pour mémoire : certains biostratigraphes travaillant sur des populations rares ou stratigraphiquement déconnectées ont tendance à utiliser des suites d'espèces (ou assemblages d'espèces=) en estimant le degré d'évolution relatif d'un individu. Ils établissent alors des **phylozones**.

Figure 5 - **Des fossiles qui remontent à la nuit des temps ?**

La barre illustre la durée d'existence de la Terre. A gauche, l'origine de notre planète, il y a 4 560 millions d'années. Les premières traces de vie datent probablement de 3 800 millions d'années mais les plus anciennes coquilles connues datent du Cambrien : 550

millions d'années. Le monde fossilifère (en gris, sur la droite) représente donc seulement 12 % de l'histoire de notre globe. Il convient alors de distinguer l'histoire de la Terre, de celle de la vie et de celle que l'on obtient à partir des squelettes.



BIOSTRATIGRAPHIE	
Avantage possibilités	Inconvénient Limites
Peu onéreux Rapide Précis (résolution souvent meilleure que radiochronologie (si on prend en compte les \pm) Bien choisie : applicable à l'échelle globale Univoque	Limité au Phanérozoïque Nécessité de s'assurer de l'absence de remaniements Souvent une valeur régionale plus que globale : utile d'effectuer des intercalibrations entre biozones Sans cesse en évolution Ne fournit qu'indirectement un âge chiffré

1. 3- Magnétostratigraphie

Certains minéraux enregistrent les caractéristiques du champ magnétique terrestre lors de leur refroidissement ou lors de leur sédimentation. Le champ magnétique terrestre a subi de nombreuses inversions qui, ainsi enregistrées, permettent d'établir une échelle magnétostratigraphique valable pour l'ensemble du globe. Une unité de sédiments, ou roches, qui présente des caractéristiques identiques est différenciée des séries sus- et sous jacentes est appelée magnétozone.

Au cours du temps, la structure actuelle, appelée « normale » par convention, a alterné avec des périodes de polarité inverse. A l'échelle géologique ces inversions semblent être aléatoires (généralement entre 1 et 10 Ma, celle du Crétacé atteint 25 Ma). Le temps d'inversion est inférieur ou égal à 10 000 ans, ce qui en fait une limite stratigraphique très acceptable.

MAGNETOSTRATIGRAPHIE	
Avantage possibilités	Inconvénient Limites
Précis Global Applicable à l'ancien et au récent Indépendante de la litho- et biostratigraphie.	Ne permet qu'une corrélation au niveau de détails, nécessite de connaître le contexte (ne donne pas les « heures », mais seulement les « secondes ») Ne fournit pas un âge mais une corrélation. Nécessite un sédiment exempt de métamorphisme Pôles magnétiques et géographiques sont supposés confondus Requiert une bonne connaissance de la qualité des enregistrements, puisqu'une lacune est indécélable Non univoque

1.4- Lithostratigraphie

Initialement utilisé par les géologues industriels (d'où sont issus les appellations Crétacé, Carbonifère, Coquiller ...). L'unité de base est la formation qui doit être, par définition, une unité cartographiable. Elle est subdivisible en membres puis niveaux ou en horizons repères. Des formations sont regroupées en série : la succession est alors : horizon – membre – formation - série

LITHOSTRATIGRAPHIE	
Avantage possibilités	Inconvénient Limites
Opérationnel en local (cartographie et exploitation) donc pour exploitation industrielle Permet les reconstitutions les plus fines, à l'échelle locale Permet une carte de faciès Non univoque	Le changement latéral de faciès n'est pas traité Signification locale à régionale seulement = ne permet pas de corrélation à l'échelle globale Pas d'âges chiffrés (pas de durées, pas de vitesses)

1.5- Diagraphies

Les diagraphies sont souvent associées aux forages. Les diagraphies sont de différents types : Gamma-ray (mesure la radioactivité naturelle), électrique (résistivité ...), sismique (mesure de densité horizontale qu'il convient ensuite d'identifier en terme de faciès, porosité)

DIAGRAPHIE	
Avantage possibilités	Inconvénient Limites
Opérationnel en industriel Peu cher en complément du forage Rapide à mettre en œuvre sur le terrain	Nécessite un forage Nécessite une identification des faciès lithologiques Non univoque

1.6- Chimiostratigraphie

Principe : la composition chimique de l'eau de mer évolue au cours du temps, et elle est enregistrée dans les sédiments. Les courbes obtenues sont calées avec d'autres marqueurs

CHIMIOSTRATIGRAPHIE	
Avantage possibilités	Inconvénient Limites
Valeur globale	Nécessite de s'assurer de l'absence de diagenèse Ne date pas, Suppose une maîtrise des lacunes Non univoque Lourde à mettre en œuvre

1.7- Cyclostratigraphie

Certains enregistrements (physiques, chimiques, lithologiques) semblent répétitifs. S'ils sont cycliques, ou s'ils sont identifiables ils constituent des outils utilisables comme repères temporels. Certains phénomènes géologiques sont parfois enregistrés avec une certaine régularité. Si celle-ci est rythmique, elle peut servir à évaluer les durées et même éventuellement à dater. D'autres rythmes permettent d'établir des corrélations, parfois des durées, plus rarement des datations. Dans certains sédiments par exemple, la succession lithologique régulière est imputable à certaines variations climatiques globales, que l'on peut mettre en relation avec les cycles de paramètres orbitaux (23 000, 41 000 et 410 000 ans), ex. les alternances calcaires – marnes du Crétacé du SE de la France. Certains cycles sont diurnes, d'autres saisonniers, ou encore annuels et astronomiques

CYCLOSTRATIGRAPHIE	
Avantage possibilités	Inconvénient Limites
Cause première extraterrestre	Utilisable pour dater seulement si l'on est sûr d'avoir une séquence enregistrée continue. Influence locale parfois prédominante Non univoque

1.8- Stratigraphie génétique et stratigraphie séquentielle

Les strates peuvent être regroupées en ensembles sédimentaires qui permettent d'établir des sortes de filiations entre des strates superposées en fixant des logiques de successions verticales et horizontales.

Ainsi est née la notion de séquence stratigraphique.

- loi de corrélation de faciès : (loi de Walther)

Concept de base des relations génétiques entre strates superposées par rapport aux variations latérales de faciès Fig 6 , 7)

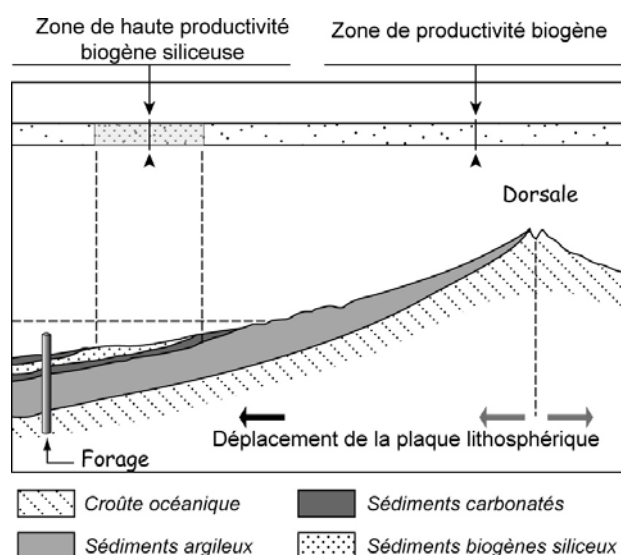
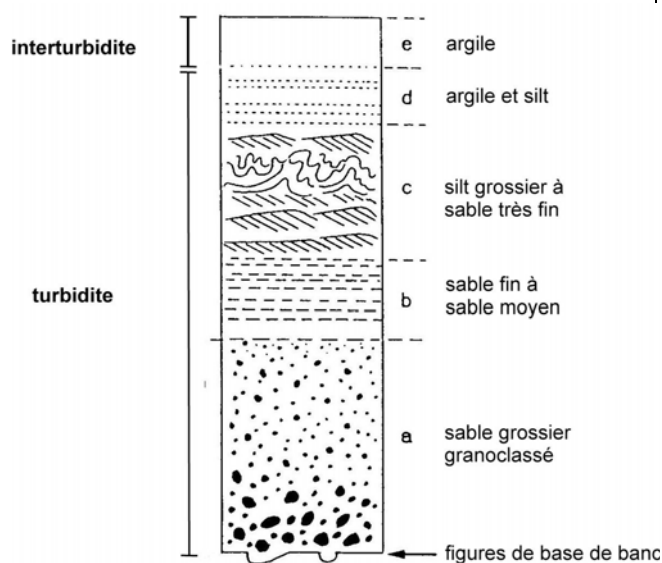


Fig. 6. - Ex. de principe de superposition de faciès (soit par subsidence, soit par eustatisme, soit par



comblement)

Un point situé sur le socle basaltique se déplace perpendiculairement à l'axe de la dorsale et simultanément s'enfonce par subsidence thermique.

Il sera alors recouvert de carbonate. Lorsque la profondeur atteint celle de la CCD, la sédimentation devient argileuse. Si le point passe sous une zone de haute productivité un sédiment biogène est enregistré.

Fig. 7 : Séquence de Bouma (séquence turbiditique)

Une avalanche turbide génère une succession de sédiments dont la taille permet de localiser l'activité hydrodynamique (en horizontal et en vertical) (fréquent dans les flyschs)

L'épaisseur de la partie grossière (rudites et arénites) de la séquence ne dépend pas de la durée du dépôt, mais de l'importance de la charge solide véhiculée par le courant de turbidité ; le dépôt de ce sédiment est

quasi instantané. Le temps nécessaire au dépôt d'1 cm d'interturbidite entre deux séquences turbiditiques, en revanche, est très long (10^3 à 10^5 ans)

La notion de séquence traduit des mécanismes d'origine et de durée variable. Les limites de séquences traduisent des modifications de l'environnement et mettent en évidence des événements (qui ponctuent l'histoire de la Terre et servent de repères temporels. L'analyse des séquences, la hiérarchie de leurs causes (du local au global) permet d'utiliser les séquences à toutes les échelles. A l'échelle du bassin sédimentaire elle concerne la stratigraphie séquentielle.

STRATIG. SEQUENTIELLE, GENETIQUE	
Avantage possibilités	Inconvénient Limites
Opérationnel en industriel Localise les lacunes & hiatus Identifie les processus Donne accès au global (moyennant certaines conditions) Permet une reconstitution en 3D Fournit un image continue	Nécessite une identification des faciès lithologiques Nécessite de différencier le global du local Ne fournit pas de datation, mais offre des corrélations Lourd à mettre en œuvre

Limites du message sédimentaire en général

Le message sédimentaire :

- 1- est incomplet (lacune et hiatus sont la règle)
- 2- est déformé, par pédogenèse, diagenèse, ou métamorphisme. Les couches sont certes des enregistreurs, mais elles ont souvent enregistré plusieurs histoires qui se superposent.
- 3- est sélectif (exemple classique en ce qui concerne les fossiles)
- 4- n'est pas toujours identifiable. Parfois on ne peut pas le reconnaître car on ne le connaît pas
- 5- l'âge et la durée des phénomènes ne sont pas facile d'accès (une épaisseur ne traduit pas une durée, ni en corrélation, ni en anticorrélation)

2- Chronologie absolue

La chronologie « absolue » se propose de chiffrer un événement en nombres d'années. Le mot absolu étant exagéré on lui préfère l'appellation datation radiométrique. Ces chiffres peuvent être obtenus par horloges isotopiques, paléontologiques et sédimentologiques.

2.1- Horloge sédimentologique

Elle est utilisable quand un dépôt est caractéristique d'un rythme : diurne-nocturne, lunaires, saisonnier, annuel, astronomique (Milankovitch). Elle fournit des durées, mais pas des âges (ex. varves qui ont été utilisées pour une approche de la connaissance de l'âge de la Terre)

Avantage possibilités	Inconvénient Limites
Accès direct à une durée	Suppose une maîtrise des lacunes

Indicateur chronologique et environnemental (lac, glaciaire ...)	Limité en durée (jusque 15 000 BP ¹) Fournit des durées, pas des âges
--	--

2.2- Horloges paléontologique

La dendrochronologie est basée sur le dénombrement des cernes de croissance. Les cernes de croissance des arbres dépendent des saisons, et donnent ainsi accès aux années. Ils peuvent servir de base à un repère temporel, voire, de proche en proche, à une datation. En effet, en partant d'arbres actuels, on peut construire une échelle des temps qui repère les années et relever des événements marquants (ex. année de forte sécheresse). Si on retrouve ces marqueurs sur d'autres tranches d'arbres (poutres par exemple) on peut remonter le temps et établir une échelle de référence. On a ainsi pu construire une échelle de plus de 5000 ans sur les chênes d'Europe du Nord. La datation d'un bois ancien se fait en cherchant sur l'échelle de référence une séquence comparable à celle enregistrée sur l'arbre à dater.

DENDROCHRONOLOGIE	
Permet un calibrage avec le C14	Surtout utile avec des arbres de longue durée de vie (certains allant jusqu'à 6000 ans)
Indicateur chrono et climatologique	Fournit des durées, pour un âge : nécessite un étalonnage préalable
Haute résolution	Ne permet que des datations de courtes périodes (pas d'ordre géologique), peut fournir des indications saisonnières pour des temps reculés, mais à des âges dont la précision n'est pas du même ordre de grandeur (ex. dendrochronologie sur des arbres du Permien : fournit des précisions pendant un siècle qui est lui-même mal situé)
A permis de montrer la variabilité de la durée des jours coelentérés : année de 400 jours au Dévonien, Nautilites : mois lunaire de 9 jours)	

D'autres indicateurs de croissance peuvent aussi être utilisés pour déterminer des durées (sur des lamellibranches, rudistes etc.)

2.3- Thermoluminescence

Méthode basée sur la propriété de certains minéraux d'émettre une lumière visible quand on les chauffe. La TL ne se produit que si le minéral a été préalablement soumis à une irradiation due à des rayonnements ionisants (ex radioactivité naturelle) pendant longtemps. La TL est due aux défauts cristallins : des atomes sont déplaçables si une énergie est reçue. Ils retrouvent leur position en les chauffant en émettant une énergie lumineuse. Principe de datation : on admet que la quantité de lumière restituée est proportionnelle à la dose d'irradiation reçue. Si l'irradiation a été constante un âge est accessible (quantité de lumière = dose par unité de temps x temps).

Avantage / possibilité	Inconvénient / limites
Datation de la formation de cristaux (ex. stalactites)	Remise à zéro par chauffage (volcanisme)
Datation utile comme test d'authenticité (en archéo et histoire récente)	Nécessite de mesurer la dose annuelle Blanchiment solaire (= chauffage)

¹ Le Présent en radiochronologie est 1950, par convention

Datation : 35 000 et 1Ma) = fait le lien entre datation ¹⁴ C et K-Ar Interétalonnage avec C14	Emission lumineuse faible Mise en œuvre complexe Suppose la stabilité de la dose annuelle Pas plus vieux que 1 Ma
--	--

2.4- Horloges isotopiques

Attention : on ne mesure pas un âge, on mesure un rapport isotopique que l'on interprète en terme d'âge.

La radioactivité a été découverte il y a plus d'un siècle. Rutherford a montré au début du XXe siècle, que la désintégration radioactive est calculable en fonction du temps, ce qui en fait une horloge potentielle, mais on ne chiffre les âges des roches depuis un demi-siècle seulement (1952, ce qui explique le choix de 1950 pour le Présent.

La radiochronologie fournit des dates qui autorisent le géologue à calculer la durée de phénomènes.

Principe : un élément père se désintègre en un élément fils en émettant un rayonnement (alpha, ou bêta ou gamma) à vitesse constante. La décroissance suit une des lois de la physique nucléaire :

$dN/dt = -\lambda N$, (1) N = quantité d'élément radioactif, T = le temps, λ = constante de désintégration, qui s'exprime en a^{-1} . De façon empirique cette loi dit que la vitesse de désintégration (dN/dt) est proportionnelle à la quantité (N) d'isotopes radioactifs présents. Cela signifie aussi que pour un intervalle de temps donné, la quantité d'isotopes radioactifs diminuera toujours dans la même proportion. Pour en rendre compte, on a défini la période T d'un élément radioactif comme le temps nécessaire à la disparition de la moitié du stock initial. T en fonction de λ : $T = \ln 2 / \lambda$. (2). Une des solutions les plus simples de l'équation différentielle (1) est la suivante : $N = N_0 e^{-\lambda t}$, (3) N = quantité actuelle d'éléments radioactifs, N_0 = quantité initiale. On peut donc remonter à un âge à partir de la seule mesure de la teneur N d'un échantillon à trois conditions : 1- on connaît N_0 , la teneur du réservoir avant qu'il ne cesse d'échanger avec l'atmosphère, 2- la perte de l'échantillon n'est due qu'à sa désintégration radioactive, 3- on connaît sa constante de désintégration. Les méthodes de calcul de détermination d'âge varient selon le type de minéraux utilisés pour les mesures et selon qu'il s'agisse d'isotopes de longue ou de courte période (cosmogéniques en particulier).

Isotopes de longue période en systèmes « riches » : concordia

La mesure directe nécessite l'absence d'élément fils au moment de la formation du minéral (qui « vieillirait » l'âge réel). De tels minéraux sont appelés « systèmes riches », ce sont des systèmes idéaux. C'est le cas de certains minéraux accessoires : zircons, monazite. Ces minéraux concentrent 3 isotopes lors de leur formation : ²³⁸U, ²³³U et ²³²Th, sans incorporer le plomb dans le réseau cristallin. Donc tout le plomb que l'on trouve dans ces minéraux est d'origine radiogénique, et la mesure de ²⁰⁶Pb/²³⁸U, ²⁰⁷Pb/²³⁵U et ²⁰⁸Pb/²³²Th permet d'obtenir directement le temps. On associe alors les 2 couples Pb et U sur une courbe graduée en temps, qui représente le lieu géométrique où les deux chronomètres fournissent le même âge, et de ce fait appelée *Concordia*. Si une mesure se situe sous la *concordia*, elle indique une perte de plomb (par diffusion à l'état solide) probablement due à un réchauffement (ex métamorphisme).

Isotopes de longue période en systèmes « pauvres » : Isochrones

Sauf cas spéciaux les minéraux incorporent généralement une certaine quantité d'éléments pères et d'éléments fils. Chaque chronomètre n'est utilisable que pour une fourchette de temps qui dépend de la

cadence à laquelle les éléments radioactifs réagissent et de la précision de mesure de l'appareil d'analyse.

^{14}C : 50- 50 000 ans ; Th 230 : 50- 500 000 ans ; Be10 : 50- 2.10^6 ans ; K –Ar : 10^6 - 5.10^9 ; Ar-Ar : 10^6 - 5.10^9 ; Rb- Sr Re-Os, U-Pb, Lu-Hf : 10.10^6 - 5.10^9 ; Sm – Nd : 100.10^6 - 5.10^9 .

Signification de la droite isochrone

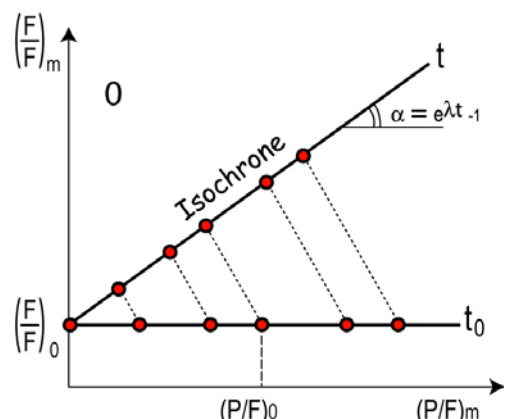
Le rubidium est un alcalin, ses propriétés chimiques sont proches de celles du potassium, on en trouve donc en quantité dans les roches de la croûte continentale, riche en feldspaths et en micas par exemple. L'isotope radioactif de masse atomique 87 représente presque 30% de la totalité du rubidium.

Le strontium, un alcalino-terreux comme le calcium, se trouve lui aussi dans les roches de la croûte continentale. Il possède plusieurs isotopes parmi lesquels le ^{86}Sr et le ^{87}Sr tous deux stables. Un minéral riche en rubidium, une biotite par exemple, contient à un instant donné une quantité P d'éléments pères (le ^{87}Rb) et une quantité F d'éléments fils (le ^{87}Sr). Cette quantité F est en fait la somme de la quantité de ^{87}Sr produit par désintégration et de la quantité de ^{87}Sr contenu dans la biotite depuis le début de son histoire. On peut écrire : $P + F = P_0 + F_0$, (4), $F = F_0 + F_r$, (5). P_0 et F_0 = quantités initiales, F et P les quantités actuelles, F_r la quantité de fils radiogénique.

Ces équations se basent sur une première hypothèse : le volume considéré, une biotite par exemple, n'a perdu ni gagné aucun élément autrement que par désintégration depuis l'instant 0 : le système est resté fermé. La combinaison des équations 3, 4 et 5 amène à l'expression suivante : $F = F_0 + P(e^{\lambda t} - 1)$ (6). On peut mesurer P et F, les teneurs en éléments fils et père actuelles. Restent deux inconnues : t, le temps pendant lequel le système est resté fermé et F_0 , la quantité initiale d'élément fils. Une mesure ne suffit donc pas et plusieurs analyses sont nécessaires. Pour déterminer un âge par la méthode Rb-Sr on mesure les teneurs en ^{87}Rb et ^{87}Sr de plusieurs minéraux d'une même roche ou de plusieurs fractions d'une roche, teneurs que l'on normalise à la teneur en ^{86}Sr . Cette opération est nécessaire car le rapport le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est le même pour les différents points de mesure ce qui permet d'éliminer une inconnue. De plus , cette opération présente l'intérêt qu'un spectromètre de masse ne fournit pas des abondances absolues mais des rapports d'abondance. En effet, les propriétés chimiques de ces deux isotopes sont les mêmes et leur différence de masse (1/87) ne provoque pas ou peu de fractionnement isotopique. Plusieurs roches ou plusieurs minéraux formés en même temps et à partir d'une même source incorporeront ces deux isotopes dans le même rapport. Les rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ sont en revanche variables puisque ces deux éléments n'ont pas les mêmes propriétés chimiques. Les différents couples d'analyse ont donc en commun le terme F_0 et le terme $(e^{\lambda t} - 1)$, ils s'alignent donc sur une droite d'équation de type : $ax+b$. $(^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}) = A \times (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}) + B$, (7), et $A = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$, $B = (e^{\lambda t} - 1)$.

La pente de la droite donne l'âge de fermeture du système (λt étant proche de 1, $e^{\lambda t} - 1 \sim \lambda t$) si toutes les hypothèses émises sont vérifiées, c'est à dire que les différentes fractions analysées n'ont plus gagné ou perdu d'atomes depuis le même instant, et qu'elles se sont formées à partir d'une même source. Si l'une de ces conditions n'est pas vérifiée, les points ne s'alignent pas précisément sur une même droite, on ne peut donc pas en déduire un âge isochrone (fig . 8).

Isotope cosmogéniques : la datation au ^{14}C



La datation au ^{14}C est la plus populaire. Elle a donné la plupart des repères absolus à la chronologie de l'histoire ancienne.

Le carbone, possède 3 isotopes* : le ^{12}C et le ^{13}C , stables, représentent respectivement 99 % et 1 % du carbone total, le ^{14}C , radioactif, radiocarbone, ne représente qu'une fraction infime du carbone total ($1/10^{12}$). Cet isotope est produit en permanence dans la haute atmosphère. Les protons du rayonnement cosmique et l'azote (^{14}N) de l'air réagissent pour donner du ^{14}C et un neutron. Le ^{14}C , formé en permanence est incorporé dans le CO_2 atmosphérique et le CO_2 dissous dans l'eau ainsi que toute la chaîne alimentaire par le biais de la photosynthèse. Cet isotope se désintègre spontanément en ^{14}N , par une désintégration β - (perte d'un électron). Le ^{14}C des réservoirs de carbone en équilibre avec l'atmosphère étant en perpétuel renouvellement, on peut poser comme première hypothèse que la teneur en ^{14}C de ces réservoirs est une constante. Cette hypothèse est à la base du principe de la datation. En effet, si les échanges cessent (si un organisme meurt, si une masse d'eau cesse d'échanger avec l'atmosphère ...), la teneur en ^{14}C de ce réservoir doit décroître inexorablement. Pour le ^{14}C , $\lambda = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ a}^{-1}$, T vaut donc 5730 ans.

Mesurer de la teneur actuelle en ^{14}C

Le scintillateur β ne mesure pas directement la teneur en ^{14}C d'un échantillon mais compte les désintégrations qui ont encore lieu à l'heure actuelle dans l'échantillon. Puisque, d'après l'équation (1), ce nombre de désintégration est proportionnel à la teneur en ^{14}C , on peut déduire l'une de l'autre !

Le calcul de l'âge et l'estimation de la teneur initiale

La comparaison des âges issus de la méthode ^{14}C de ceux issus de la dendrochronologie montre que la teneur en ^{14}C de l'atmosphère n'est pas restée la même au cours du temps. Dès les années 70, l'étude des cernes de croissance d'un pin et d'un chêne a donné des échelles de temps continue sur les derniers 7000 ans, l'idée vint de dater les arbres utilisés par la méthode ^{14}C . Alors que la courbe attendue était une diagonale dans un diagramme âge dendrochronologique /âge radiochronologique, des variations non négligeables sont apparues. La méthode ^{14}C n'était donc plus si "absolue", des arbres d'âges réels différents pouvaient sembler avoir le même âge radiométrique. Il a donc été établi une courbe des teneurs en ^{14}C atmosphérique pour recalibrer les âges obtenus par le calcul. Ces courbes montrent que les fluctuations du ^{14}C atmosphérique par rapport à l'actuel ($\Delta^{14}\text{C}$) dépendent : 1-au premier ordre des variations du champ magnétique terrestre, qui protège la Terre des rayonnements cosmiques, 2- des variations cycliques sont reliées à l'activité solaire, principale source de rayons cosmiques pour la Terre, 3- des variations brutales récentes sont liées à l'utilisation de combustibles fossiles, pauvres en ^{14}C et 4- aux essais nucléaires atmosphériques, qui enrichissent considérablement l'atmosphère en ^{14}C . La datation au ^{14}C est donc une méthode simple dans son principe, une mesure donne un âge, mais elle est subtile dans son interprétation puisque cet âge doit être recalibré à partir des courbes du $\Delta^{14}\text{C}$ atmosphérique. On ne s'intéresse dans cette méthode qu'à l'isotope qui se désintègre (l'élément père) et pas à l'élément fils. De nombreuses méthodes se basent sur la mesure des concentrations du père et du fils, la méthode Rb-Sr en est un exemple.

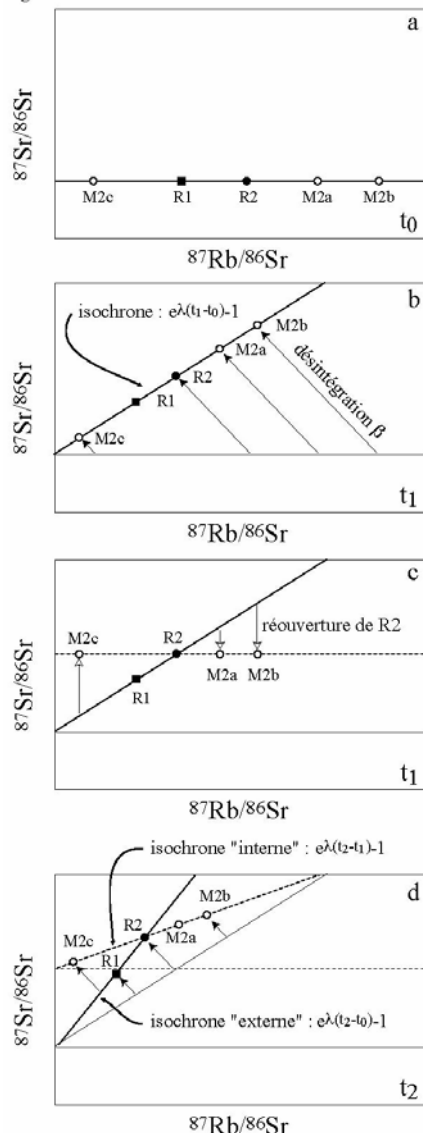
La méthode Rb-Sr : plusieurs mesures pour un âge.

La désintégration du ^{87}Rb en ^{87}Sr a une période particulièrement longue ($\lambda = 1,42 \cdot 10^{-11}$, T = 49 Ga), ce qui la rend utile pour dater des roches très anciennes. La figure 9 présente des diagrammes $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ en fonction de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ dans lesquels plusieurs points de mesures ont été reportés. Ces points représentent

des minéraux différents au sein d'une même roche ou des roches différentes ; la droite, appelée isochrone, qui les relie, représente un âge.

Isochrones externes et isochrones internes

Figure 9



Les analyses sur roches totales et sur minéraux séparés ne mènent que rarement aux mêmes âges.

(Figure 9). Deux roches R1 et R2 formées au même instant t_0 . La roche R2 contient les minéraux M2a, M2b et M2c. A cet instant t_0 (9a), toutes les analyses donnent le même rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et des rapports $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ différents qui dépendent de la chimie des roches et des propriétés des réseaux cristallins des minéraux. Au cours du temps, les différents systèmes (minéraux ou roches) s'enrichissent en ^{87}Sr et s'appauvrissent en ^{87}Rb par désintégration radioactive. La pente de la droite donne l'âge de formation (9b). Si à un instant t_1 , la roche R2 subit une perturbation qui provoque la diffusion des éléments à l'échelle de la roche, alors les différents minéraux vont réhomogénéiser leurs rapports isotopiques du Sr sans pour autant changer leur rapport $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ (9c). Si les systèmes se referment jusqu'à un instant t_2 , alors les différents points d'analyse sur roches totales s'aligneront sur une droite dont la pente indique encore l'âge de formation des roches (isochrone externe), alors que les points d'analyse des minéraux séparés de la roche R2 indiqueront l'âge de la perturbation de la roche (isochrone interne). Les événements métamorphiques, mais aussi les percolations de fluide ou l'altération chimique sont parmi les perturbations capables de remettre à zéro l'horloge du couple Rb-Sr.

Les cas concrets sont souvent complexes, les remises à zéro peuvent être multiples, incomplètes ... L'interprétation est alors

épineuse.

L'interprétation des âges obtenus par la méthode Rb-Sr.

Bonus

La fermeture d'un système et la notion de température de blocage

La notion de température de blocage est utilisée dans l'interprétation des âges issus des méthodes ^{40}K - ^{40}Ar et ^{39}Ar - ^{40}Ar . Les méthodes Rb-Sr, K-Ar et ^{39}Ar - ^{40}Ar ont montré la diversité des mises en oeuvre possibles : sur roche totale ou minéraux séparés, par chauffage incrémental ou *in situ* ... L'interprétation des âges en termes d'événements géologiques amène à penser que, pour une méthode donnée et un minéral donné, on date le passage sous une température de blocage..

La datation radiométrique en géologie repose donc sur la mesure des teneurs en un ou plusieurs isotopes dans une fraction de roche (matière organique, minéral isolé, ou roche totale). Ces teneurs n'ont une signification d'âge que si la fraction étudiée s'est comportée comme un système fermé depuis l'événement que l'on cherche à dater. Que ce soit pour la méthode ^{14}C ou les méthodes Rb-Sr et ^{39}Ar - ^{40}Ar ,

un des écueils majeurs est la caractérisation des quantités initiales, d'éléments père pour le ^{14}C , d'éléments fils en excès ou hérités pour les autres méthodes.

Pour les méthodes Rb-Sr et ^{39}Ar - ^{40}Ar , un âge a une signification différente selon les conditions de cristallisation du ou des minéraux étudiés. La notion de température de fermeture rend compte du contrôle majeur de la température. On peut remonter à l'histoire thermique d'une roche par la combinaison de plusieurs méthodes. Des analyses plus fines permettent aujourd'hui de dater en plus du refroidissement et de la cristallisation des minéraux, leurs éventuelles recrystallisations en relation avec des déformations, des circulations de fluides.

Une datation absolue n'a donc de sens en terme de géologie que si elle est accompagnée d'une étude méticuleuse de la roche à dater, du terrain à la lame mince.

RADIOCHRONOLOGIE	
Avantages, possibilités	Inconvénient, limites
Chiffres	Mesure des rapports et non des âges Interprétation parfois délicate Lourde et Absolu seulement par son nom

3- SYNTHESE

3.1- Mise en corrélation

On peut aujourd'hui dater des roches sédimentaires : séries marines et continentales (fossiles et minéraux authigènes), des roches métamorphiques, le volcanisme (point de cristallisation) etc... et des phénomènes à partir d'événements : chaînes de montagnes (minéraux isobares), subductions (phases fluides), etc .

Toutes ces datations n'ont pas la même valeur : dater un événement ponctuel ne signifie pas dater un phénomène qui a une durée. En effet, un phénomène peut avoir un déroulement continu ou discontinu ; dans ce dernier cas, le phénomène est constitué d'une succession d'événements : la vitesse de déplacement d'une faille est fait d'une succession d'événements. On peut mesurer la vitesse d'un phénomène par les dates de début et de fin du phénomène, on peut déterminer sa vitesse moyenne (fig.10). En comparant vitesse réelle et vitesse moyenne on détermine si un phénomène est continu ou discontinu.

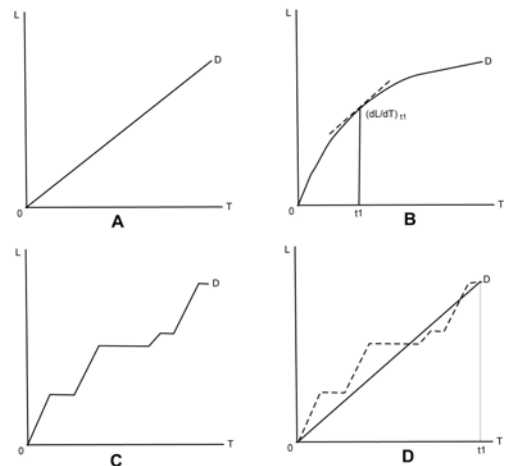


Fig. 10.

Fig. 10. Représentation graphique de la vitesse d'un phénomène, marqué par des événements ou non. (1)

augmentation continue, vitesse uniforme ; (2) augmentation continue, vitesse diminuant régulièrement ; (3) événements

permettant de définir la vitesse du phénomène; (4) vitesse moyenne du phénomène à partir des événements.

Obtenir des âges relatifs ou absolus a permis d'établir des corrélations et de proposer des échelles, différentes selon les voies d'approches mais dont le but ultime est l'obtention d'une échelle stratigraphique

utilisable par tous, y compris au niveau international. La mise au point de cette échelle s'est faite progressivement.

Temps stratigraphique, un temps mosaïque

Chaque couche représente une unité de temps. La superposition de couches est un empilement de tranches de temps certes, mais hétérogènes. Certaines couches, en certains endroits, peuvent servir de référence à valeur locale et, pour certaines, à valeur internationale. Ces étalons du temps géologique, constituent des stratotypes. Les stratotypes permettent de découper le temps, mais fournissent aussi une échelle discontinue par nature, puisqu'elle repose sur l'identification d'événements, des ruptures biostratigraphiques. La notion d'étage fut introduite par A. d'Orbigny avec le souci majeur de donner à ces subdivisions une valeur de corrélation générale. La notion de stratotype telle que l'entendait d'Orbigny était basée sur des catastrophes, des grands changements de la biosphère séparant les « créations » successives. La Terre était ainsi découpée en périodes qui n'avaient presque rien à voir les unes avec les autres. L'étage est basé sur des étalons choisis dans la nature : une ensemble de couches représente du temps, ces étalons, portent le nom des localités dans lesquelles elles ont été créées, soit directement (dérivé du nom géographique : Turonien, de Tours, Cénomaniens, pour le Mans, Aptien pour Apt etc.) d'autres sont basées sur les tribus locales : Cambres, Ordovices et Silures au Pays de Galles, Sénoniens, Séquanens ... en Bourgogne), plus rarement sur des particularismes (Carbonifère, Trias, Tithonien). Cette échelle reste divisée, au premier ordre sur les bouleversements de faunes et flores. C'est ainsi que le Paléozoïque est séparé du Mésozoïque par la plus grande crise que le monde vivant ait connu.

Au début du XXe siècle, l'âge de la Terre reste encore très indéterminé. Les propositions vont de quelques millions à des centaines de millions d'années. Les physiciens vont combler ce vide méthodologique. Lord Kelvin propose en 1864 un âge de 98 millions d'années dans une fourchette comprise entre 20 et 400 Ma. Divers types d'événements sont utilisables pour fonder une échelle stratigraphique, les différentes branches de la géologie sont alors susceptibles de construire leur propre échelle de façon indépendante (tectonique, biostratigraphique, magnétique, climatique ...) ou, au contraire, unir leurs efforts pour élaborer des échelles intégrées.

Limites de la notion de stratotypes

Le stratotype parfait n'existe pas car il faudrait que la série sédimentaire soit parfaitement complète, qu'elle soit fossilifère tout au long et de façon homogène, qu'elle contienne des fossiles de tous les groupes, que la province biologique à laquelle appartient le stratotype ait une extension géographique extrêmement vaste, etc etc.. La valeur d'un stratotype dépend de son contenu en marqueurs permettant un positionnement indubitable sur l'échelle chronostratigraphique. Ces marqueurs sont biostratigraphiques, mais également géochimiques (éléments traces, radioactivité naturelle) ou minéralogiques (niveaux repères de cendres volcaniques, etc...).

Stratotypes de limite

Le principal problème que pose l'enregistrement sédimentaire est de présenter des manques stratigraphiques, hiatus ou lacunes. Ces manques sont généralement concentrés au niveau des limites

d'unités stratigraphiques, et donc aux limites des étages. Or, l'intervalle de temps, correspondant à une unité chronostratigraphique, est identifié à partir des deux limites (supérieure et inférieure) de cette unité. Les stratotypes d'unité minimisent, de ce fait, l'enregistrement du temps. Pour cette raison a été introduite la notion de stratotype de limite. Un stratotype de limite comprend un ensemble continu de couches situées de part et d'autre de la limite. Il est possible de marquer la limite par un repère scellé sur la coupe. Ce sont les "clous d'or" (*Golden spike*) ou encore GSSP (pour *Global stratotype sections and points*) de l'enregistrement géologique. Les limites d'étage étant généralement des surfaces d'érosion, leur sommet présente une lacune stratigraphique. De ce fait, les stratotypes de limite définissent principalement la base des étages. La limite est définie par une commission internationale. *In fine* comme la limite est élue, elle est une convention, ce qui lui assure une certaine stabilité même si cela ne résout pas tout, car le repère choisi (niveau de cendre, apparition d'une espèce) peut s'avérer poser d'autres problèmes insoupçonnés au moment du vote. C'est pourquoi l'échelle est un travail en chantier permanent.

Un stratotype définit donc soit l'unité dans son ensemble (stratotype d'unité représentant une stabilité environnementale, une durée), soit la limite entre deux unités (stratotype de limite, représentant une rupture, un événement bref). Si la définition des stratotypes de limite a apporté une plus grande précision dans l'échelle des temps géologiques, elle ne fait pas disparaître l'intérêt des stratotypes d'unité, qui permettent de décrire le contenu de cette unité. Les deux notions sont complémentaires.

L'échelle des temps géologiques

Une échelle des temps géologique utilisable dans le monde entier permet aux géologues s.l. d'utiliser un langage homogène. L'échelle ayant varié au cours des années, un âge doit toujours être référencé avec l'échelle avec laquelle il a été obtenu (relative ou chiffrée). Celui obtenu avec des fossiles doit mentionner une biozone ou un étage alors que celui obtenu avec les isotopes doit être mentionné en Ma (et les incertitudes afférentes). L'échelle des temps géologique étant basée sur des changements de faune implique que cette démarche ne peut s'appliquer qu'aux temps phanérozoïques (15% de l'âge de la Terre, mais plus de 85% des affleurements). Une autre logique a été adoptée pour les périodes apparemment azoïques. Pour les temps antérieurs, les formations précambriennes sont divisées en Archéen et Protérozoïque dont la limite est fixée, par convention à 2500Ma. L'Archéen n'est subdivisé qu'en 4 parties, Eo-, Paleo-, Més- et Néoarchéen. Le Protérozoïque est subdivisé en 3 ères : Paléo-, Més- et Néo-, elles même subdivisées en plusieurs systèmes. Seule la base du dernier (Ediacarien) est marquée par un clou d'or.

Cas particulier du Quaternaire :

Le Quaternaire fut introduit parce qu'il représentait l'apparition de l'Homme. Mais cette apparition a été reculée dans le temps. On s'est alors rabattu sur les glaciations pour le définir et le subdiviser. En fait, aujourd'hui le Quaternaire est considéré comme un système de l'Ere Cénozoïque dont la base n'est pas encore bien définie : base du Gelasien (2,6Ma) ou base du Calabrien (1,8 Ma).

Unité de terrain		Unité de temps	
Lithostratigraphie	Biostratigraphie	Unités	Unités

		chronostratigraphiques (couches déposées pendant une unité de temps)	géochronologiques (unité de temps représentant une durée)
Groupe Formation Membre banc	Biozone	Erathème Système Etage Chronozone	Ere Période Age Chron

4.1- Durée et vitesse

L'âge des événements qui marquent le début et la fin d'un phénomène permettent d'en connaître la durée. Donc, hormis les événements de phénomènes actuels, que l'on chronomètre directement, et certains phénomènes cycliques (dépôts sédimentaires saisonniers par ex.), chercher à connaître le début et la fin d'un phénomène géologique nécessite de disposer de données fournies par la géochronologie isotopique.

Enoncer qu'un phénomène se déroule « vite » ou « lentement » implique une référence de l'écoulement du temps. Un séisme, une éruption volcanique, un glissement de terrain sont des phénomènes « rapides », dont la durée est limitée. A l'échelle géologique néanmoins ce sont des événements. En revanche, nous ne percevons pas avec les yeux le déplacement des continents, on ne peut le mettre en évidence que par la mesure ; c'est un phénomène dit « lent ». Dans cette catégorie, on distingue :

- les phénomènes dont la vitesse est mesurable directement, car ils se déroulent actuellement ; le problème est alors de savoir si leur vitesse réelle correspond à leur vitesse moyenne ;
- les phénomènes dont la vitesse n'est pas mesurable directement ; soit parce qu'ils sont actuels mais inaccessibles à l'observation, soit parce qu'ils appartiennent au passé géologique ; c'est alors la vitesse moyenne qu'on s'efforce de caractériser et de comparer à la vitesse réelle de phénomènes de même nature actuellement observables.

Les phénomènes rapides

Ex.1- Les séismes

Un séisme est un phénomène en soi, il est rapide, même à l'échelle humaine, il représente un événement. La durée totale n'excède pas quelques mn, et leur amplitude est généralement comprise entre 1 cm et 1 m. Quand on s'éloigne de l'épicentre, la durée du phénomène augmente, atteignant parfois plusieurs heures. En revanche, l'amplitude diminue et n'est plus directement perceptible (0,001 à 1 mm). Après un séisme on observe des répliques, séismes dont la fréquence et la magnitude diminuent au cours du temps. Suit une période plus ou moins longue de silence sismique jusqu'au déclenchement d'un nouvel événement majeur. Cette succession constitue le cycle sismique, qui est une bonne illustration de phénomènes interdépendants fonctionnant à des échelles de temps différentes, schématiquement 1 minute pour le séisme majeur, 1 an pour les répliques, 100 à 1000 ans pour la survenue d'un nouveau séisme majeur. Cette durée correspond à la durée totale du cycle sismique. Le cycle sismique est donc un phénomène quasi instantané à l'échelle des temps géologiques. En revanche, il n'en est pas de même pour le déplacement relatif des deux compartiments séparés par la faille sismiquement active.

Ex.2 -Les courants de turbidité et la séquence turbiditique

Les courants de turbidité sont comparables à des avalanches de neige. Un séisme survenu au large de Terre-Neuve en 1929 a déclenché un courant de turbidité, qui a provoqué la rupture en chaîne de câbles sous-marins et l'interruption successive des communications téléphoniques. Cet enchaînement a permis d'étudier la vitesse de propagation du courant de turbidité : elle décroît progressivement de l'amont vers l'aval. Lorsque le courant de turbidité diminue de vitesse, la charge solide se dépose par décantation. Ce phénomène très rapide (quelques heures à quelques jours), aboutit au dépôt d'une séquence caractéristique, la séquence turbiditique (fig. 7). Les flyschs sont constitués d'un empilement de plusieurs milliers de séquences turbiditiques séparés par des interturbidites. Les turbidites, qui représentent 80% à 90% de l'épaisseur de la formation, s'accumulent pendant un laps de temps insignifiant par rapport à la durée totale du dépôt. L'épaisseur dans une série de type flysch ne reflète donc absolument pas le temps de sédimentation. La série des grès d'Annot (Alpes de Haute Provence, fig. 7) est constituée de bancs gréseux pouvant atteindre 20m d'épaisseur ; ces dépôts sont des décharges turbiditiques (mises en place en quelques heures à quelques jours). Les bancs gréseux sont séparés les uns des autres par des joints ou par de minces lits argileux. Les grès, qui représentent la quasi-totalité de l'épaisseur de la série, correspondent à une durée de dépôt insignifiante ; l'essentiel de la durée correspond aux périodes d'interruption de sédimentation (joints entre les bancs de grès) ou à des périodes de sédimentation extrêmement lente (lits argileux avec des taux de sédimentation de l'ordre de 1 mm à 10mm/1000ans).

Les phénomènes lents

Ex. - La vitesse de déplacement des plaques

Diverses méthodes permettant de mesurer les vitesses réelles de déplacement des plaques : une méthode radio-astronomique (*Very Long Base Interferometry* = *VLBI*), deux méthodes satellitaires (*Global Positioning System* = *GPS* ; *Satellite Laser Ranging* = *SLR*). Les vitesses mesurées par ces méthodes sont des vitesses relatives ; il s'agit du déplacement d'une plaque par rapport à une autre. Les vitesses relatives réelles des plaques varient entre 5 mm/an et 160 mm/an.

Déplacement des plaques (phénomène) et séismes (événements) : La faille de San Andreas met en contact la plaque Pacifique à l'Ouest et la plaque Nord Amérique à l'Est : vitesse de 50 mm/an d'après le modèle NUVEL 1. La vitesse actuelle instantanée mesurée depuis 1984 par combinaison de données GPS et VLBI est comprise entre 33 et 37 mm/an. On constate aussi que : on enregistre sur ces failles un mouvement relatif de l'ordre de 30 mm/an, dans la région N (San Francisco), les failles sont « bloquées » ; les séismes le long de ces failles sont rares, mais ont de très fortes magnitudes et sont accompagnés d'un mouvement relatif important (atteignant plusieurs m). Si le mouvement relatif entre les deux plaques est globalement lent et régulier, il s'exprime en surface dans la zone-frontière de deux façons différentes ; soit par un glissement quasi continu (3 cm/an) le long de failles très sismiques, soit par « sauts » successifs (plusieurs m), survenant lors de séismes rares mais majeurs, le long de failles peu sismiques. En profondeur le mouvement entre les deux lèvres de la faille s'opère par glissement asismique continu (rebond élastique).

Pour mesurer la vitesse de déplacement des plaques dans le passé géologique : on utilise directement des datations radiométriques : vitesse de déplacement de la plaque Pacifique au dessus du point chaud d'Hawaï (supposé fixe dans le temps, hypothèse actuellement remise en cause...). On a daté par la méthode K-Ar les laves des îles et guyots de l'alignement Empereur-Hawaï dans le Pacifique. L'âge des guyots situés au niveau du changement de direction de l'alignement est de l'ordre de 40 Ma. Ils sont éloignés d'environ 3500 km du volcan actuellement actif d'Hawaï, ce qui implique une vitesse moyenne de déplacement de la plaque Pacifique sur le point chaud de 87,5 mm/an sur 40 Ma. On peut aussi utiliser l'échelle numérique des temps géologiques : on a daté par la micropaléontologie l'âge des premiers sédiments déposés sur les basaltes océaniques au niveau de divers forages effectués de part et d'autre de la dorsale médio-atlantique. Ces résultats stratigraphiques, reportés sur l'échelle numérique des temps géologiques, fournit une vitesse relative moyenne d'expansion de l'Atlantique sud de 20 mm/an sur 70 Ma. On peut aussi utiliser l'échelle des inversions magnétiques pour mesurer la durée et la vitesse de nombreux phénomènes géologiques, dont les vitesses de déplacement des plaques.

Pour les phénomènes dont la durée et la vitesse ne sont pas directement mesurables, il s'agit d'apprécier la durée et la vitesse de phénomènes appartenant au passé géologique. On se sert de repères temporels fournis, soit par les datations radiométriques, soit par la stratigraphie et reportés dans l'échelle numérique des temps géologiques elle-même étalonnée par des datations radiométriques. Les vitesses obtenues par ces méthodes sont des vitesses moyennes ou statistiques.

Ex.- Vitesse d'exhumation de la croûte enfouie au cours de la subduction

Les assemblages minéralogiques des roches métamorphiques permettent de définir les conditions de pression P et de température T subies. On peut alors reconstituer le chemin P,T suivi par une roche métamorphique ; en effet la paragenèse minérale correspondant à l'épisode de culmination métamorphique subsiste en partie lors de l'exhumation, à côté des paragenèses qui correspondent à des stades de rétro-morphose de la roche. Dans les cas favorables, il est possible de dater certains épisodes du chemin P, T, on obtient alors un chemin Pression – Température – temps, ou chemin P, T, t.

Ex. : Dora Maira (fig. 11). La coésite, forme cristalline « compacte » de la silice, nécessite pour sa formation une pression comprise entre 30 kb et 40 kb, soit une profondeur de 100 à 120 km et une température de 700°C à 800°C. Cette unité à l'affleurement a un métamorphisme dont l'âge se situe dans la fourchette 45 Ma–35 Ma. L'âge de la rétro-morphose la plus tardive est d'environ 35 Ma, ce qui implique une remontée de 100 jusqu'à 20 km de profondeur pendant un laps de temps de 10 Ma maximum, peut être moins. On admet une vitesse d'exhumation comprise entre 1 cm/an (remontée en 8 Ma) et 5 cm/an (remontée en 1,6 Ma).

41.3- Succession d'événements au sein d'une fourchette de datation établie grâce à la géochronologie isotopique

Evaluation des durées par l'étude de la succession des espèces (biochronologie)

Ex. succession d'ammonites au Kimmeridgien. Les données géochronologiques récentes donnent 146 Ma pour la base de l'étage et 141 Ma pour le sommet ; le Kimmeridgien durerait donc 5 Ma. On distingue 28 horizons d'ammonites dans cet étage. La durée moyenne d'un horizon est donc de 180.000 ans. Ce résultat est néanmoins à manier avec prudence car il ne s'agit que d'une moyenne globale. Le problème se complique si on prend en compte l'incertitude sur l'âge du sommet du Kimmeridgien (± 5 Ma). La durée de l'étage est donc en fait comprise entre 10 Ma et ... presque 0 Ma !

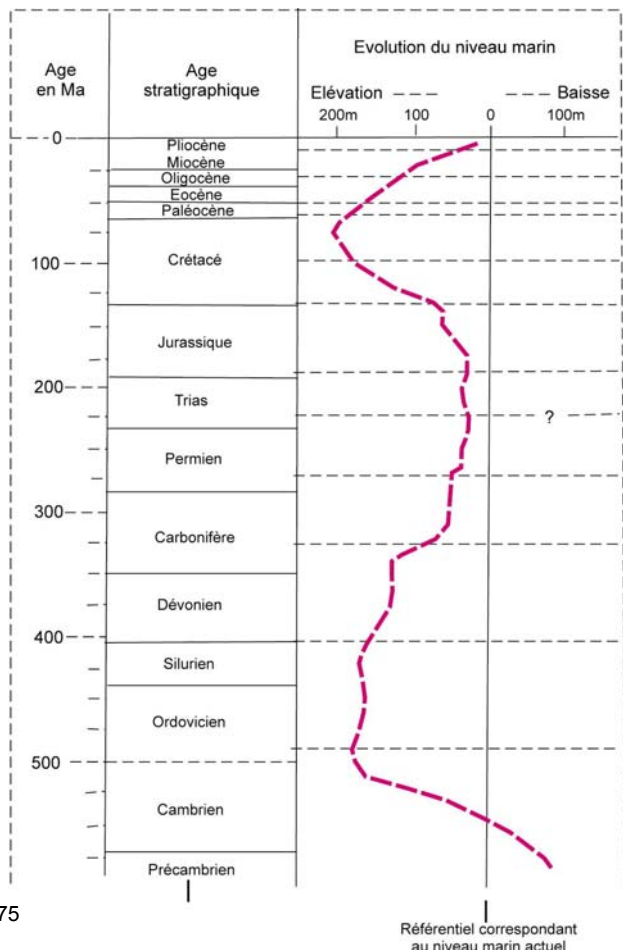
Evaluation des durées par l'étude des rythmes sédimentaires (rythmostratigraphie)

L'utilisation de phénomènes sédimentaires rythmiques comme marqueurs de temps est ancienne (Buffon l'avait utilisée pour calculer l'âge des vallées). Des rythmites saisonnières se déposent en milieu lacustre dans des conditions périglaciaires ; elles sont constituées d'une alternance de niveaux clairs détritiques d'été et de niveaux sombres argileux d'hiver. Le comptage des varves permet d'obtenir directement une durée ; mais cette méthode reste marginale, car elle est limitée à l'étude d'une tranche de temps de l'ordre de 200.000 ans (Quaternaire récent).

De très nombreux autres phénomènes géologiques sont cycliques, à toutes les échelles de temps ; journée (dépôts de marée), année (varves), siècle : 100 à 1000 ans (cycle sismique), 20.000 ans (alternances marno-calcaires), 1 Ma (séquences eustatiques de Vail), 10 Ma à 50 Ma (grandes transgressions et régressions, fig. 12), 300 Ma à 500 Ma (de l'éclatement d'un continent à la collision des fragments ou « cycle de Wilson »). Par ailleurs, la plupart des phénomènes cycliques font partie eux-mêmes de cycles de durée plus longue.

Les alternances marnes–calcaires : très répandues dans les séries pélagiques. Ex. Crétacé inférieur du domaine vocontien (SE de la France), de la base du Berriasien (135 Ma) au sommet du Barrémien (113 Ma), expose 1080 cycles élémentaires marnes–calcaires se déroulant dans un laps de temps de 22 Ma. Chaque cycle représente une durée moyenne de 20370 ans (précession des équinoxes).

Les phénomènes géologiques rapides sont en général des sous-phénomènes appartenant à une série discontinue ; leur répétition peut traduire



l'existence d'un cycle à une autre échelle de temps. Inversement une analyse plus fine des phénomènes géologiques lents et apparemment continus révèle qu'ils sont généralement soumis à des variations de vitesse dans le temps.

Les progrès dans l'évaluation des durées et des vitesses des phénomènes géologiques dépendront en premier lieu de la quantité et précision des données géochronologiques. Ces apports néanmoins ne devraient pas faire l'économie de travaux sur la validité des méthodes de datation. Les corrélations ont représenté les premiers moyens d'accéder au temps par le positionnement de repères relatifs. La radiochronologie nous fournit maintenant des données numériques. Leur multiplication permettra des corrélations d'événements de plus en plus nombreuses et de plus en plus fines. Cette avancée itérative montrera que le temps omniprésent mais généralement invisible, reste la base de la réflexion du géologue.

4.2 – Facteurs qui dimensionnent les vitesses :

Viscosité, rhéologie, forces, nombre de Stokes, nombre Rayleigh ...)

4.3 Le temps au laboratoire :

Expérimentation , modélisation (adimensionnement)

5- Conclusion

L'histoire géologique découle de la connaissance d'une chronologie, elle-même liée à des techniques. Les « techniques », en ce sens, sont porteuses de développements conceptuels. La perspective d'un temps long, présente dans les mythologies et dans la culture orientale et méditerranéenne de l'Antiquité, a été supplantée au Moyen-Âge par une vision biblique, révélée, de l'Histoire de la Terre, qui impliquait sa Création par Dieu *ex nihilo* ; et par conséquent un âge « historique » de la Terre. Un des objectifs de la science, depuis Galilée, a été de proposer une histoire fondée sur la mesure des objets naturels reliques des temps passés. Après une première étape, paléontologique, de la compréhension de la Terre passée (les catastrophes de d'Orbigny), de sa nécessaire durée (Buffon) et de l'immanence des principes en œuvre, le décryptage du temps fut l'œuvre de la physique -mais n'appelait-on pas déjà « physique » l'approche scientifique ? La mise en œuvre de datations chiffrées, établissant la validité des temps longs, a en outre eu des répercussions théoriques sur tous les champs disciplinaires de la géologie. Elle a permis de réévaluer l'importance relative des découpages stratigraphiques anciens et de compléter de manière raisonnée le puzzle des stratotypes. L'importance des lacunes stratigraphiques a été au cœur du développement de la stratigraphie séquentielle mais elle joue aussi un rôle dans notre connaissance des mécanismes de l'évolution de la biodiversité. La maîtrise des lacunes demeure aujourd'hui encore un enjeu majeur de la géologie qu'elle soit fondamentale ou appliquée.

agrégation SV-STU 200 <i>Épreuve du secteur C</i>	n° de copie	signatures des correcteurs
--	-------------	----------------------------

*si la copie est blanche, mettre **cb** ou **CB** dans la case jaune de la note harmonisée*

Introduction		Qu'est-ce que le temps ? - simultanéité - succession - durée		
		Bonus historique		
1	Chronologie relative	Principes	Superposition - continuité latérale - identité paléontologique	
		Géométrie	Recoupement - inclusion - filiations	
		Biostratigraphie	Relations <i>taxon-temps-espace</i>	
			Biozone : principaux types et méthodes d'établissement	
			Evaluation des durées par l'étude de la succession des espèces (biochronologie)	
		Autres méthodes	Magnétostratigraphie	
			Lithostratigraphie / Chimiostratigraphie / Cyclostratigraphie / Rythmostratigraphie	
		Stratigraphie	génétiq ue et séquentielle (séquence de Bouma,...)	
		Bonus = limites du message sédimentaire en général		
2	Chronologie absolue	Autres horloges	Sédimentologiques	
			Biologiques (paléontologiques, dendrochronologiques,...)	
			Autres (thermoluminescence,...)	
		Datation isotopique	Principes (désintégration, fermeture du système, température de blocage,...)	
			Systèmes riches / systèmes pauvres	
			Datation au ¹⁴ C (cosmogénique)	
			Méthode Rb-Sr	
				Bonus = autres méthodes (¹⁰ Be, K/Ar,...)
3	Synthèse	Mise en corrélation		
		Temps stratigraphique - corrélations - stratotypes		
		Notion d'incertitude		
		Echelle des temps géologiques et son évolution		
		Quelques grands événements dans l'histoire de la Terre		
				Bonus = limites de la notion de stratotype,...
4	Durée et vitesse des phénomènes géol.	Les vitesses	Notion : directement/indirectement, rapide/lent, continu/discontinu	
			Vitesse de déplacement des plaques (instantané / géologique)	
			Vitesse d'exhumation de la croûte continentale	
			Vitesse dans les enveloppes externes (circulation océanique, hydro, atmosphère,...)	
			Autres exemples (interne,...)	
			Les facteurs	qui déterminent la vitesse (viscosité, rhéologie, forces, nombre de Rayleigh, loi de Stokes,...)
		Le temps au labo	Expérimentation / modélisation (adimensionnement,...)	
5	Conclusions	Conclusions		
6	Forme	Plan, cohérence, organisation,...		
		Rédaction, syntaxe,...		
		Illustration (qualité, pertinence,...)		

5. Les travaux pratiques

Commentaires de l'épreuve de TP de spécialité – secteur A

ANALYSE BIOCHIMIQUE, CYTOGENETIQUE ET DYNAMIQUE DU NOYAU DE LA CELLULE ANIMALE

L'épreuve comprenait une partie expérimentale (4h) une analyse de documents (2h).

I. Partie expérimentale : isolement de l'ADN, observation de chromosomes

Le début de cette première partie portait sur la purification de l'ADN des noyaux d'hépatocytes de rats. L'homogénat de foie de rat initial était réalisé par les préparateurs et fourni aux candidats.

Dans l'ensemble, les candidats ont correctement mis en œuvre les techniques demandées. Les erreurs ayant abouti à l'échec d'une manipulation ont souvent été dues à un simple défaut d'attention dans la lecture du texte.

Les frottis destinés à constater l'enrichissement de la préparation en noyaux se sont avérés d'assez mauvaise qualité, tant par leur coloration que par leur trop forte épaisseur. Bien peu ont obtenu l'étalement de cellules en monocouche requis. La partie technique ayant posé le plus de problèmes a concerné la réalisation de solutions d'ADN de différentes concentrations. Elles devaient constituer une gamme étalon permettant de déterminer la concentration de l'ADN purifié au cours de la manipulation. Cette difficulté ayant été prévue par les membres du jury, une courbe d'étalonnage avait été distribuée. In fine, les candidats ont pourtant réussi, dans leur grande majorité, à purifier correctement de l'ADN.

Pour ce qui est du compte-rendu, les candidats ont connu des difficultés à décrire et discuter les résultats de leurs expériences, à effectuer une représentation schématique adéquate avec des annotations correctes, à critiquer des résultats non satisfaisants et/ou proposer une technique complémentaire.

La fin de cette première partie amenait à mettre en évidence des chromosomes géants dans les glandes salivaires de la larve de chironome. Un certain nombre de candidats n'a pas su isoler ces glandes salivaires. Parmi ceux qui avaient réussi, bien peu ont réalisé une représentation schématique pertinente.

L'analyse de photographies de noyaux de cellules humaines dans lesquels des corpuscules de Barr étaient ou non mis en évidence a généralement été traitée de manière incomplète. De nombreux candidats n'ont pas su décrire le résultat de leurs observations. La nature somatique des cellules considérées ainsi que la proposition des caryotypes résultant de l'analyse ont souvent posé problème.

II. Contexte et objectif de l'exercice de biologie cellulaire et moléculaire

Il s'agit d'un exercice portant sur l'export nucléaire des ARN qui devait être traité approximativement en 2 heures. Cet exercice était basé sur des techniques, aujourd'hui classiques, de biologie moléculaire et cellulaire : transfection cellulaire, hybridation in situ, test in vitro d'export dans des ovocytes de xénope, gels retards, et siARN. Les candidats étaient conduits à :

- Décrire la localisation cellulaire de différents mutants de l'ARN VA1 adénoviral.
- Définir le motif moléculaire requis pour l'export nucléaire de cet ARN en comparant les phénotypes des différents mutants.
- Déterminer la nature et la spécificité des voies d'export nucléaire de différents ARN.
- Découvrir les molécules impliquées dans l'export des ARN en montrant qu'une petite GTPase associée au GTP (Ran-GTP) est impliquée dans l'export de différents ARN alors qu'une autre protéine, l'exportine 5, est spécifique de l'export de l'ARN VA1.
- Montrer que ce mécanisme passe par la formation d'un complexe ternaire entre le motif de l'ARN VA1 identifié précédemment avec Ran-GTP et l'exportine 5
- Montrer que le mécanisme d'export de l'ARN VA1 est utilisé pour l'export des micro-ARN
- Établir un schéma résumant la voie d'export des micro-ARN

Le temps imparti pour réaliser cet exercice était suffisant. Les candidats ont principalement traité ce sujet dans les dernières heures de l'épreuve, une fois les manipulations de la première partie terminée. Le nombre de planches photographiques (8) de questions (15) posées était approprié pour traiter le sujet correctement et découvrir pas à pas un mécanisme cellulaire. La grande majorité des candidats a largement traité les questions de cette deuxième partie. Un bon nombre est arrivé au terme de l'exercice et 30% des candidats ont proposé un schéma de la voie d'export des micro-ARN. Cet exercice s'est donc avéré bien discriminant.

En fonction de leur nature, les questions ont été traitées de façon très inégale. La description de la localisation cellulaire des ARN a été bien réussie ainsi que l'identification des protéines impliquées dans le mécanisme d'export. En contraste, les questions de réflexion, comme la définition du motif moléculaire de l'ARN VA1 requis pour son export basé sur la comparaison des structures des différents mutants des ARN VA-1 ou l'identification des différentes voies d'export nucléaire des ARN basée sur l'utilisation d'ARN compétiteurs ont posé des problèmes à un nombre important de candidats. Une des questions les plus mal traitées concerne l'effet de l'actinomycine D pour laquelle de nombreuses réponses inadéquates ont été proposées. Une grande partie des candidats a pu établir que l'export de l'ARN VA1 requiert une structure terminale double brin de 17 nucléotides d'après les expériences proposées mais que la longueur minimale requise pourrait être de 15 ou 16 nucléotides. Par contre la présence ou l'absence de nucléotides non appariés soit du côté 5' soit du côté 3' a souvent été mal analysée. Un point important n'a été abordé par aucun candidat : aucune séquence consensus n'est requise pour cet export, le principal pré requis étant la taille de la structure d'ARN terminal double brin. Ce point était essentiel pour donner un sens à l'existence d'un mécanisme commun à l'export de l'ensemble des micro-ARN (Ran-GTP et exportine 5) qui, par

définition, ne présentent pas de séquence consensus et régulent chacun l'expression de gènes différents sur la base de leur spécificité de séquence nucléotidique.

Tous les éléments indispensables étaient fournis dans le document soit sous forme de figures légendées et soit dans l'énoncé de l'exercice. Néanmoins, la lecture des copies révèle qu'une partie des candidats a perdu du temps à comprendre certains de ces éléments faute de posséder une connaissance et une pratique suffisantes des techniques et des concepts de biologie moléculaire et cellulaire récents.

Un exercice de ce type alliant réflexion sur processus biologique et connaissance des technologies modernes utilisées en biologie sur la base de la répartition du temps entre la partie pratique (2/3) et la partie théorique (1/3) est parfaitement adapté à cette épreuve. Ce type d'exercice peut être décliné dans les différentes parties du programme du secteur A et est extrêmement révélateur des connaissances et compétences des candidats.

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

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2008

TRAVAUX PRATIQUES DE SPECIALITÉ DU SECTEUR A

Durée totale : 6 heures

ANALYSE BIOCHIMIQUE, CYTOGENETIQUE ET DYNAMIQUE DU NOYAU DE LA CELLULE ANIMALE

Ce sujet comporte deux parties indépendantes :

- ❖ Partie I : Isolement des noyaux, extraction de l'ADN et caractérisation des chromosomes pages 2 à 15
 - *Durée conseillée : 4h - 120 points*
- ❖ Partie II : Analyse de l'export des ARN pages 16 à 32
 - *Durée conseillée : 2h – 60 points*

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

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

**AVANT DE RENDRE VOTRE COPIE, VERIFIEZ QUE VOUS AVEZ BIEN
INDIQUE VOS NOM, PRENOM ET NUMERO DE SALLE EN TETE DE
CHAQUE FEUILLE, ET QUE LES 32 PAGES ET LA FEUILLE DE PAPIER
MILLIMETRE SONT PRESENTES.**

Partie I – Isolement des noyaux, extraction de l'ADN et caractérisation des chromosomes

Objectifs : Les organites cellulaires peuvent être isolés et étudiés sous forme de fraction pure, ce qui permet, en particulier une analyse biochimique qualitative et quantitative de leurs constituants et une étude de leur activité.

L'étude des noyaux nécessite de procéder en deux étapes :

- La première afin d'obtenir une fraction pure de noyaux.
- La seconde afin d'extraire l'ADN à partir des noyaux purifiés et de le caractériser.

Le fractionnement cellulaire se fera sur du foie de rat. Le fait que la population cellulaire constituant cet organe soit très homogène facilite le fractionnement. Les différentes étapes de l'isolement seront contrôlées par microscopie optique. L'extraction de l'ADN sera analysée par spectrophotométrie. Enfin les chromosomes seront étudiés sur des préparations analysées en microscopie optique.

A- Analyse d'un l'homogénat de foie de rat contenant les noyaux

1- Protocole : préparation de l'homogénat

Toutes les manipulations se déroulent dans la glace.

Question I – A – 1 a : Pourquoi travailler dans la glace ?

Réponse à la question I – A – 1a :

Le froid permet de diminuer les activités enzymatiques. Eviter les dégradations au cours de la purification

Le foie des animaux a été prélevé et congelé. Il a ensuite été coupé puis broyé par un « Turrax » dans la solution S1 dans la glace. Le résultat de ce broyage a été filtré sur la gaze pour éliminer les fragments non broyés et appelé homogénat H. Cet homogénat ainsi préparé vous est distribué par l'enseignant.

La composition de la solution S1 est donnée ci-dessous.

Solution S1
Saccharose : 0,2 M
CaCl ₂ : 0,001 M
KCl : 0,1 M

Question I – A – 1b : En quelques lignes préciser l'intérêt d'effectuer ce fractionnement dans la solution S1.

Réponse à la question I – A – 1b :

Respect de l'osmolarité et des équilibres ioniques

2- Observation de l'homogénat H

Mettre une goutte sur une lame de verre. Faire un frottis selon le protocole ci-dessous.

Placer le bord d'une lame propre au niveau de la goutte puis faire glisser cette lame le long de la première afin d'étaler la goutte d'homogénat. Après séchage, le frottis sera coloré par la méthode de May-Grünwald-Giemsa en opérant de la façon suivante :

- Couvrir le frottis de 15 gouttes de colorant May-Grünwald, attendre 3min. Puis ajouter 15 gouttes de tampon phosphate (PBS), attendre 1 min.
- Egoutter dans le cristalliseur.
- Au bout de 1 min couvrir la lame de 15 gouttes de Giemsa, au bout de 1 min.
- Ajouter 15 gouttes de tampon phosphate (PBS), attendre 1 min.
- Egoutter dans le cristalliseur.
- Sécher à l'air.
- Observer directement au microscope.
- L'observation avec l'objectif 1000 nécessite l'usage de l'huile à immersion.

Question I – A – 2 – a : Définir brièvement ce qu'est un frottis.

Réponse à la question I – A – 2 – a :

Etalement de cellules en monocouche

Question I – A – 2 – b : Observer, dessiner et annoter. Faire contrôler par un examinateur.

Réponse à la question II – A – 2 – b :

Dans l'homogénat on peut voir :

Des cellules non lysées : hépatocytes

Des hématies

Des débris cellulaires

Des noyaux

Par le MGG : les noyaux sont colorés en violet, les nucléoles en bleu foncé

Les débris cellulaires en bleu clair

Les hématies en gris

B- Isolement des noyaux

Vous disposez de 2 mL d'homogénat H.

- Ajouter 2mL de S1, mélanger en agitant doucement dans la glace.
- Ajouter 15 gouttes de NP6 (nonyl-phénol-polyoxyéthylène 6 groupements d'oxyde d'éthylène) et agiter 2 min dans la glace. Le rôle de ce détergent est de lyser la membrane plasmique des hématies.
- Ajouter 15 gouttes de NP12 (nonyl-phénol-polyoxyéthylène 12 groupements d'oxyde d'éthylène), agiter 2 min dans la glace. Ce détergent va permettre de solubiliser les débris cellulaires, les membranes des organites et la membrane externe de l'enveloppe nucléaire. NP6 et NP12 sont des détergents doux et non ioniques.
- **Inscrivez vos initiales sur le tube.**
- Déposer la totalité de la solution obtenue sur 2mL d'une solution S2 de saccharose 0,4M - dont la composition est donnée ci-dessous - en veillant à ne pas faire de remous : incliner le tube et faire couler la suspension traitée au détergent très doucement le long de la paroi du tube avec une pipette pasteur, sans agiter, de façon à ce que les deux phases restent bien séparées.
- Apporter le tube au préparateur pour qu'il réalise une centrifugation à 1800 tours/minute pendant 5 minutes à 4°C. Enlever le surnageant avec une pipette pasteur.

Solution S2: Saccharose : 0,4M CaCl ₂ : 0,001M KCl : 0,1M

1- Remise en suspension du culot de noyaux purifiés

Le culot est remis en suspension dans 2 mL d'une solution d'EDTA salin à pH 8 (suspension S). Agiter quelques secondes au vortex pour rendre la solution bien homogène. L'EDTA est un agent chélateur des ions Mg²⁺ qui sont indispensables à l'activité de la DNase.

Solution d'EDTA salin: pH 8 éthylènediamine tetra-acétate de sodium : 0,1M NaCl : 0,15M

Question I – B – 1- a : Quel est l'intérêt d'utiliser une solution à pH basique ?

Réponse à la question I – B – 1- a :

Un pH basique favorise la Dénaturation de l'ARN.

En effet les noyaux contiennent ADN et ARN.

L'ADN est protégé de la dégradation par les DNASEs dont l'activité nécessite de ions Mg^{2+} qui sont piégé par l'EDTA.

Prendre une goutte de la suspension S et faire un frottis coloré selon le protocole présenté à la question I-A-2.

Question I – B – 1 – b : Faire un schéma annoté du frottis. Faire contrôler par l'examineur.

Réponse à la question I – B – 1 – b :

Frottis :

On ne voit plus de cellules non lysées, ou très peu

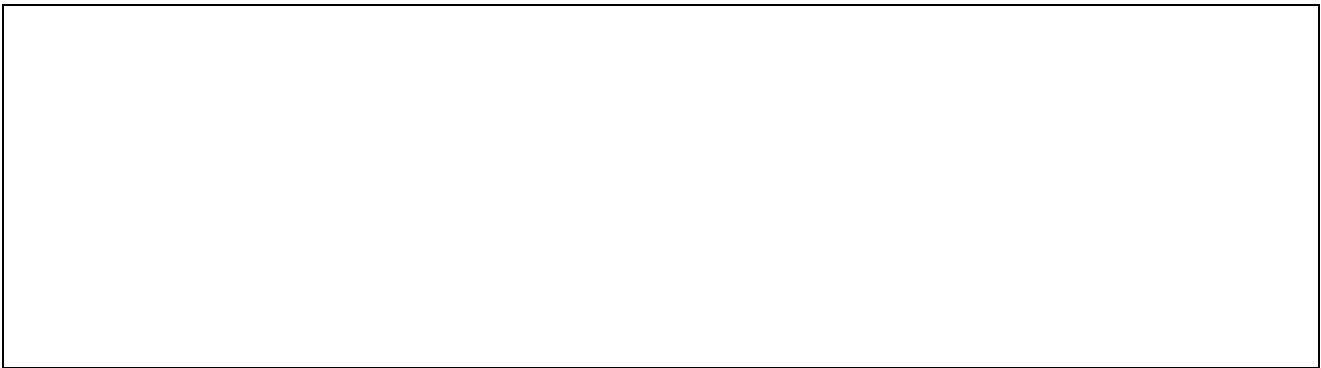
Encore des débris cellulaires en bleu clair

Quelques hématies en gris

Beaucoup de noyaux qui sont les éléments lourds retrouvé dans le culot après centrifugation différentielle.

En violet

La préparation doit sembler plus propre



Question I – B – 1 – c : Comparer avec le frottis précédent.

Réponse à la question I – B – 1 – c :

Le deuxième frottis permet de suivre la purification. On observe une préparation enrichie en noyaux. Ce n'est pas une réelle purification.

Question I – B – 1 – d : Qu'en déduisez vous ?

Réponse à la question I – B – 1 – d :

La technique ne permet pas une purification de noyaux mais un enrichissement.

Restent des contaminants cellulaires.

Il faudrait faire une ultracentrifugation différentielle pour avoir des noyaux purs

C- Extraction des acides nucléiques

1- Lyse des noyaux

Les noyaux sont lysés à l'aide d'un détergent : le désoxycholate de sodium (DOC) détergent fort, naturel (sel biliaire). Ajouter 0,1mL de DOC à la suspension S, boucher les tubes, passer quelques secondes au vortex pour lyser la membrane interne de l'enveloppe nucléaire, puis ajouter 0,5mL de perchlorate de sodium 5M. L'augmentation de la force ionique favorise la dénaturation des protéines.

Ajouter 2,5mL d'une solution de chloroforme dans l'alcool isoamylique qui va favoriser la dénaturation et la précipitation des protéines. Agiter fortement dans la glace après avoir bouché le tube. Apporter à centrifuger à 3000 tours/minute pendant 10min à 4°C.

Question I – C – 1 – a : Quel est l'objectif de la déprotéinisation ?

Réponse à la question I – C – 1 – a :

Les nucléoprotéines qui interagissent avec l'ADN du noyau doivent être éliminées pour permettre la purification de l'ADN

Question I – C – 1 – b : A ce stade, faire un schéma récapitulatif des manipulations.

Réponse à la question I – C – 1 – b :

2- Précipitation et caractérisation de l'ADN

Recueillir le surnageant dans un tube sans prélever l'anneau blanchâtre. Verser rapidement 2 volumes d'éthanol à -20°C sur la solution contenant l'ADN. A l'aide d'une pipette de verre recourbée, enrouler rapidement les fibres d'ADN sur la pipette et les laver dans l'acétone. Plonger la pipette portant les fibres d'ADN dans un tube contenant 4mL d'une solution de citrate de sodium - dont la composition est donnée ci-dessous - , agiter quelques secondes au vortex pour bien dissoudre les fibres.

Solution de citrate de sodium: NaCl : 0,015M Citrate trisodique : 0,0015M

La caractérisation de votre préparation d'ADN est réalisée par spectrophotométrie.

Question I – C – 2 – a : Indiquez le principe de la spectrophotométrie.

Réponse à la question I – C – 2 – a :

Lorsqu'une lumière monochromatique d'intensité donnée passe à travers une solution, une partie de celle-ci est absorbée par le soluté. L'intensité de la lumière transmise est donc inférieure. La [relation de Beer-Lambert](#) décrit que, à une longueur d'onde λ donnée, la densité optique ou absorbance d'une solution est proportionnelle à la [concentration](#) des espèces de la solution, et à la longueur du [trajet optique](#) (distance sur laquelle la lumière traverse la solution). Ainsi, pour une solution limpide contenant une seule espèce absorbante :

- C (en mol.L^{-1}) est la concentration de l'espèce absorbante ;
- l (en cm) est la longueur du [trajet optique](#) ;
- ϵ_{λ} (en $\text{mol}^{-1}.\text{L.cm}^{-1}$) est le [coefficient d'extinction molaire](#) de l'espèce absorbante en solution. Il rend compte de la capacité de cette espèce à absorber la lumière, à la longueur d'onde λ .

Afin de déterminer les conditions d'utilisation du spectrophotomètre, les mesures suivantes sont réalisées en utilisant soit une solution d'ADN soit une solution de protéines à 150 $\mu\text{g/mL}$ dont les résultats sont précisés dans le tableau.

Question I – C – 2 – b : Faire la gamme étalon à partir d'une solution à 5mg/mL d'ADN. Les dilutions se feront dans la solution de citrate de sodium. Remplir le tableau ci-dessous.

Réponse à la question I – C – 2 – b : remplir le tableau ci-dessous :

Concentration ($\mu\text{g/mL}$)	DO 230 nm	DO 260 nm	DO 280 nm
0	0	0	0
5	0.096	0.182	0.126
20	0.320	0.644	0.418
30	0.460	0.940	0.580
75	0.957	2.2	1.300

PROTEINES	0,48	0,06	0,25

	DO 230	DO 260	DO 280
1	0,012	0,025	0,028
5	0,054	0,114	0,073
10	0,109	0,238	0,146
20	0,222	0,481	0,288
30	0,321	0,702	0,41
50	0,526	1,151	0,674
75	1,065	1,747	1
100	1,202	2,385	1,34
200	2,29	>3	2,78

Question I – C – 2 – c : Réalisation des courbes de DO en fonction de la concentration pour les différentes longueurs d'onde 230nm, 260nm et 280 nm. Déterminer les limites d'utilisation du spectrophotomètre à partir de ces courbes?

Réponse à la question I – C – 2 – c : Courbes à réaliser sur le papier millimétré distribué, sur lequel vous noterez vos nom, prénom et numéro de salle.

Question I – C – 2 – d: Quelles molécules absorbent principalement aux trois longueurs d'onde utilisées ? Quelle(s) longueur(s) d'onde retiendrez-vous pour quantifier l'ADN ? Justifier.

Réponse à la question I – C – 2 – d :

230 nm : protéines (liaison peptidique et hémoglobine)

260nm : ADN, ARN ? peu de protéines (cf tableau)

280nm : protéines : aa aromatiques

Cependant on voit que l'ADN absorbe aux trois longueurs d'onde. On choisit donc une longueur d'onde à laquelle on ne repère que l'ADN

La longueur d'onde spécifique pour la quantification de l'ADN est 260 nm. On voit que les protéines absorbent faiblement.

En présence de l'examineur, mesurer la densité optique (DO) de votre échantillon d'ADN et d'un contrôle (un échantillon d'ADN témoin dont la concentration vous sera donnée sur place) aux trois longueurs d'onde différentes (λ nm) : 230, 260, 280.

Question I – C – 2 – e : Notez les résultats dans le cadre ci-dessous. Calculez les rapports DO260/DO230 et DO260/DO280 pour votre échantillon et le contrôle. Qu'indiquent-ils ? Quelle est la concentration d'ADN dans votre échantillon ?

Réponse à la question I – C – 2 – e :

Evaluation par l'enseignant de l'ADN récupéré

DO 260/230 et 260/280 sont voisin de 1.8. ces rapports traduisent la contamination des échantillons en protéines (hématies, protéines mal éliminées au cours de la déprotéinisation)

Comparer avec le témoin, théoriquement propres.

Valeur : exprimée en $\mu\text{g/ml}$, Tenant compte de la dilution. Valeur à discuter ensemble après le TP

Porter les tubes correspondants à votre échantillon et le contrôle dans un bain-marie à 100°C pendant 10min. Puis refroidir brutalement les tubes dans la glace.

Question I – C – 2 – f : Mesurer les DO de l'échantillon et du contrôle chauffés, à 230, 260, et 280 nm. Indiquez les résultats dans le cadre ci-dessous et comparez avec les DO observées à la même longueur d'onde sur l'échantillon et le contrôle non chauffés.

Réponse à la question I – C – 2 – f :

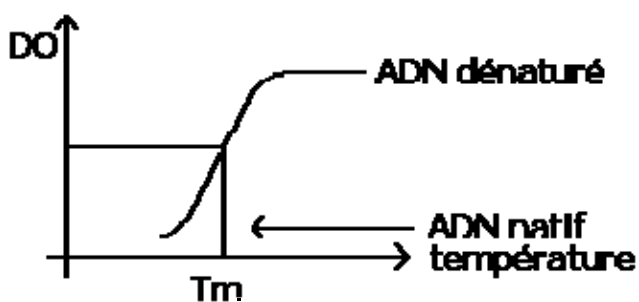
En théorie, la DO à 260nm doit augmenter après chauffage (effet hyperchrome). Les spectres d'absorption se chevauchant on observe aussi une augmentation de la DO à 230 et 280 nm

Question I – C– 2 – g : Quel est l'effet de la température sur l'échantillon et le témoin ?

Réponse à la question I – C – 2 – g :

L'ADN absorbe à 260 nm (à cause des bases puriques et pyrimidiques) lorsque l'on chauffe l'ADN, la viscosité diminue et la densité optique à 260 nm augmente. C'est l'hyperchromicité ou effet hyperchrome. Ceci est dû à la séparation des 2 brins d'ADN appelée fusion. On parle alors de température de fusion ou de T_m . Comme il y a 3 liaisons H entre G et C et seulement 2 entre A et T, plus le taux en GC est élevé plus T_m est élevée.

T_m est le point de transition où la moitié des brins sont dissociés, comme on peut le voir sur ce graphique.



Question I – C – 2 – h : Expliquez le phénomène à l'aide d'une courbe. Quel est l'intérêt du refroidissement brutal ?

Réponse à la question I – C – 2 – h :

Evite la renaturation spontanée de l'ADN.

Le refroidissement brutal évite un ré appariement aléatoire des brins d'ADN.

D- Caractérisation des chromosomes polyténiques des glandes salivaires de la larve de Chironome

1- Isolement des glandes salivaires et coloration des chromosomes polyténiques

- Placer les larves de chironomes sur une lame dans une goutte d'eau.
- Isoler les glandes salivaires.
- Déposer une goutte d'orcéine acétique.
- Mettre une lamelle, appuyer légèrement et colorer. 10 minutes.
- Observer au microscope et **faire contrôler par l'examineur.**

Question I – D – 1 : Faire un schéma annoté.

Réponse à la question I – D – 1 :

A faible grossissement : cellule glandulaire, ou chapelet de cellules : cytoplasme, noyau, produits de sécrétion.

A fort grossissement : chromosomes géants les striations transversales, les zones appelées « puff » ou anneaux de Balbiani qui ne possèdent pas de striations

Question I – D – 2 : Expliquer ce qu'est un chromosome polyténique et comment il se forme.

Réponse à la question I – D – 2 :

Un chromosome polyténique (plusieurs filaments) est composé de milliers de brins d'ADN qui se sont accumulés par endomitose : division chromosomique sans division nucléaire ni cellulaire, jusqu'à 2X 1600 chromatides .Leur diamètre est donc augmenté ainsi que leur longueur car il sont moins spiralés.

Les striations : chaque bande sombre correspond à la réunion des chromomères identiques de toutes les chromatides accolées.

Un chromomère correspond à une zone où la spiralisation persiste et qui est très riche en d'ADN : le locus d'un gène

Question I – D – 3 : On observe des renflements sur ces chromosomes qu'on appelle « puffs ». Qu'est ce qu'un « puff », à quoi correspond-t-il ? Concernant le développement de la larve de Chironome, pourriez-vous indiquer quelle est la signification physiologique de l'apparition de ces « puffs » .

Réponse à la question I – D – 3 :

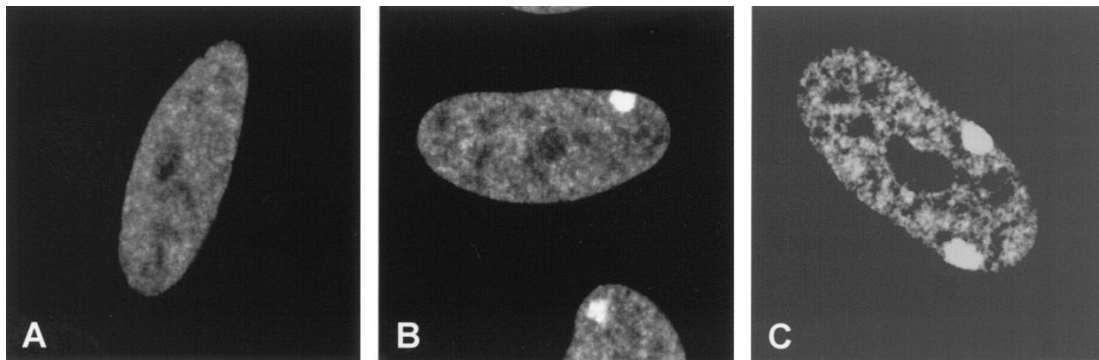
Les puff correspondent à des zones d'activité intense de transcription. Les chromatides se déroulent et sont le siège d'une synthèse d'ARN et correspondent à un gène en activité. C'est l'entrée en activité de gènes impliqués dans la métamorphose sous l'action d'une hormone (ecdysone). Existe uniquement dans les larves en métamorphose.

Question I – D – 4 : Quels sont les intérêts de l'étude de ces chromosomes ? **3**

Réponse à la question I – D – 4 :

Etude et localisation de gènes impliqués dans la métamorphose en activité. L'induction de 9 loci de puff peut être induite par la chaleur de 25° a 35°...mécanismes moléculaires inconnus, mais correspondent pour 5 à des gènes qui manifestent une activité au cours du développement normal de la larve

E- Corpuscules de Barr dans l'espèce humaine



Les corpuscules de Barr sont mis en évidence par immunofluorescence dans des fibroblastes humains de trois individus différents (A, B, C) et observés en microscopie confocale.

Question I – E – 1 : Définir ce que sont les corpuscules de Barr. Expliquer leur formation et l'intérêt du phénomène.

Réponse à la question I – E – 1 :

Les corpuscules de Barr sont une masse d'hétérochromatine (inactive sur le plan transcriptionnel) accolée à la membrane interne de l'enveloppe nucléaire des cellules somatiques et correspondant à l'inactivation d'un chromosome X. Uniquement chez les femmes.

Question I – E – 2 : Décrire et commenter les photos A, B, C.

Réponse à la question I – E – 2 :

Photo A : Pas de corpuscule de Barr : homme normal ou femme ne possédant pas de X fonctionnel

Photo B : Un corpuscule de Barr, fluorescent par cellule : femme normale avec 1X inactivé ou homme possédant un X surnuméraire

Photo C : deux corpuscules dans la cellule : 2X inactivés donc possédant 1 x surnuméraire

Question I – E – 3 : Qu'en déduisez-vous sur les individus A, B, et C ?

Réponse à la question I – E – 3 :

Caryotypes

photo A : homme 46,XY ou femme 45, X0 (turner)

photo B : femme 46, XX ou homme 47, XXY (klinefelter)

photo C : 47, XXX (trisomie X)

Partie II - Analyse de l'export nucléaire des ARN

Objectifs : La localisation intracellulaire d'un ARN est essentielle pour que sa fonction puisse être assurée. La localisation cytoplasmique ou nucléaire des ARN résulte de deux mécanismes opposés : la rétention nucléaire et le transport à travers les pores nucléaires.

Sur la base de l'observation de la localisation intracellulaire de mutants de l'ARN VA1 et à partir de données moléculaires, il s'agit d'identifier les déterminants nucléiques et protéiques requis pour assurer son export nucléaire et de déterminer la spécificité de ce mécanisme.

Conseil : les réponses seront rédigées uniquement dans les encadrés prévus cet effet.

A - Localisation intracellulaire de mutants de l'ARN VA-1

L'ARN VA1 est un petit ARN cytoplasmique adénoviral transcrit à partir de l'ADN génomique viral par l'ARN polymérase III. Il présente une structure secondaire complexe (**figure 1A**).

Différents mutants ont été produits par biologie moléculaire (**figure 1B** et **figure 2A**) et leur localisation intracellulaire analysée par hybridation *in situ* (**figure 1C** et **figure 2B**).

1- Mutants de la région centrale de l'ARN VA1

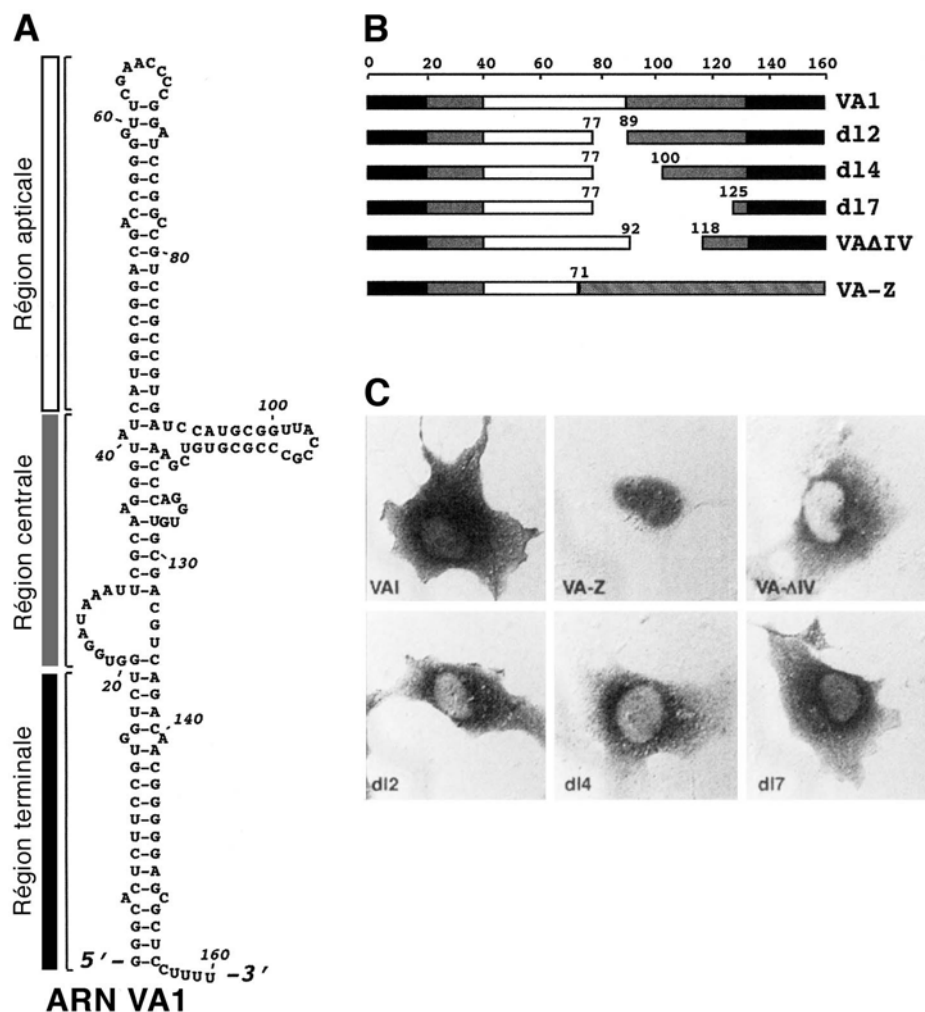


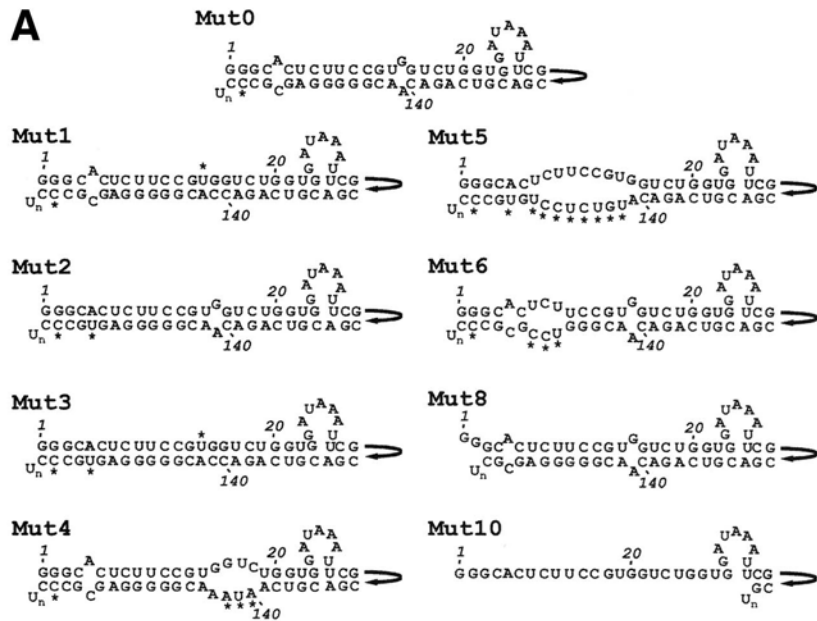
Figure 1 : (A) Structure de l'ARN VA1 présentant la région apicale (en blanc), la région centrale (en gris) et la région terminale (en noir). (B) Tableau des mutants d'ARN VA1 utilisés en C. Il s'agit de mutants de délétions (délimitées par les espaces manquants) et d'un mutant d'insertion (domaine central ajouté) remplaçant des parties des régions apicales et terminales. VA1 correspond à l'ARN VA1 non muté. (C) Localisation intracellulaire des mutants d'ARN VA1. Une lignée cellulaire (COS) est transfectée par les plasmides codant les mutants d'ARN VA1 indiqués et ces différents ARN sont ensuite détectés par hybridation in situ (en sombre sur les clichés).

Question II-A-1 : Quelle région de l'ARN VA1 est-elle indispensable à l'export nucléaire ?

Réponse à la question II –A-1

La localisation cytoplasmique est observée pour l'ARN VA1 et l'ensemble des mutants à l'exception du mutant VA-Z dont la localisation est nucléaire. La localisation cytoplasmique des mutants d17 et VAΔIV démontre que la région centrale n'est pas nécessaire à l'export. La localisation nucléaire du mutant d12 suggère que la région apicale n'est pas indispensable à l'export nucléaire. Néanmoins en l'absence d'élimination complète de la moitié de la région apicale dans ces mutants, il ne peut être exclu que la région apicale soit impliquée. En contraste la localisation de VA-Z suggère fortement que la région terminale est indispensable.

2 - Mutants de la région terminale de l'ARN VA1



B

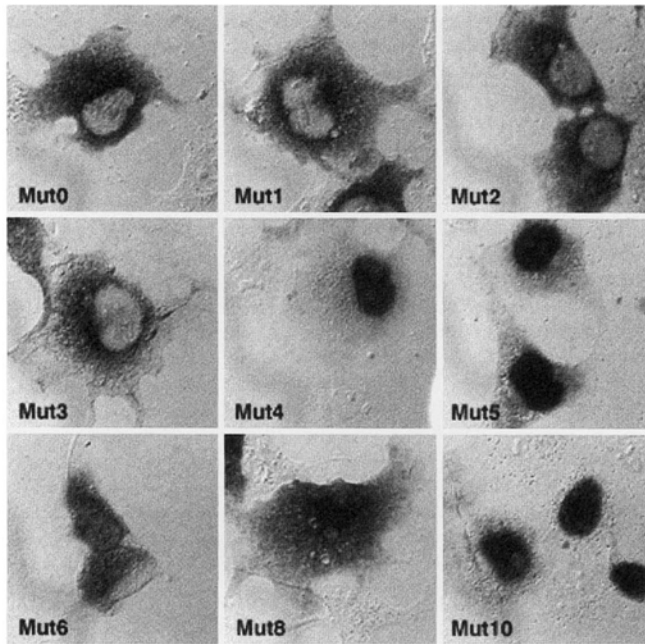


Figure 2 : (A) Nouveaux mutants de la région terminale de l'ARN VA1. Seule est présentée la région terminale, les régions centrales et apicales étant identiques à l'ARN VA1 sauvage. Les mutations ponctuelles sont indiquées par des astérisques. Mut8 comprend deux G supplémentaires à l'extrémité 5'. U_n = U-U-U en 3'. (B) Localisation intracellulaire des mutants d'ARN VA1. Les cellules COS sont transfectées par les plasmides codant les mutants d'ARN VA1 indiqués et ces ARN sont ensuite détectés par hybridation in situ (en sombre sur le cliché).

➡ Signifie que les régions centrales et apicales sont identiques à celles de l'ARN VA1 sauvage.

Question II-A-2 : Quelles informations pouvez-vous tirer de l'étude de ces mutants sur la région de l'ARN VA1 nécessaire à l'export nucléaire et ses caractéristiques ?

Réponse à la question II-A-2

La localisation des ARN des mutants Mut0, Mut1, Mut2, Mut3 est cytoplasmique alors que celle des mutants Mut4, Mut5, Mut6, Mut8 et Mut10 est nucléaire. Ces résultats confirment que la région terminale est suffisante et nécessaire pour assurer l'export nucléaire de l'ARN VA1.

Les mutants Mut1, Mut2, Mut3 contiennent une structure appariée d'une vingtaine de nucléotides et supportent des mésappariements limités (1 nucléotide). En contraste dès que les mésappariements deviennent importants (4, 5, 6 nucléotides) ou que la structure double brin disparaît (Mut10), l'ARN mutant est retenu dans le noyau. De plus Mut8 ne diffère du mutant Mut0 que par la région 5'. Dans Mut0, le premier nucléotide 5' appartient à la structure double brin alors que dans Mut8 les deux nucléotides non appariés en 5' avant le début de cette structure double brin sont suffisants pour entraîner la rétention de l'ARN Mut8 dans le noyau.

3 - Demi-vie des mutants

La demi-vie des différents mutants d'ARN VA1 a été mesurée dans ces cellules en présence d'actinomycine D. Cette demi-vie est identique à celle de l'ARN VA1 sauvage pour tous les mutants.

Question II-A-3 : Expliquez l'effet de l'actinomycine D et précisez quelle indication apporte le fait que la durée de demi-vie de chacun des ARN est identique.

Réponse à la question II-A-3

L'actinomycine D bloque la transcription et il est ainsi possible de mesurer la cinétique de disparition des mutants d'ARN VA1 présents avant l'ajout de ce composé. Le temps de demi-vie identique pour tous ces ARN indique que ce qui est observé dans les cellules COS dépend bien du contrôle de l'export des ARN et n'est pas lié à une vitesse de dégradation différentielle des différents mutants d'ARN VA1.

B - Localisation intracellulaire de mutants de l'ARN VA1 comprenant des régions terminales artificielles

La région terminale de l'ARN VA1 est éliminée et remplacée par structures artificielles dont les séquences sont indiquées en **figure 3** (page suivante).

Les mutants Stem correspondent à des régions terminales respectivement appariées sur 20, 17, 14 et 12 nucléotides (Stem20, Stem17, Stem14, Stem12).

Les régions terminales des mutants Xt8 et Xt18 sont appariées sur 20 nucléotides et comprennent respectivement 8 et 18 nucléotides non appariés supplémentaires du côté de l'extrémité 3'.

La région terminale du mutant MM1 est appariée sur 19 nucléotides et comprend un nucléotide non apparié du côté 5'. Celle du mutant MM3 est appariée sur 16 nucléotides et comprend 4 nucléotides non appariés du côté 5'.

Enfin les régions terminales des mutants Stem-3A et Stem-6A sont appariées respectivement sur 23 et 24 nucléotides et contiennent chacune une mini-boucle supplémentaire.

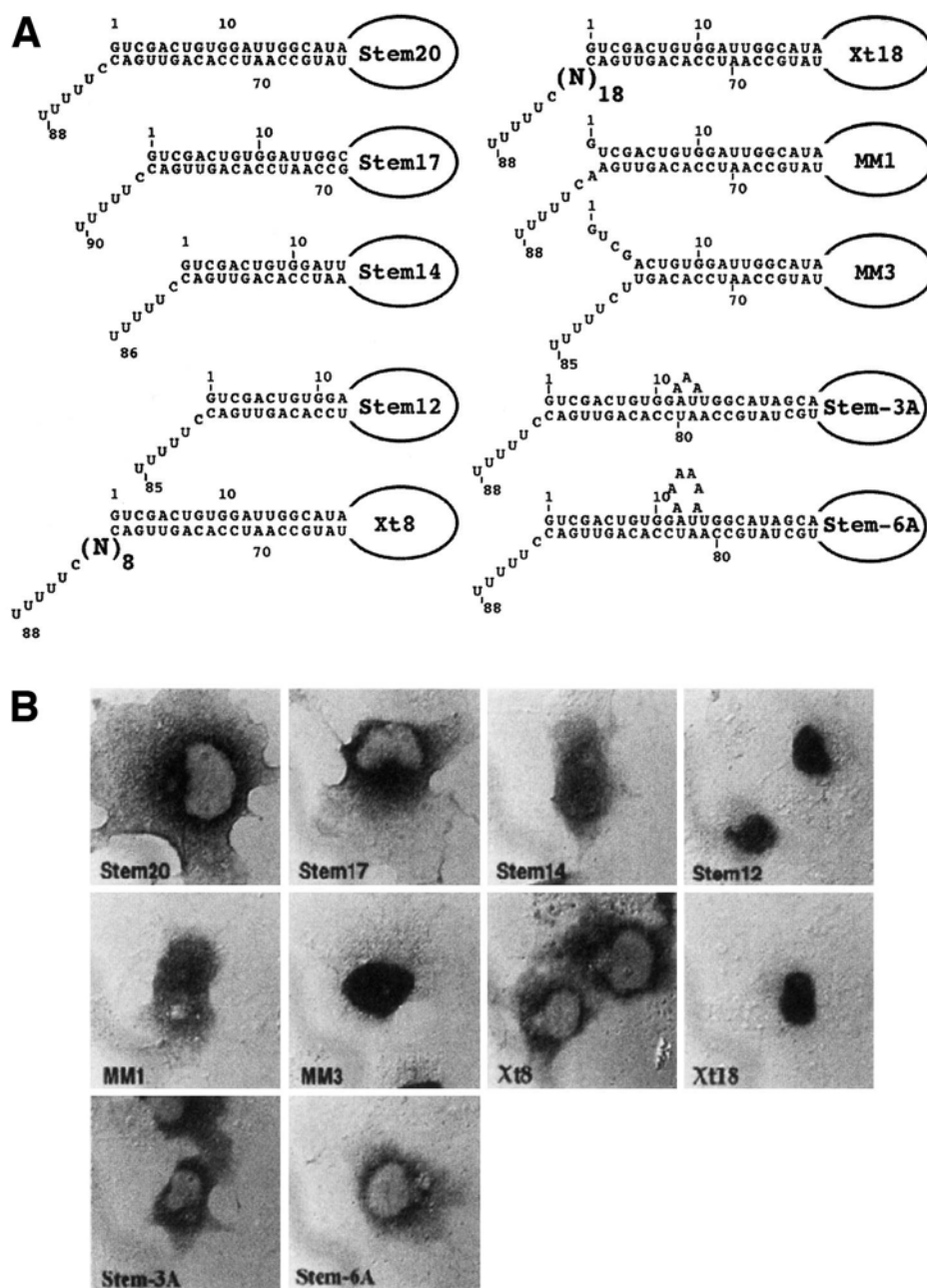


Figure 3: (A) Constructions artificielles de régions terminales double brin (les régions centrales et apicales de ces ARN étant identiques à l'ARN VA1) ; (B) Analyse de leur localisation intracellulaire par hybridation in situ dans les cellules COS.



La boucle schématise les régions centrales et apicales de l'ARN VA1 sauvage.

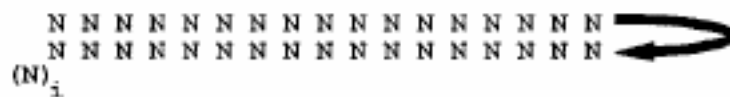
Question II-B : En analysant la localisation des mutants d'ARN VA1 comportant les régions terminales présentées dans la figure 3A et en les comparant aux régions terminales des mutants utilisés en figure 2, définissez les caractéristiques du domaine de l'ARN VA1 requis pour permettre l'export nucléaire de l'ARN VA1.

Réponse à la question II-B

Les mutants Stem20, Stem17, Xt8, Stem3A et Stem6A sont localisés dans le cytoplasme alors que les mutants Stem14, Stem12, MM1, MM3, et Xt18 sont localisés dans le noyau.

Ces observations démontrent qu'un appariement sur une distance de 17 nucléotides est suffisant pour assurer une localisation cytoplasmique (Stem17). Elles confirment également que la région 3, au contraire de la région 5 (MM1), peut être proéminente jusqu'à 14 nucléotides (Xt8) mais qu'une addition supplémentaire de 10 nucléotides bloque l'export (Xt18). Des boucles complémentaires ne perturbent pas nécessairement l'export (Stem6A).

La comparaison des séquences des régions terminales de la figure 2 et de la figure 3 est étonnante : il n'y a aucune homologie de séquence. Ainsi le motif reconnu par le mécanisme d'export de l'ARN VA1 ne comprend pas de séquence spécifique, mais requiert un segment terminal double brin d'au moins 17 nucléotides de long (14 nucléotides sont insuffisants).

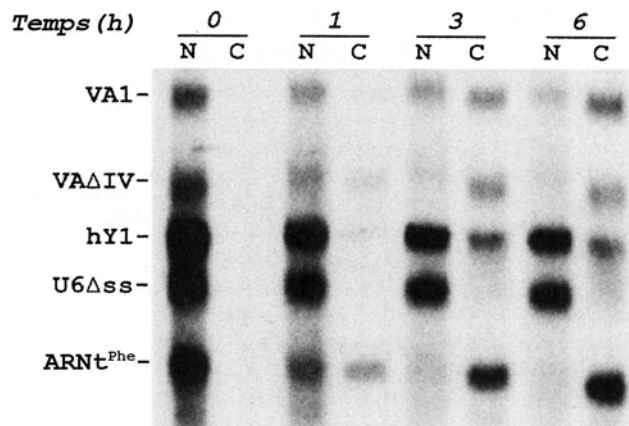


Terminal minihelix consensus

C - Cinétiques d'export nucléaire de différents ARN radiomarqués

Afin d'analyser la cinétique d'export des ARN VA1 une technique différente est utilisée. Les ARN VA1, VAΔIV, hY1, U6Δss, et ARNt-Phe sont radiomarqués et co-injectés dans des noyaux d'ovocytes de Xénope. À différents temps, les noyaux et le cytoplasme de ces ovocytes sont purifiés et leurs contenus en ARN analysés par autoradiographie après migration sur gel de polyacrylamide (**figure 4A**). Une deuxième série d'expériences est réalisée en présence d'ARN compétiteurs non radioactifs en excès pour analyser les voies d'export des différents ARN (**figure 4B**).

A



B

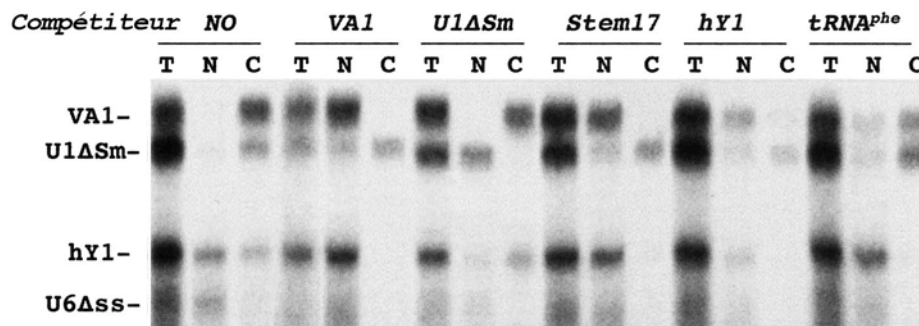


Figure 4 : (A) Analyse simultanée des cinétiques d'export nucléaire de différents ARN radiomarqués. Les temps utilisés sont 0, 1, 3 et 6 heures à 21°C. Les ARN injectés sont les ARN VA1, VAΔIV, hY1, U6ΔSS, et un ARNt de la phénylalanine. N = noyau, C =cytoplasme. (B) Analyse de l'export des ARN radioactifs en présence d'un large excès de différents ARN compétiteurs non radioactifs. L'incubation des ovocytes est de 3h à 21°C. T = ovocyte complet, N = noyau, C = cytoplasme. Les ARN radiomarqués injectés sont les ARN VA1, U1Δsm, hY1, et U6Δss. Les expériences sont réalisées en absence d'ARN compétiteur (NO), ou en présence d'ARN compétiteur en excès non radioactif (VA1, U1Δsm, Stem17, hY1 ou ARNt-Phe). Ces ARN compétiteurs sont co-injectés dans le noyau avec les ARN radiomarqués.

Question II-C-1 : Comparez les cinétiques d'export des différents ARN en figure 4A, sachant qu'après 6h il n'y a plus d'évolution de la répartition des ARN.

Réponse à la question II-C-1

L'ARN présentant la cinétique d'export nucléaire la plus rapide est l'ARNt-Phe (1h) suivi par VA1, VA Δ IV et hY1 à partir de 3 h. VA Δ IV étant un variant de VA1, il est logique que la cinétique d'export soit similaire pour ces deux ARN. Enfin vraisemblablement la localisation de l'ARN U6 Δ ss est nucléaire.

D'après la **figure 4B** répondez aux questions suivantes :

Question II-C-2 : Les mécanismes d'export des ARN VA1, U1 Δ sm, et hY1 sont-ils saturables ?

Réponse à la question II-C-2

Le fait que l'ajout des ARN VA1 non radioactifs bloque l'export de l'ARN VA1 démontre que le mécanisme d'export est saturable. Ce raisonnement est valable pour les ARN U1 Δ sm et les ARN hY1.

Question II-C-3 : La machinerie d'export de l'ARN VA1 est-elle la même que celle qui permet l'export de Stem17 ? Est-ce en accord avec les expériences précédentes (figure 3) ?

Réponse à la question II-C-3

L'ARN stem17 compétiteur bloque l'export des ARN radioactifs VA1 ce qui démontre que ces deux ARN entre en compétition pour le même mécanisme d'export. Ce résultat confirme les résultats de la figure 3, Stem17 comprenant la région minimale permettant l'export de l'ARN VA1.

Question II-C-4 : Les mécanismes d'export des ARN VA-1, U1 Δ sm, hY1 et ARNt-Phe sont-ils identiques ou différents ?

Réponse à la question II-C-4

L'ARN hY1 compétiteur inhibe l'export de l'ARN radioactif VA-1 et réciproquement : ces deux ARN utilisent vraisemblablement le même mécanisme d'export. En contraste l'ajout de l'ARN compétiteur U1 Δ sm n'a aucun effet sur l'export de l'ARN VA1 ce qui démontre que ces deux ARN utilisent des mécanismes d'export différents. Enfin l'ARNt-Phe compétiteur n'a aucun effet sur l'export ni de l'ARN radioactif VA1 ni de l'ARN radioactif U1Dsm. Ainsi cette expérience révèle l'existence d'au moins trois mécanismes différents d'export des ARN. Il est à noter que l'ARNt-Phe compétiteur inhibe l'export hY1 suggérant qu'une partie du mécanisme d'export est commune pour ces deux ARN.

D - Cinétiques d'export nucléaire de différents ARN radiomarqués en présence d'une GTPase

Ran est une petite GTPase associée soit au GTP soit au GDP. Ran-GTP est formée dans le noyau et la conversion en Ran-GDP se fait dans le cytoplasme. La Ran-GTPase (Rna1p), transformant Ran-GTP en Ran-GDP est cytoplasmique ou localisée aux pores nucléaires et requiert deux cofacteurs RanBP1 et RanBP2.

Afin d'étudier le rôle de la protéine Ran dans l'export des ARN, un mélange des ARN radioactifs U1 Δ sm, VA1, et ARNt-Phe est injecté dans le noyau des ovocytes avec soit seul, soit avec la protéine RanBP1 pour réduire la concentration nucléaire de Ran-GTP, ou avec la protéine Rna1P qui transforme totalement Ran-GTP nucléaire en Ran-GDP.

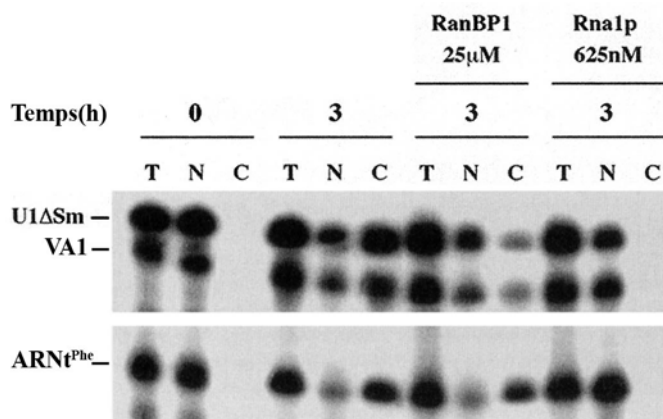


Figure 5 : Analyse simultanée des cinétiques d'export nucléaire de différents ARN radiomarqués en présence de protéines perturbant la protéine Ran-GTP nucléaire. Les temps d'incubation des ovocytes injectés sont 0 et 3h à 21°C. Les ARN injectés sont U1 Δ Sm, VA1 et l'ARNt-Phe. T= ovocyte complet, N= noyau, C=cytoplasme. Les protéines co-injectées sont RanBP1 ou Rna1P.

Question II-D-1 : Ran joue-t-elle un rôle dans l'export de tous les ARN injectés ?

Réponse à la question II-D-1

Oui, la déplétion nucléaire en Ran-GTP abolit l'export de tous les ARN étudiés. Ran-GTP semble être un composé ubiquitaire essentiel pour le transport des ARN étudiés. (Ran est également connu pour jouer un rôle dans le trafic nucléocytoplasmique des protéines)

Question II-D-2 : Le rôle de Ran est-il similaire pour ces différents ARN ?

Réponse à la question II-D-2

L'injection des trois protéines perturbant l'activité de Ran provoque les mêmes effets sur l'export des ARN U1 Δ Sm et VA1V suggérant que le rôle de Ran est identique pour ces deux ARN. Le rôle pourrait être différent pour l'export de l'ARNt-Phénylalanine (effet différentiel de RanBP1).

E- Analyse du rôle de l'exportine 5 dans l'export nucléaire des ARN

Les exportines sont des protéines impliquées dans les transports nucléocytoplasmiques et l'étude du rôle de l'exportine 5 dans l'export nucléaire des ARN est présentée ci-dessous.

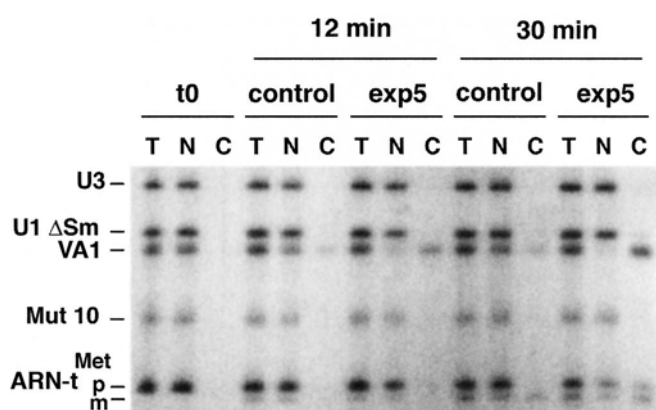


Figure 6 : Analyse simultanée des cinétiques d'export nucléaire de différents ARN radiomarqués en présence ou en absence d'exportine 5. Les temps d'incubation des ovocytes injectés sont 0, 12 et 30 min à 21°C. Les ARN injectés sont U3, U1 Δ Sm, VA1, Mut10 et l'ARNt de la méthionine (ARNt-Met, p = précurseur, m = forme mature). T = ovocyte complet, N = noyau, C = cytoplasme. La protéine co-injectée est l'exportine 5.

Question II-E-1 : Décrivez le rôle de l'exportine 5 sur l'export des ARN U3, U1 Δ Sm, VA1, Mut10 et l'ARNt de la méthionine.

Réponse à la question II-E-1

L'exportine 5 accélère spécifiquement l'export de l'ARN VA1. (éventuellement l'exportine 5 exerce un effet sur l'export du précurseur de l'ARNt-Met). L'exportine 5 ferait partie des éléments limitant l'export et conduisant à la saturation observée en figure 4.

Afin d'élucider plus avant le mécanisme d'export de l'ARN VA1 des expériences de gel retard sont réalisées en présence d'ARN VA1 et de différentes combinaisons des protéines Ran-GTP, Ran-GDP et exportine 5.

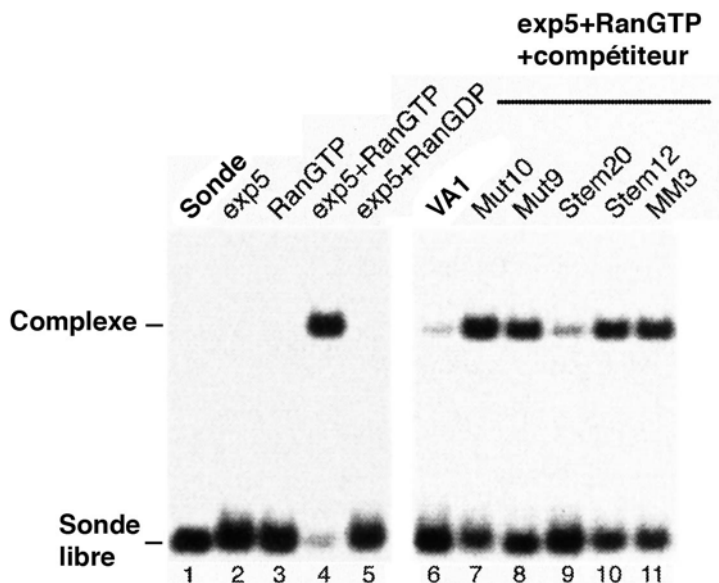


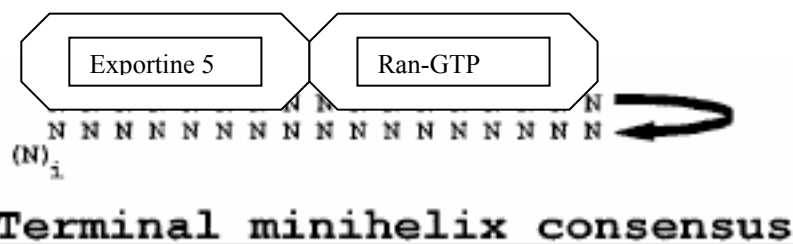
Figure 7 : Analyse des interactions entre l'ARN VA1 radioactif, et les protéines recombinantes Ran et l'exportine 5.

L'ARN VA1 radioactif est incubé seul (1) sonde, ou en présence (2) d'exportine 5, (3) de Ran-GTP, (4) de Ran-GTP + exportine5, et (5) de Ran-GDP + exportine 5. Les canaux 6 à 11 correspondent à l'incubation réalisée en (4) en présence de différents ARN compétiteurs non radioactifs en excès : VA1 (6), Mut10 (7), Mut9 (8), Stem20 (9), Stem12 (10), MM3 (11). Mut9 diffère de Mut10 par délétion d'un nucléotide. Les incubations sont de 25 min puis les échantillons sont soumis à électrophorèse sur gel de polyacrylamide non-dénaturant (gel retard). L'autoradiographie du gel permet d'identifier deux bandes, l'ARN VA1 seul (sonde libre) et une bande correspondant au complexe protéine-ARN VA1 (complexe)

Question E-2 : Quelle est la nature des interactions entre les protéines Ran, exportine 5 et l'ARN VA1 ?

Réponse à la question II-E-2

Le seul complexe obtenu est un complexe ternaire contenant l'ARN VA1, Ran-GTP et l'exportine 5. Les expériences réalisées avec les ARN compétiteurs démontrent que les protéines exportine 5 et Ran-GTP interagissent spécifiquement avec la région terminale de l'ARN VA1 et la formation du complexe requiert le motif consensus défini précédemment. En effet, seuls les ARN possédant la région terminale (VA1, Stem20) entre en compétition avec l'ARN VA1 radiomarqué. Ce modèle est compatible avec la localisation nucléaire de Ran-GTP.



F - Analyse de l'export nucléaire du micro-ARN mi-R-30

Les micro-ARN sont initialement exprimés sous forme de transcrits nucléaires (pri-miRNA). Ils sont ensuite maturés dans le noyau et sont transformés en structures en épingle à cheveux de 65 nucléotides de long (pre-miRNA) qui sont exportés dans le cytoplasme avant de poursuivre leur maturation en micro-ARN double brin de 22 nucléotides de long (mi-RNA). L'export du micro-ARN mi-R-30 est étudié dans des cellules COS en absence ou en présence d'exportine 5. Dans ces expériences, l'expression de l'exportine 5 est inhibée de façon totale par des siARN (siExp5).

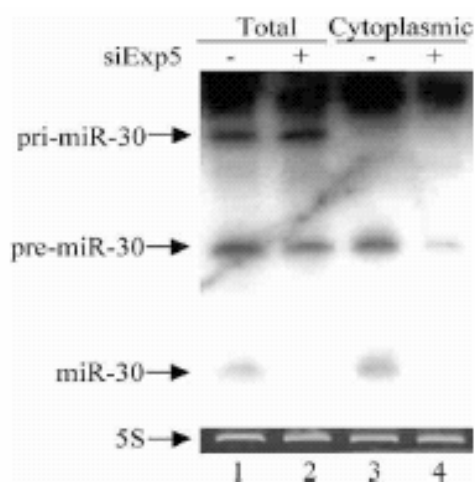


Figure 8 : Analyse de l'export du micro ARN mi-R-30.

Les cellules Cos sont transfectées par un vecteur contrôle (-) ou par un vecteur codant des siARN de l'exportine 5 (siExp5) (+). Elles sont également cotransfectées par un plasmide codant pour l'ARN mi-R-30. Après 36 h de culture, les ARN totaux et cytoplasmiques sont isolés et soumis à une analyse par Northern blot permettant de détecter les différentes formes de l'ARN mi-R-30. L'ARN ribosomal 5S permet de contrôler les quantités d'ARN utilisées pour chaque échantillon.

Question II-F-1 : Décrivez le rôle de l'exportine 5 sur l'export de l'ARN mi-R-30.

Réponse à la question II-F-1

La disparition de l'exportine 5 n'exerce aucun effet sur la localisation du pri-mi-ARN (nucléaire), mais induit une diminution majeure du pre-mi-ARN dans le cytoplasme ainsi que la disparition complète du mi-ARN dans le cytoplasme. L'exportine 5 est donc impliquée dans l'export du pre-mi-ARN qui ne peut donc être maturé en micro-ARN.

Question II-F-2 : Sachant que les résultats seraient identiques pour tous les mi-ARN, et en tenant compte de la réponse à la question II-B, quelles conclusions en tirez-vous ?

Réponse à la question II-F-2

Le mécanisme d'export identifié pour l'ARN VA1 est le mécanisme général d'export des micro-ARN. Le fait que la région terminale requise pour l'export ne soit pas séquence spécifique est essentiel pour que l'ensemble des micro-ARN utilise ce mécanisme. En effet, la diversité de séquence des micro-ARN est nécessaire pour que chaque micro-ARN agisse spécifiquement sur ses cibles (donnée de la littérature).

Nom :

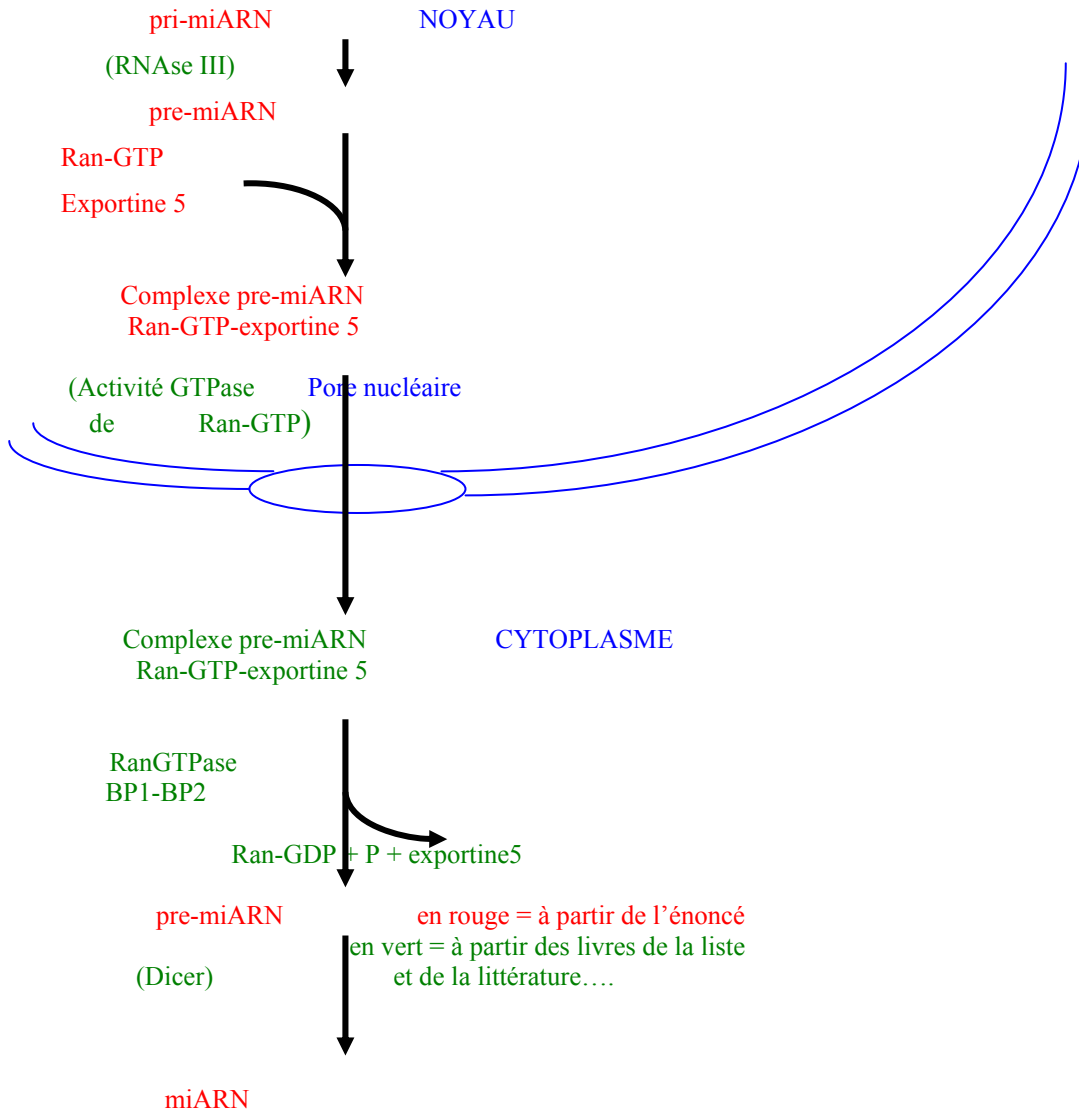
Prénom :

salle n° :

Question II-F-3 : Établir un schéma récapitulatif de l'export nucléaire des micro-ARN.

Réponse à la question II-F-3

Schéma récapitulatif



Le modèle actuel est que chaque grande classe d'ARN (ribosomaux, ARN-t, ARNm etc.) possède une machinerie d'export nucléaire particulière...

Tiré de Gwizdek et al., J. Biol. Chem. 2001 et 2003, et Yi et al., Genes Dev 2003

Commentaires de l'épreuve de TP de spécialité – secteur B

Cette épreuve de travaux pratiques autour du thème de la mare avait pour ambition de tester les candidats sur une diversité de compétences (coupes, montages, dissection, analyses comparatives, conception et réalisation d'expérience comportementale etc.). Nous souhaitons aussi mettre en valeur les candidats ayant du sens pratique, des connaissances naturalistes mais avant tout de la curiosité pour le monde vivant ainsi que de la créativité, qualités que nous pensons essentielles pour de futurs enseignants. Pour cela nous nous sommes attachés à poser des questions laissant une part importante à l'initiative des candidats. Pensant que la biologie des organismes ne consiste pas seulement en l'analyse d'organismes morts, nous nous sommes aussi attachés à présenter aux candidats à la fois des échantillons morts (pour les coupes et les dissections et montages) et des échantillons vivants avec comme objectif de stimuler leur capacité d'observation d'organismes tels qu'ils peuvent être amenés à les rencontrer dans leur milieu de vie. Enfin, par delà l'épreuve de l'agrégation nous souhaitons que les activités proposées dans ce TP puissent aussi donner quelques pistes d'activités pouvant être réinvesties en classe. A cette fin nous nous sommes attachés à ne présenter que du matériel biologique simple et commun que n'importe quel enseignant peut collecter facilement et maintenir en élevage dans sa classe. Les activités proposées ne nécessitent l'achat d'aucun matériel particulier et peuvent être facilement et à moindre coût faites en classe. Un élevage de limnées facilement maintenu en fond de classe peut permettre d'alimenter de nombreux TP sur la respiration, le rythme cardiaque, le développement embryonnaire, la croissance, l'alimentation et la reproduction par exemple. De même des aselles, des gammarus et des cloportes peuvent être facilement maintenus dans des élevages et utilisés lors d'activités pédagogiques. Nous avons essayé de montrer qu'il est possible d'allier cette simplicité du matériel avec des questions biologiques que nous avons toujours replacées dans un contexte écologique et évolutif. Plusieurs exercices laissaient aux candidats une certaine liberté quant aux réponses qu'ils pouvaient proposer (observation des espèces et construction d'une matrice de caractères, mise en place et réalisation d'un protocole expérimental).

Partie I : Comparaison de trois végétaux aquatiques

Il s'agissait de réaliser trois coupes transversales dans les axes caulinaires de trois hydrophytes, *Ceratophyllum* (A), *Chara* (B) et *Myriophyllum* (C). L'analyse anatomique des tissus permettait de dégager les caractères autorisant leur classification dans une phylogénie d'une branche de la lignée verte. Finalement une étude comparée morpho-anatomique des trois échantillons permettait de conclure à la fois aux convergences évolutives associées à leur adaptation au milieu aquatique ainsi qu'à leurs différences expliquées en partie par des contraintes phylogénétiques.

Question I-1

Bien qu'il soit délicat de couper des hydrophytes contenant très peu de tissus durs, de très nombreuses coupes étaient excellentes. Les mauvaises préparations étaient associées à des coupes épaisses, non vidées ou encore trop biseautées. Certains candidats ont légèrement bougé leurs lamelles au moment de la présentation ce qui a induit une rotation de leur coupe (notamment de *Chara*) et donc une observation de côté, rendant l'interprétation bien délicate.

Cependant malgré la qualité très satisfaisante de la majorité des coupes, l'adéquation entre les observations et les dessins s'est avérée très faible. Cette mauvaise adéquation s'explique en partie par :

- un effort d'observation très insuffisant ;
- l'invention de tissus (xylème & phloème) organisés comme dans une tige d'angiosperme théorique ;
- un remplissage cellulaire homogène (les « petits ronds ») donc impropre à faire ressortir les différentes formes de cellules, les différentes épaisseurs de paroi ou encore les différentes dispositions des cellules les unes par rapport aux autres, autant de critères pourtant essentiels dans l'identification des tissus.

Les candidats qui ont obtenu une bonne note finale n'avaient d'ailleurs pas forcément réalisé un travail technique de qualité mais avaient vraiment investi dans l'étude de leur matériel pour conclure à l'identification des différents tissus en repérant notamment :

- *Myriophyllum* : sens de différenciation du xylème (caractère de tige) ; superposition xylème et phloème en faisceau criblovasculaires (caractère de tige) + phloème en assise ; endoderme à cadre
- *Ceratophyllum* : méats dans le parenchyme cortical, distribution pluricyclique du phloème (caractère qui le rapproche des monocotylédones), cellules compagnes des tubes criblés du phloème
- *Chara* : grosse cellule centrale identifiable par sa paroi continue. Différences d'épaisseur des parois des cellules périphériques...

Les principales erreurs de reconnaissance des tissus concernent l'identification et la fonction des lacunes aérifères identifiées comme des lacunes aquifères permettant donc de conduire l'eau dans l'ensemble du végétal.

De manière plus générale dans la présentation d'un dessin, il est surprenant de constater que les titres et échelles ne sont pas encore des automatismes chez les futurs enseignants. Outre des erreurs grossières dans les échelles, il semble encore utile de préciser que les grossissements (multiplication des grossissements des oculaires) ne sont pas informatifs comme le dessin n'est pas à l'échelle de l'observation visuelle. Une barre mesurée permettant rapidement de mesurer la taille de l'organe dessiné remplit la fonction d'échelle.

Question I-2

Seules quelques rares copies n'ont pas utilisé les emplacements prévus pour positionner les lettres des différents échantillons. Si la majorité des candidats (54%) a su replacer correctement les trois échantillons dans la phylogénie, très peu (10%) ont justifié correctement leur choix, et obtenu plus de la moitié des points dans la justification.

Question I-3

Cette question proposait de synthétiser les résultats des observations morpho-anatomiques et des positions phylogénétiques.

De nombreux candidats ont confondu cette question avec la justification du choix de la position phylogénétique de la question précédente. Si cette question a été très mal réussie par les candidats (moyenne de 3.04/16), elle a été aussi très discriminante puisque les notes s'échelonnent de 0 à 14/16.

Il est surprenant que seule une infime partie des candidats ait présenté la réponse sous la forme d'un tableau, alors que la question portait sur la comparaison des échantillons. Ainsi, seules quelques rares excellentes copies ont pu réellement démontrer que bon nombre de caractères observés (phyllotaxie verticillée, absence de cuticule, régression des éléments conducteurs, lacunes aérifères) représentaient des convergences évolutives à savoir des phénotypes ressemblants sélectionnés par des contraintes similaires du milieu aquatique d'eau douce chez des espèces phylogénétiquement distantes. Ces mêmes copies ont bien su associer aux caractères mis en évidence, les fonctions biologiques dont ils étaient les supports :

- absence de cuticule et absorption par la totalité de l'appareil végétatif

- régression de la différenciation xylémienne en lien avec le relâchement de la pression de sélection sur le port et la conduction
- phyllotaxie verticillée et équitabilité de l'exposition des feuilles à la lumière, en lien avec les mouvements imprévisibles dans l'eau
- lacunes aérifères et méats : flottabilité et portance ainsi que conduction des gaz dans les parties immergées (photosynthèse et respiration)

En définitive, cet exercice relativement mal réussi dans l'ensemble (moyenne de 6.7/20, 1.5-14.3), a été l'occasion de constater que la démarche d'observation et sa traduction sous la forme de dessins fidèles peut être très largement à améliorer.

Partie II : Étude comparative de quatre crustacés

Cette partie avait pour objectif d'amener le candidat à préciser les relations d'apparentement de deux espèces de crustacés d'eau douce *Asellus* et *Gammarus* par rapport à un isopode commun dans la litière et sur les bois morts, le Cloporte *Oniscus asellus* et en utilisant comme groupe externe la crevette grise présente dans toutes les poissonneries. Nous pensions que cette étude permettrait aux candidats de démontrer l'apparentement du cloporte et de l'aselle, tous deux appartenant au groupe monophylétique des isopodes. Pour cela, nous avons fait prélever la maxillule de la crevette afin que le candidat puisse comparer sa morphologie biramée aux maxillules des trois autres espèces : une des synapomorphies des isopodes étant la présence d'une maxillule uniramée.

Les candidats étaient ensuite invités à comparer les appendices abdominaux et thoraciques des quatre espèces. Il s'agissait de montrer l'existence d'appendices abdominaux (péréiopodes) uniramés et sensiblement identiques pour cloporte et aselle, tandis que chez ces deux espèces les appendices abdominaux (pléopodes) sont constitués d'appendices biramés non locomoteurs dont l'exopodite est aplati en forme d'une lame jouant un rôle dans la respiration. Malheureusement, bien peu de candidats ont pu localiser la partie abdominale (pléon) de ces deux malheureuses bêtes... Pour les deux autres crustacés, les appendices thoraciques, bien que de formes diverses, étaient formés d'un exopodite mobile (locomoteur ou préhenseur) et d'un endopodite aplati en lame branchiale) tandis que les appendices abdominaux formaient des appendices biramés assez symétriques sans rôle locomoteur. Cette partie a été globalement mal traitée. Quasiment aucun candidat ne s'est servi des organismes vivants à sa disposition pour préciser et justifier des rôles attribués à chaque appendice.

La construction de la matrice aurait pu se baser sur les caractères précédents, sur le sens d'aplatissement du corps, et d'autres caractères anatomiques (nombre d'antennes) etc... Plus de la moitié des candidats n'a pas traité cette partie. Les matrices de caractères ont été réalisées dans la plupart des cas, mais très généralement celles-ci ont servi à illustrer un arbre dont la topologie n'est pas justifiée par l'analyse. Seuls deux candidats ont proposé plusieurs arbres et ont choisi le plus parcimonieux.

Partie III : Étude de la respiration de la Limnée

1 & 2) Cette partie commence par l'observation des différentes phases de la respiration pulmonaire de la limnée, observation qui est complétée par la dissection du poumon de limnée.

Dans de trop nombreuses copies l'analyse se résume à l'observation d'une remontée en surface de la limnée puis de sa redescende. La prise d'air en surface, si elle est supposée, n'est presque jamais décrite de façon précise. Un raisonnement scientifique pertinent ne peut être mené qu'après une description et une analyse exhaustive des faits / événements / structures à observer.

3) Cette double mise en évidence de la respiration pulmonaire est suivie d'un exercice permettant de préciser les modalités de cette respiration et de voir que la respiration pulmonaire est associée à une respiration cutanée. Cet exercice a été souvent traité de façon superficielle, les candidats se limitant à décrire les graphes de manière globalement correcte, mais sans réellement mener d'analyse ni d'interprétation. Il est regrettable qu'aucun candidat n'ait relevé que d'autres données pourraient être nécessaires pour proposer des interprétations plus solidement fondées.

4) la dissection du collier nerveux a été globalement réussie par les candidats qui s'y sont risqués.

5) Les caractéristiques de la ponte et leurs significations écologiques ont été globalement bien traitées par les candidats.

6) Peu de candidats ont réalisés des observations précises des divers stades embryonnaires associés à de réels dessins d'observation. Une majorité des candidats (~90%) sont passés à côté du stade larve véligère.

7) De nombreux candidats n'ont pas réalisé cette partie. La plupart a présenté un protocole sans réaliser l'expérience. Très peu de copies ont proposé des quantifications des résultats de leur expérience (répétition, calcul de moyenne etc.). On peut noter que plusieurs candidats ont trempé les oeufs dans de la potasse... et ils ont pu à juste titre constater l'arrêt de l'activité cardiaque de leurs malheureux embryons...

Partie IV : Étude du comportement antiprédateur de la Limnée

Cette partie visait à tester l'aptitude des candidats à analyser et interpréter des documents, pour construire un raisonnement scientifique. Hormis quelques candidats qui n'ont absolument pas traité cette partie, deux types de stratégies ont été observés: celle des candidats qui ont passé un temps inconsideré à paraphraser les documents et à fournir des interprétations plus ou moins spéculatives et celle des candidats qui ont abordé cette partie dans l'urgence et n'ont donc donné que des réponses très superficielles et partielles. Pour les candidats qui ont abordé cette partie, les notes s'échelonnent de 0.5 à 17/25. L'interprétation des documents devait faire appel à des notions telles que celles de pression de sélection, adaptation locale, plasticité phénotypique, signaux etc qui sont très généralement mal maîtrisées voire totalement ignorées.

Une deuxième difficulté découle du fait que la grande majorité des candidats ne lit pas en détail l'énoncé, ni les légendes des graphiques, ce qui ne peut conduire qu'à des interprétations erronées. Par exemple, la question IV.5 a souvent donné lieu à des réponses fantaisistes, car beaucoup de candidats ont pensé qu'il s'agissait de tests *in natura* et non d'expériences similaires à celles décrites précédemment. Trop de candidats se contentent de paraphraser les documents, sans raisonner sur leur pertinence et sans proposer d'hypothèses explicatives. De plus, le style est souvent si confus qu'il est difficile de comprendre ce que le candidat souhaite exprimer. En particulier, la question IV.4, au sujet d'un protocole qui impliquait un traitement préalable à l'expérience, a généralement conduit les candidats à répondre d'une façon si peu claire qu'il leur a été impossible de proposer une interprétation. Il est donc fortement conseillé aux candidats de s'entraîner à rédiger dans un style clair et concis.

Le peu de réponses données à la question IV.8 appelle des doutes quant à l'esprit critique des candidats. De plus la naïveté ou l'irréalisme des réponses (notamment pour la question IV.8) nous semblent révéler des lacunes dans l'esprit pratique ou la culture scientifique.

Partie V : Reconnaissances raisonnées

Cette partie comportait trois épreuves de reconnaissances.

1) La première consistait à reconnaître quatre sons. Nous avons choisi pour cela quatre sons bien identifiables d'espèces communes que les candidats ont très probablement eu l'occasion d'entendre. Nous souhaitions ainsi valoriser les candidats qui ont pris la peine d'aller faire un peu de terrain et qui surtout sans être forcément des naturalistes chevronnés, se posent simplement la question de connaître l'origine des sons qu'ils entendent autour d'eux. Le cri du martinet était pour nous emblématiques puisqu'il était possible de les entendre et les voir passer devant les fenêtres des salles de TP pendant l'épreuve. On peut difficilement échapper au chant d'un merle (même en centre ville) et au cri du pic vert si l'on met le nez dehors... Ainsi, cette épreuve n'avait pas comme objectif de sélectionner les candidats sur des connaissances naturalistes spécialisées, mais de valoriser ceux d'entre-eux ayant un minimum de curiosité pour les êtres vivants dans leur environnement. Un certain nombre de candidats possédait effectivement la culture naturaliste permettant d'identifier ces espèces animales peuplant des milieux naturels ou urbains qui nous sont proches et devraient nous être familiers.

A notre grande surprise, d'autres ont cherché la complication avec, dans les réponses proposées, des espèces plus ou moins exotiques (rhinocéros, hippopotame, buffle, dromadaire, lémurien ou oiseau-lyre), dont l'identification sonore peut rester du ressort de spécialistes.

Plus étonnante peut-être est la méconnaissance d'espèces aussi communes que le cochon ou la vache, qui a amené certains à croire les reconnaître parmi les sons proposés. Dans le même esprit, on constate d'autres lacunes, lorsque le cerf élaphe, correctement identifié par ailleurs, est présenté comme une espèce de la taïga ou des plaines froides canadiennes, plutôt que comme un hôte de nos forêts.

Pour finir, on voudrait croire que les réponses suivantes, proposées par certains candidats, ne soient que des lapsus :

Le chant du merle, peut-être à cause de l'impression de bavardage qu'il dégageait, a poussé à l'identifier comme celui d'un martin-prêcheur. La rainette est devenue une sauterelle, tandis que cet Amphibien était situé dans le groupe des Anomoures. Les remarques concernant l'écologie des espèces identifiées ne sont pas en reste avec ce curieux comportement attribué à l'ours, confondu avec le cerf, de « laisser ses petits à la taverne » !

Martinet noir : Hirondelle, mésange

Pic vert :

Rainette verte : Sauterelle, Canard

Merle noir : martin prêcheur

Cerf elaphe : sanglier, ours,

2) La seconde épreuve de reconnaissance consistait à décrire quatre milieux et à associer des espèces (nommées) à ces milieux. On pouvait reconnaître des milieux classiques (arrière dune, relief karstique, forêt tropicale humide, prairie humide avec lac en cours de fermeture). Chaque photo comportait assez d'indices pour être identifiable (*Ephedra*, *Lagurus* – doline; *Lapiaz* – fougère arborescente – lac, bouleau...). Une série d'espèces devait être replacée dans chaque milieu. Parmi celles-ci, se trouvaient des espèces que les candidats sont amenés à rencontrer dans leur cours (*Psilotum*, *Angrecum* ...). D'autres qu'ils peuvent reconnaître comme n'appartenant pas à la faune européenne (Tenec). Cette épreuve avait comme objectif de favoriser les candidats qui sont allés faire un peu de terrain, qui ont pris l'habitude d'observer des milieux et des associations végétales, ainsi que les candidats qui savent observer les détails d'une image et procéder avec logique.

Cet exercice était encore l'occasion de tester les qualités d'observation des candidats, compétence nécessaire en sciences de la vie, et le jury a par exemple apprécié la reconnaissance du caractère tropical du deuxième milieu proposé sur la base de l'identification de fougères arborescentes bien visibles en bas de la photographie.

On signalera toutefois, au sujet de certains arbres colonisant la mare visible sur la troisième photographie, qu'il s'agissait de bouleaux et non de « boulots » !

3) La dernière épreuve était l'épreuve classique de détermination de 20 échantillons. Nous avons fait un effort pour montrer du matériel vivant (Sangsue, planaire, planorbe, Podura) en espérant que les candidats pourraient enrichir leur description et leur analyse en observant les comportements des animaux et leur morphologie hors alcool. Nous espérons que cela poussera aussi nos futurs enseignants à montrer du matériel vivant à leurs élèves.

Le matériel présenté était à nouveau des espèces communes que l'on peut trouver dans ou à proximité de la mare.

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

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2008

TRAVAUX PRATIQUES DE SPECIALITÉ DU SECTEUR B

Durée totale : 6 heures

La mare : ***quelques aspects biologiques, écologiques et évolutifs***

Ce sujet comporte cinq parties indépendantes :

- | | |
|--|---------------------------|
| ❖ Partie I : Comparaison de trois végétaux aquatiques. | p. 3 |
| ○ Durée conseillée : 50min | 20 points |
| ❖ Partie II : Étude comparative de quatre crustacés | p. 6 |
| ○ Durée conseillée : 1h30 | 32 points |
| ❖ Partie III : Étude de la respiration de la Limnée | p. 12 |
| ○ Durée conseillée : 1h50 | 45 points |
| ❖ Partie IV : Étude du comportement antiprédateur de la Limnée | p. 20 |
| ○ Durée conseillée : 50min | 25 points |
| ❖ Partie V : Reconnaissances raisonnées | p. 25 |
| ○ Durée maximale : 40min | 28 points |
| | <i>Total : 150 points</i> |

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

N'oubliez pas d'appeler les correcteurs pour vérifier préparations et dessins lorsque cela est demandé.

AVANT DE RENDRE VOTRE COPIE, VÉRIFIEZ QUE VOUS AVEZ BIEN INDIQUÉ VOS NOM, PRÉNOM ET NUMÉRO DE SALLE EN TÊTE DE CHAQUE FEUILLE, ET QUE LES 27 PAGES SONT PRÉSENTÉS.

Matériel fourni

- Réactifs chimiques et divers produits à votre disposition : eau acétique, carmin aluné, vert d'iode, eau de javel diluée, eau distillée, eau bouillie, potasse.
- À disposition dans la salle : vernis à ongle transparent, ruban adhésif transparent, parafilm.
- Verrerie : lames, lamelles, verres de montre, boîtes transparentes.
- Microscope, loupe binoculaire, lampe, pipette.
- Matériel biologique :

Vous avez à votre disposition un bocal comportant la totalité des espèces sur lesquelles vous serez amenés à travailler. Des échantillons conservés dans de l'alcool vous seront également fournis.

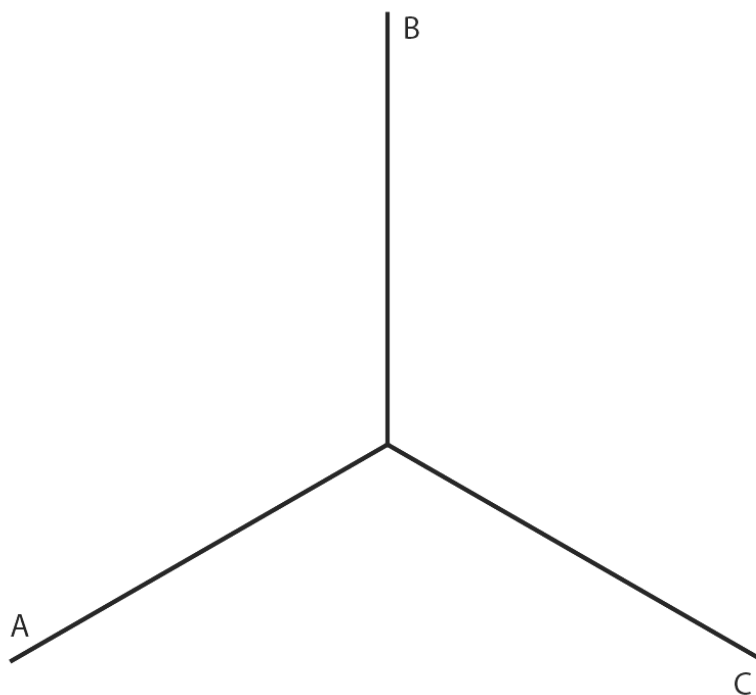
Nous vous invitons à observer le comportement respiratoire de la Limnée au cours de la séance (cf. Question III.1).

I Comparaison de trois végétaux aquatiques.

Question I.1 Réalisation et montage de coupes histologiques. Vous réaliserez une coupe transversale de l'axe de chacun des trois échantillons (A, B, C). Vous réaliserez ensuite une coloration, un montage et un lutage au vernis à ongle de ces coupes sur une même lame (avec une ou plusieurs lamelles). Vous noterez au crayon votre numéro de candidat sur la plage dépolie de la lame et vous protégerez cette notation avec du ruban adhésif transparent. Les lames seront ramassées en fin de séance. Vous réaliserez un dessin d'observation annoté de ces trois coupes dans le cadre ci-dessous.

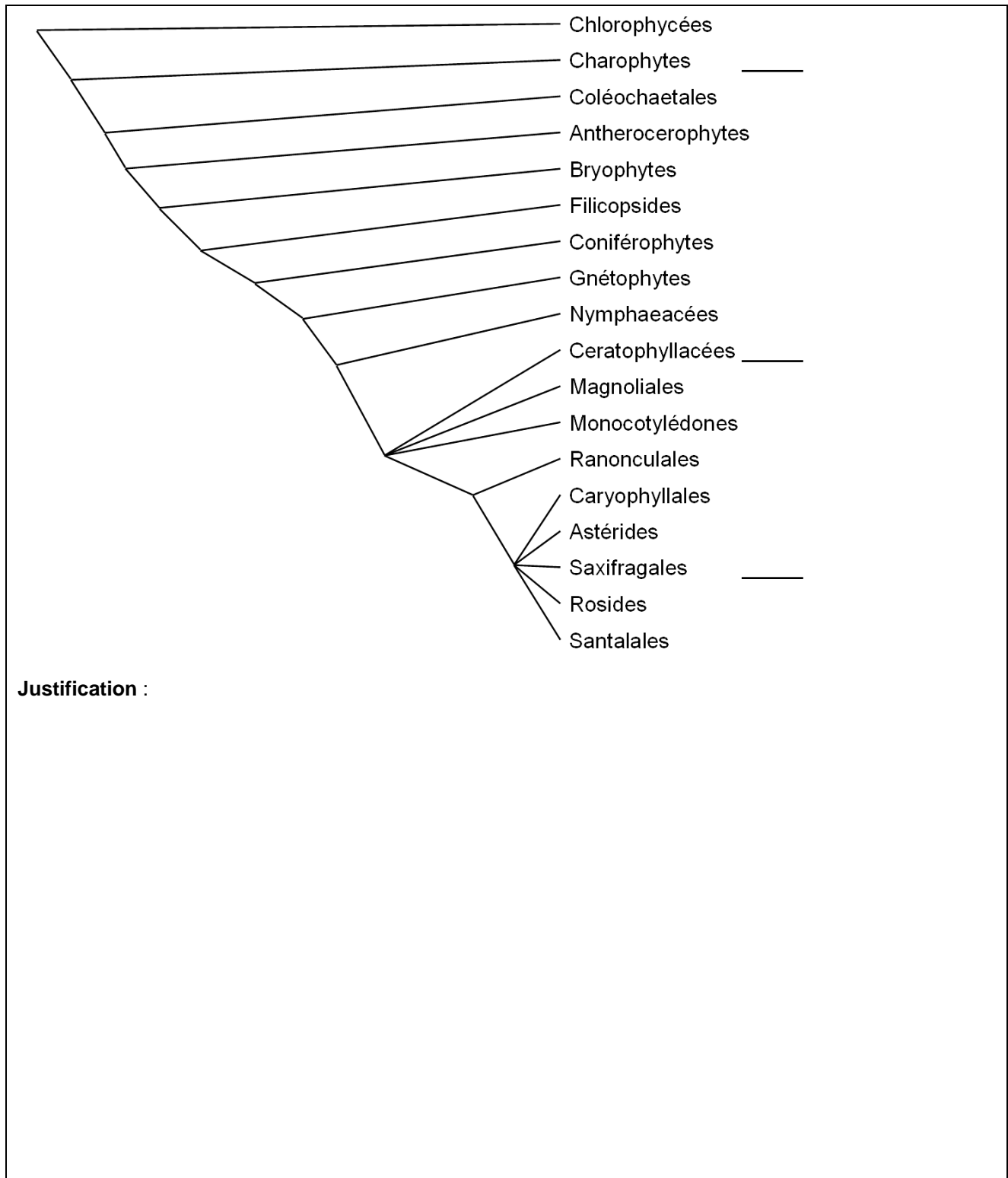
En cours de séance, appelez un examinateur afin qu'il évalue la qualité de vos préparations microscopiques et l'adéquation de celles-ci avec vos dessins d'observation.

Réponse à la question I.1 Dessin d'observation annoté



Question 1.2 Étude phylogénétique. Replacez chacun des trois échantillons sur une des trois lignes de l'arbre phylogénétique ci-dessous. Justifiez votre choix, en l'argumentant à partir des observations que vous avez effectuées.

Réponse à la question 1.2



Question 1.3 Étude éco-évolutive. En vous appuyant sur les observations anatomiques et l'étude phylogénétique précédentes, ainsi que sur des observations morphologiques de vos échantillons, interprétez, dans une perspective écologique et évolutive, les ressemblances et les différences mises en évidence.

Réponse à la question 1.3

II Étude comparative de quatre crustacés

Vous disposez des échantillons de quatre espèces de crustacés. A, B, C, D.

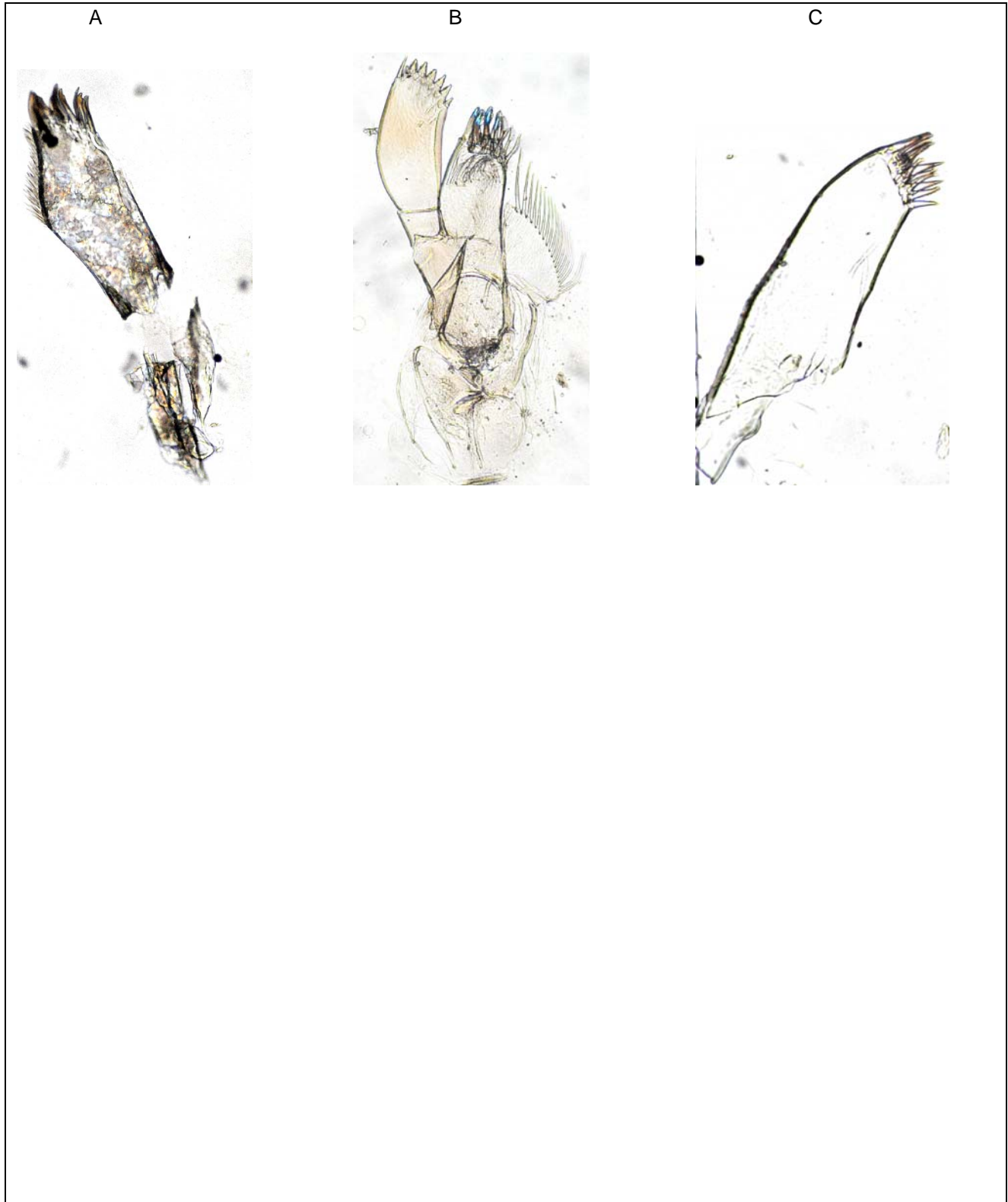
Question II.1 Prélèvement et observation de la maxillule. Prélevez la maxillule (= premier maxille) de l'espèce D. Laissez-la tremper quelques minutes dans un verre de montre dans lequel vous avez mis de l'eau et dissous un cachet de potasse afin d'éclaircir l'appendice. Rincez-la puis montez-la entre lame et lamelle. Faites un dessin annoté de cet appendice.

Appelez un examinateur afin qu'il évalue la qualité de votre montage.

Réponse à la question II.1

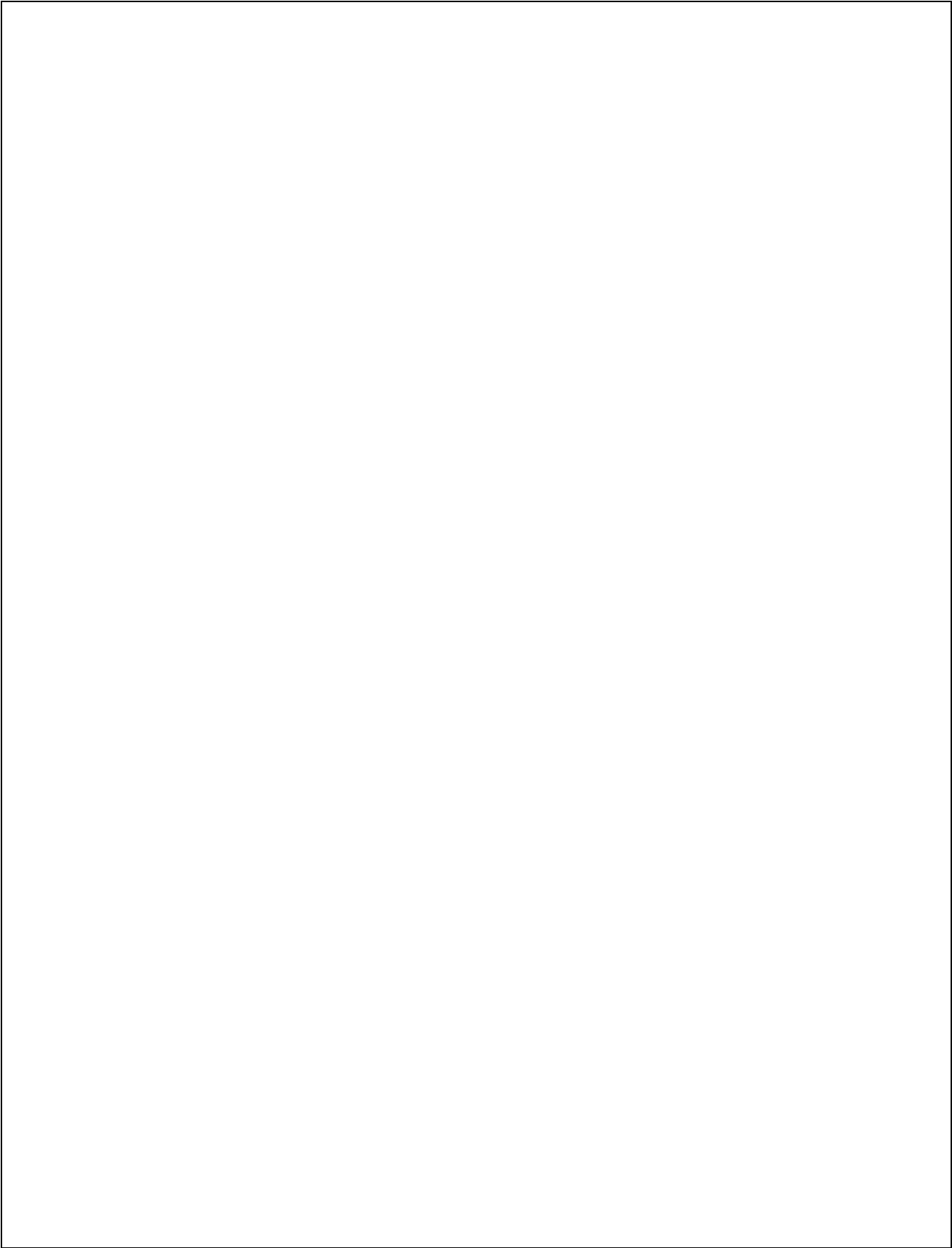
Question II.2 Comparaison des maxillules. En vous appuyant sur votre observation précédente et sur les documents ci-dessous (que vous légenderez), comparez les maxillules des quatre espèces.

Maxillules des espèces



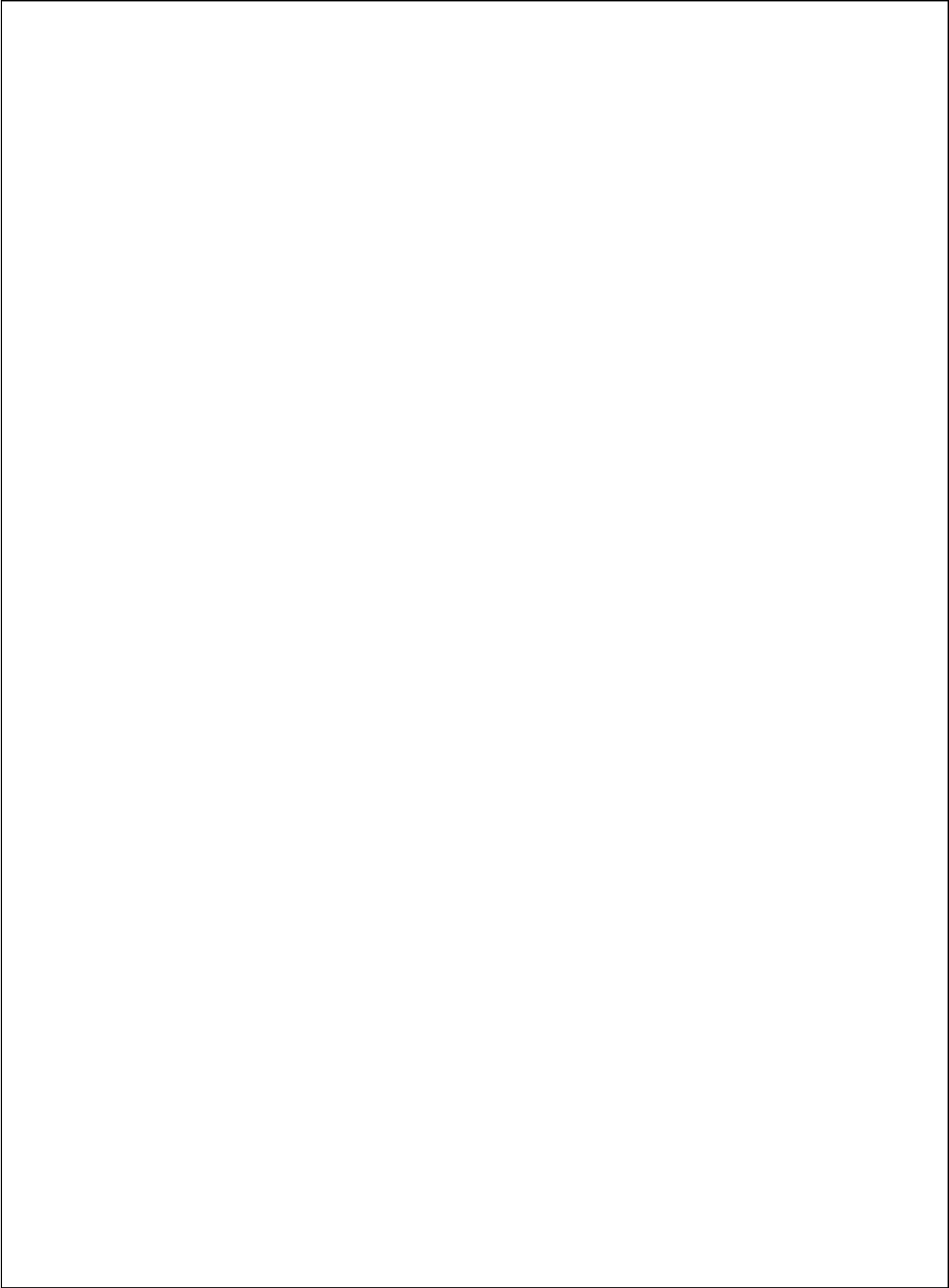
Question II.3 Comparaison d'appendices. En vous appuyant sur des dessins d'observation, comparez la morphologie générale des appendices thoraciques et abdominaux. Précisez les fonctions probables de chacun de ces appendices, pour chacune des espèces.

Réponse à la question II.3



Question II.4 Établissement d'un arbre phylogénétique. Établissez une matrice de caractères à partir des comparaisons précédentes, et à partir d'autres observations que vous pouvez faire, et proposez un arbre phylogénétique basé sur cette matrice, en prenant l'espèce D comme groupe extérieur. Nommez les différents taxons sur votre arbre.

Réponse à la question II.4



III Étude de la respiration de la Limnée

Vous disposez de plusieurs pontes de Limnée avec des embryons à différents stades de développement ainsi que de quelques Limnées à différents stades de croissance.

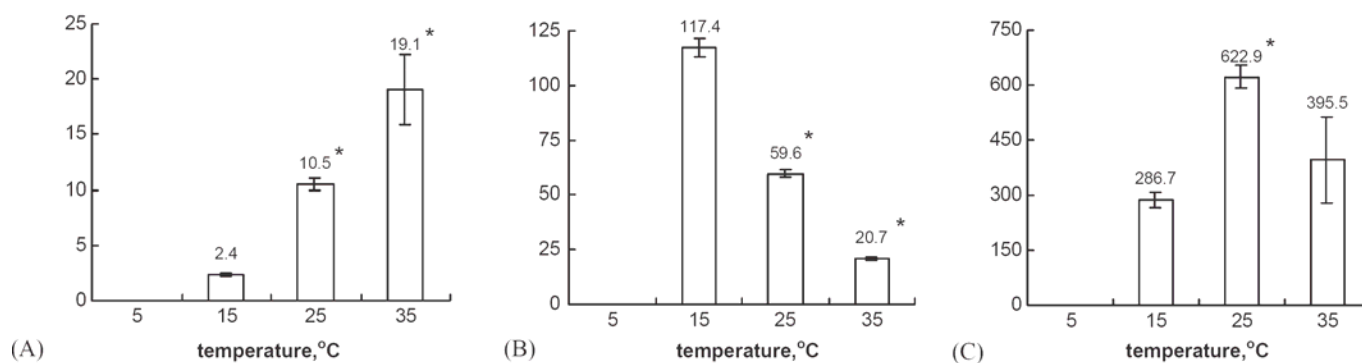
Question III.1 Comportement respiratoire de l'adulte. Décrivez, à partir de vos observations, les différentes étapes comportementales du cycle respiratoire de la Limnée adulte.

Réponse à la question III.1

Question III.2 Dissection de l'appareil respiratoire. En travaillant sur la Limnée morte, réalisez une dissection mettant en évidence l'appareil respiratoire de la Limnée. Ménagez votre échantillon lors de votre dissection puisqu'il fera l'objet d'une seconde dissection (ganglions du collier nerveux).

À l'issue de votre dissection, appelez un examinateur afin qu'il évalue la qualité de votre préparation.

Question III.3 Effet de la température. Interprétez les graphiques ci-dessous représentant les résultats d'une expérience sur le cycle respiratoire de la Limnée adulte en fonction de la température.



(A) Nombre moyen de cycles respiratoires par heure ; (B) Durée moyenne de chaque évènement de respiration en seconde ; (C) Durée cumulée totale moyenne des respirations par heure (secondes). Les barres d'erreur représentent l'erreur standard. Les astérisques indiquent une différence significative par rapport au traitement à 15°C.

Nombre de limnées étudiées et nombre de cycles respiratoires observés : à 5°C : 31 (0 cycles) ; 15°C : 20 (288 cycles) ; 25°C : 100 (1096 cycles) ; 35°C : 15 (292 cycles)

D'après Sidorov A. V., 2005, *Journal of thermal biology*, 30, p163-171

Réponse à la question III.3

Le comportement respiratoire que vous avez observé semble sous l'influence de deux neurones IP3I et VD4 contrôlant deux phases antagonistes du cycle respiratoire. Ces deux neurones s'inhibent réciproquement et sont eux-mêmes contrôlés par un troisième neurone, le neurone RPeD1. Ces neurones sont localisés dans divers ganglions du collier nerveux périœsophagien et leur activité peut être étudiée au moyen de microélectrodes.

Question III.4 Dissection du collier nerveux. En travaillant sur votre précédente dissection, réalisez une nouvelle dissection mettant en évidence les différents ganglions du collier nerveux périoesophagien et leurs connexions. Réalisez un dessin d'observation de votre dissection.

À l'issue de votre dissection, appelez un examinateur afin qu'il évalue la qualité de votre préparation.

Réponse à la question III.4 Dessin d'observation

Nous allons maintenant étudier la respiration des stades embryonnaires de la Limnée. Vous disposez de plusieurs pontes de Limnée à divers stades de développement. Vous pouvez extraire les œufs d'une ponte en roulant délicatement entre vos doigts une ponte maintenue dans du papier absorbant.

Question III.5 Observation d'une ponte : décrivez la structure et les caractéristiques d'une ponte. Quels peuvent être les intérêts écologiques de ces dernières ?

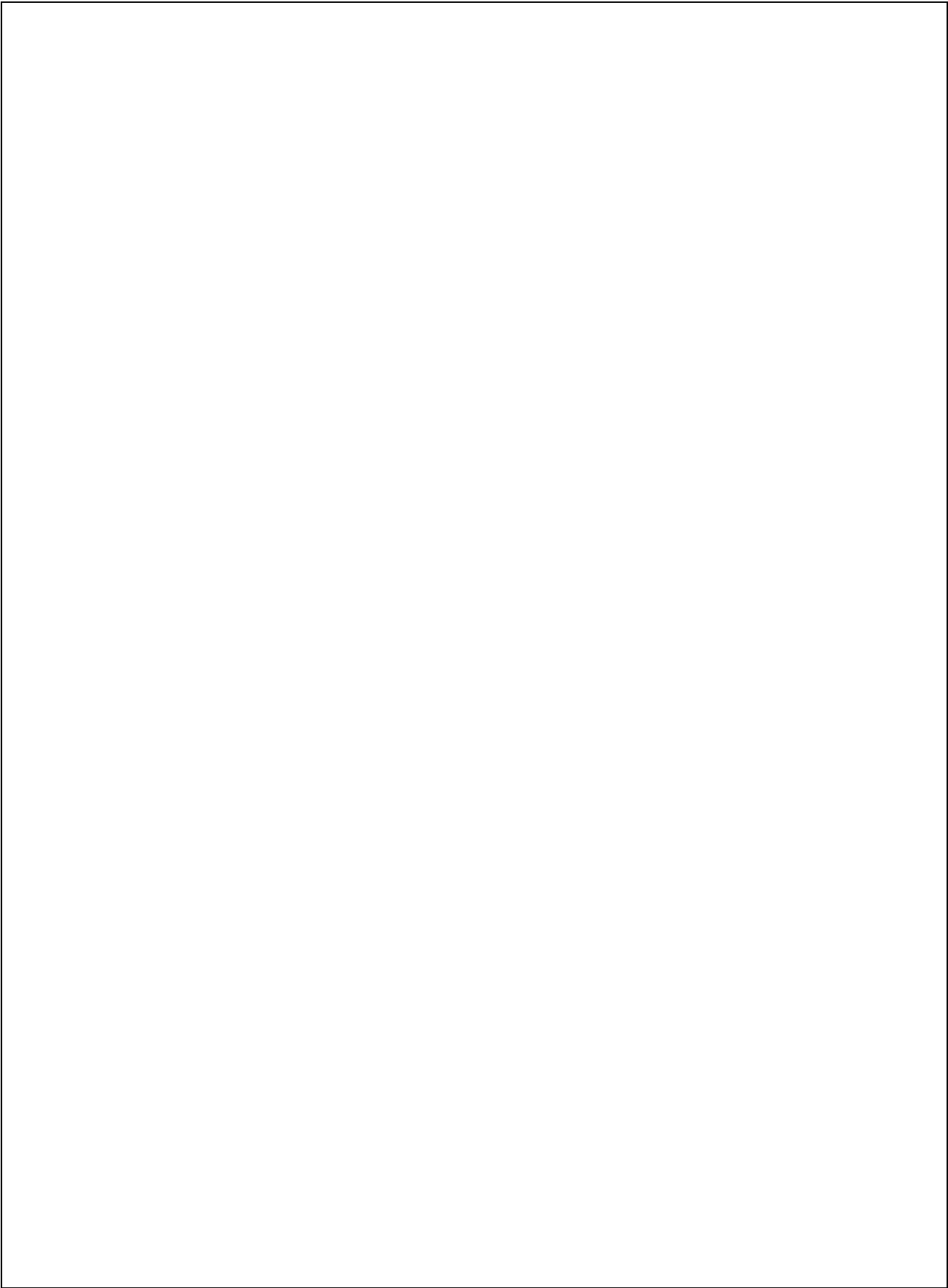
Réponse à la question III.5

Question III.6 Stades embryonnaires. Réalisez un dessin d'observation annoté des trois principaux stades de développement embryonnaire que vous distinguerez dans les pontes fournies. Pour chaque stade, vous indiquerez dans un commentaire les comportements observés.

Réponse à la question III.6

Question III.7 Réalisation d'une expérience : rythme cardiaque et respiration. En travaillant sur des embryons de Limnée bien développés, vous réaliserez à partir du matériel disponible sur votre paillasse, une expérience permettant d'étudier l'influence du degré de dissolution des gaz dans l'eau sur le rythme cardiaque. Décrivez, en le justifiant, votre protocole expérimental ; détaillez les éventuels calculs effectués sur vos données et présentez vos données sous la forme d'un tableau et d'un graphique. Interprétez et discutez vos résultats. Indiquez également les limites de votre expérience.

Réponse à la question III.7



Question III.8 Schéma-bilan sur la respiration. À partir de vos observations, des expériences et des documents précédents, réalisez un schéma-bilan sur la respiration de la Limnée.

Réponse à la question III.8

IV Étude du comportement antiprédateur de la Limnée

D'après Dalesman et al., 2006, *Animal Behaviour*, 71, p. 789-797 ; Dalesman et al., 2007 *Freshwater Biology*, 52, p. 2134-2140, Dalesman et al. 2007, *Ecology*, 88, p. 2462-2467.

L'objectif de cet exercice est d'étudier le comportement anti-prédateur des Limnées contre un de ses prédateurs naturels, la Tanche (*Tinca tinca*), poisson qui vit dans les eaux saumâtres. Pour cela, de jeunes Limnées "naïves" - c'est-à-dire nées en laboratoire et n'ayant jamais été en contact avec un prédateur - ont été exposées à divers signaux et leur comportement a été étudié pendant deux heures après cette exposition. Le principal comportement antiprédateur de la Limnée est la sortie en dehors de l'eau. Les résultats présentent donc la proportion de temps passé au-dessus de l'eau par les Limnées au cours des deux heures de suivi comportemental.

Dans un premier temps on a ajouté à l'eau dans laquelle se trouvent les Limnées, de l'eau contrôle (C), de l'eau provenant d'un aquarium de 4L où trois Limnées ont été écrasées (A), de l'eau provenant d'un aquarium de 4L où trois Tanches de 10 cm ont été placées pendant 1h (T) ou de l'eau d'un aquarium où on a placé à la fois trois Tanches et trois Limnées écrasées (A&T). Ces ajouts d'eau correspondent à 10% du volume initial. Les résultats de cette expérience sont présentés sur la figure (a).

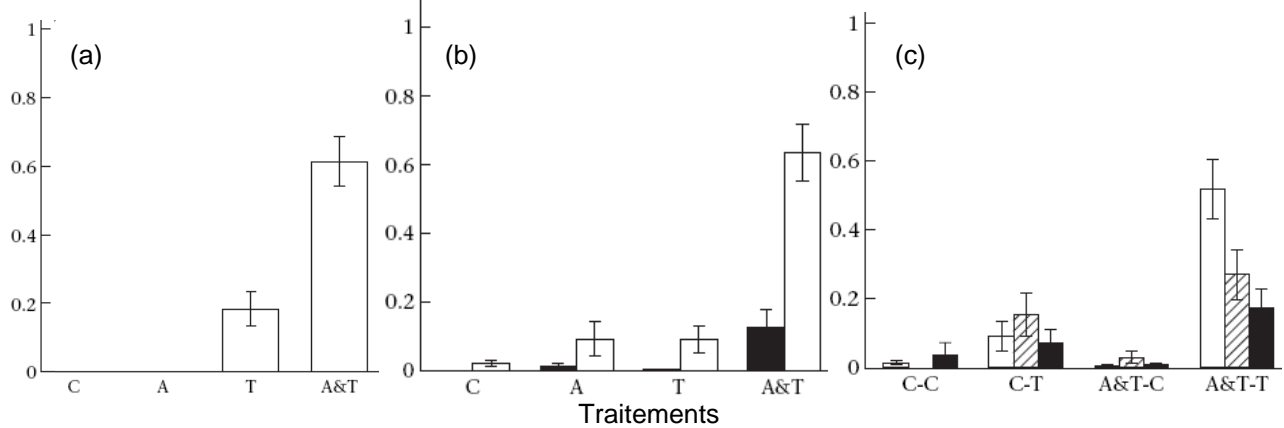
Dans un second temps, des jeunes Limnées ont été pré-exposées pendant 48h à un des quatre traitements (C, A, T, A&T) puis remises pendant 24h dans de l'eau contrôle. Après ces 24h, elles ont été exposées à de l'eau contrôle (figure b, ■) ou à de l'eau avec des odeurs de Tanche (figure b, □) et leur comportement a été étudié comme précédemment.

Dans un troisième temps, des jeunes Limnées ont été exposées à de l'eau contrôle (C) ou de l'eau avec des odeurs de Limnée écrasée et de Tanche (A&T) pendant 48h puis replacées dans de l'eau contrôle pendant 24h (□), 4 jours (▨) ou 8 jours (■) avant que l'on étudie leur comportement lorsqu'elles sont soumises à de l'eau contrôle (C) ou de l'odeur de Tanche (T). Résultats sur la figure (c).

Question IV.1 Quel est l'intérêt de réaliser ces expériences sur des Limnées nées en laboratoire ?

Réponse à la question IV.1

Proportion de temps passé au-dessus de l'eau (moyenne \pm erreur standard)



Question IV.2 Interprétez les résultats de la première expérience, figure (a).

Réponse à la question IV.2

Question IV.3 Quel est l'objectif de la seconde expérience ? Interprétez les résultats de cette seconde expérience, figure (b).

Réponse à la question IV.3

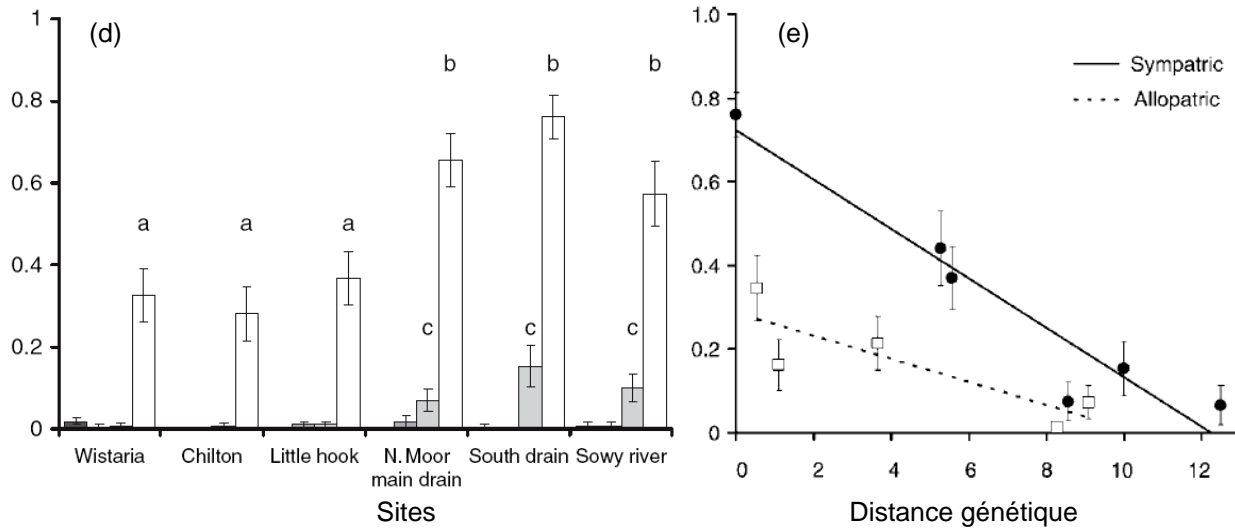
Question IV.4 Quel est l'objectif de la troisième expérience ? Interprétez les résultats de cette troisième expérience, figure (c).

Réponse à la question IV.4

Une autre expérience a consisté à comparer les réponses des Limnées provenant de six sites éloignés de quelques kilomètres les uns des autres. On trouve des Tanches dans trois des sites (N.Moor, South drain, Sowry river) alors qu'il n'y a pas de poissons dans les trois autres (Wistaria, Chilton, Little hook). La même expérience que précédemment a été réalisée sur des jeunes Limnées nées d'individus provenant de ces 6 sites : de gauche à droite successivement, contrôle (■), Limnée écrasée (■), odeur de Tanche(■), odeur de Tanche et de Limnée écrasée (□). Résultats sur la figure (d).

Dans une dernière expérience, les auteurs ont étudié la réponse de jeunes Limnées en présence d'odeur de Tanche associée à une odeur de mollusque d'eau douce écrasé en utilisant des espèces de mollusques plus ou moins proches de la Limnée. La distance génétique entre la Limnée et les autres espèces étudiées a été mesurée en comparant les séquences d'ARN 16S de chaque couple d'espèce. Les auteurs ont distingué les réponses des Limnées issues de populations sympatriques —● ou allopatriques - - - □ avec les autres espèces étudiées. Résultats sur la figure (e).

Proportion de temps passé au-dessus de l'eau (moyenne \pm erreur standard). Dans la figure (d) les barres de moyenne qui ne sont pas surmontées d'une lettre ne diffèrent pas significativement les unes des autres mais diffèrent des barres surmontées d'une lettre. Les moyennes surmontées de la même lettre (a, b, ou c) ne diffèrent pas significativement entre elles mais sont significativement différentes des moyennes surmontées par une autre lettre.



Question IV.5 Interprétez les résultats de la figure (d).

Réponse à la question I.5

Question IV.6 Interprétez les résultats de la figure (e).

Réponse à la question IV.6

Question IV.7 Au vu de l'ensemble de ces résultats concluez sur les mécanismes façonnant le comportement antiprédateur de la Limnée et discutez des pressions de sélection qui pourraient être impliquées dans ce système.

Réponse à la question IV.7

Question IV.8 Quelles limites voyez-vous à ces travaux ? Quelles expériences complémentaires proposeriez-vous de faire ?

Réponse à la question IV.8

V Reconnaissances raisonnées

V.1 Reconnaissance auditive d'espèces

Question V.1 Pour chaque échantillon sonore, indiquez le groupe systématique le plus précis possible, ainsi que les caractéristiques écologiques principales de l'espèce.

Éch.	Groupe	Espèce	Écologie
1			
2			
3			
4			
5			

V.2 Lecture de paysages

Question V.2 Pour chacune des photos présentées, indiquez le type de milieu, les principales conditions écologiques associées et les espèces indicatrices que vous reconnaissez.

Description du milieu	Espèces indicatrices
1	
2	
3	
4	

Nom :	Prénom :	salle n° :
--------------	-----------------	-------------------

V.3 Reconnaissance visuelle

Question V.3 Pour chaque échantillon, indiquez le groupe systématique le plus précis possible, ainsi que les caractéristiques écologiques principales de l'espèce.

Éch.	Groupe	Espèce	Ecologie
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			

Commentaires de l'épreuve de TP de spécialité – secteur C

Le cycle externe du carbone

Cette année, le TP-C proposait d'aborder des questions relatives aux variations du cycle du carbone à différentes échelles de temps. Le premier exercice s'intéressait aux variations du CO₂ atmosphérique au cours du dernier siècle et à la problématique de l'acidification des océans, largement vulgarisée ces dernières années. Le deuxième exercice revenait sur les variations du CO₂ atmosphérique au cours des transitions glaciaires-interglaciaires, et sur certains des mécanismes qui permettraient d'expliquer la co-variation CO₂ – climat à ces échelles de temps. Enfin, le troisième exercice abordait la variation du CO₂ au cours du phanérozoïque, en s'intéressant aux différents termes puits – sources de carbone pour l'atmosphère sur ces échelles de temps. Une analyse de lame mince, de 2 échantillons de roches et une coupe sur une carte minière y étaient proposées. Une quatrième partie bilan proposait de s'interroger, à la lumière des développements précédents, sur la notion de temps de résidence du CO₂ dans l'atmosphère.

Ce sujet a pu dérouter certains candidats en particulier par l'absence de certains exercices-types et par la nécessité de faire appel à certaines notions de mathématiques, de chimie et de physique même élémentaires (ou bien du niveau d'un élève de terminale scientifique). Le jury a cependant trouvé que la plupart des candidats avaient abordé l'ensemble des questions, sans être effrayés par les questions nécessitant des développements numériques. Certains candidats ont d'ailleurs réussi à résoudre la totalité des applications numériques du sujet.

Plusieurs points généraux, valables pour l'ensemble du TP, sont à rappeler ici :

- le cadre vierge sert à répondre à la question posée, et non à commenter de façon la plus exhaustive possible l'ensemble des documents proposés ou à développer l'ensemble des connaissances du candidat sur le sujet ! Plusieurs candidats répondent ainsi à la question posée, mais cette réponse est noyée dans un ensemble de remarques ou de commentaires inutiles, souvent faux, et qui pénalisent donc le candidat.
- un grand nombre de questions pouvaient être abordées sans connaissances préalables précises des mécanismes en cause. Il fallait raisonner à partir de notions même minimalistes que possédaient la plupart des candidats. Et il fallait surtout ne pas hésiter à revenir sur certaines des réponses quand les documents présentés dans la question suivante remettaient en cause le raisonnement précédent (plusieurs candidats concluent que l'augmentation du CO₂ implique une augmentation de la

concentration en ion carbonates, puis discutent quelques lignes plus loin d'un document où il est très clair que l'augmentation de la concentration de CO_2 est corrélée à une diminution des ions carbonates...).

Il s'agissait bel et bien d'un TP et non pas de questions de cours. L'exercice consistait à comprendre les données acquises par différentes techniques, à interpréter leurs variations. Le but était de montrer comment le scientifique aboutit concrètement aux idées exposées dans les cours.

De façon plus précise pour chacune des parties :

Partie I

La majorité des candidats a pu commenter de façon correcte les courbes d'augmentation récente du CO_2 atmosphérique, en en discutant les arguments principaux. Même si la plupart des candidats savent que des puits de carbone (océan et biosphère terrestre) viennent limiter cette augmentation, seuls 2 ou 3 d'entre eux ont pu calculer de façon précise le bilan de carbone sur la période récente. Les questions suivantes relatives à la chimie des carbonates et à l'acidification des océans ont par contre dérouté une majorité de candidats. La plupart ne possède pas les connaissances de chimie élémentaire relatives aux équilibres acide-base et donc à la chimie des carbonates.

Partie II

Les courbes qu'il fallait commenter dans cette partie étaient pour la plupart familières aux candidats ($\delta^{18}\text{O}$ et CO_2 sur les derniers cycles glaciaires-interglaciaires). Seul un petit nombre est cependant capable d'expliquer la façon dont ont été construites ces courbes. Beaucoup d'idées intéressantes ont été proposées pour discuter des mécanismes permettant d'expliquer les variations glaciaire-interglaciaire du CO_2 .

Partie III

Quelques candidats ont répondu à l'ensemble des questions de cette partie ; cependant, certains exercices montrent des lacunes répandues : seulement un tiers des candidats ont réussi à équilibrer convenablement les réactions chimiques, de nombreux candidats n'arrivent pas à repérer une relation linéaire sur un diagramme semi-log ou log-log et à en déduire une équation. De nombreux candidats se trompent dans les conversions d'unités (km^2 en m^2 etc...). Une droite dans un graphe semi-log implique une relation exponentielle, une droite dans un graphe log-log implique une relation puissance. Seul un candidat répond convenablement dans ce dernier cas.

L'exercice de cartographie n'a pas été pris comme une analyse classique, pourtant la réalisation de la coupe était très simple et ne demandait qu'une compréhension de base de ce type d'exercice. Il s'agissait de reporter les altitudes des murs des faisceaux le long du trait de coupe. Plusieurs candidats ont confondu altitude et profondeur. Il n'y avait pas de difficulté majeure sur la reconnaissance des échantillons qui étaient des roches assez classiques à l'exception du schiste noir. Le charbon n'a pas toujours été reconnu. Enfin, il n'était pas demandé d'aller très loin sur les figures d'altération et la plupart des candidats en ont reconnu les traces sur la lame mince.

Enfin, la discussion de la courbe de variation de CO_2 au Phanérozoïque fut symptomatique de ce défaut consistant à débiter des grandes théories apprises en cours plutôt que de coller à l'exercice. On ne demandait pas au premier ordre de raconter l'histoire géologique de l'ère primaire, mais de décrire la courbe, d'interpréter les variations en termes de variations de puits et de sources (si la concentration de CO_2 diminue, la source diminue ou les puits augmentent) puis à proposer des hypothèses.

Partie IV

La quatrième partie consistait en des calculs de temps de résidence et leur interprétation. La définition d'un temps de résidence est à revoir pour un quart des candidats. La moitié n'a pas traité la question sans qu'il ne soit possible de savoir s'il s'agissait de la question de trop ou bien d'une méconnaissance totale de la part de ces candidats. En revanche, le dernier quart a réalisé cet exercice parfaitement.

Nom :	Prénom :	salle n° :
--------------	-----------------	-------------------

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

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2008

TRAVAUX PRATIQUES DE SPECIALITÉ DU SECTEUR C

Durée totale : 6 heures

Le cycle externe du carbone

Ce TP est composé de trois parties principales, pouvant être traitées de façon indépendante, mais toutes relatives au cycle externe du carbone et d'une quatrième partie, plus courte, sous forme de bilan. La première partie concerne le cycle du carbone contemporain perturbé par l'Homme. Les échelles de temps concernées vont de la saison à la centaine d'années. La deuxième partie s'intéresse à la variabilité du cycle du carbone et au couplage entre le système climatique et le cycle du carbone au cours du dernier million d'années. Enfin, la troisième partie s'intéresse au cycle du carbone dit « géologique » et à la variabilité du CO₂ dans l'atmosphère au cours du Phanérozoïque. Une analyse de lame mince, une analyse d'échantillons macroscopiques et une coupe sont proposées dans cette troisième partie. Enfin, dans la quatrième partie, il vous est proposé d'établir un bilan des variations du CO₂ dans l'atmosphère de notre planète en vous intéressant aux temps de résidence de ce CO₂ dans les différents réservoirs.

Les points attribués à chacune des parties et une durée indicative pour traiter les différentes parties sont indiqués ci-dessous :

I. Cycle contemporain du carbone, perturbé par l'Homme	12 / 40 (durée conseillée : 1h 40)	p 2
II. Cycle du carbone au cours du dernier million d'années.	08 / 40 (durée conseillée : 1h 20)	p 17
III. Cycle géologique du carbone.	18 / 40 (durée conseillée : 2h 40)	p 24
<i>dont III-B-2 : Analyse d'une roche et d'une lame mince</i>	<i>2 / 40 (durée maximale : 15 min)</i>	
<i>dont III-C-1 : Étude d'échantillons</i>	<i>2 / 40 (durée maximale : 15 min)</i>	
<i>dont III-C-2 : Cartographie minière</i>	<i>5 / 40 (durée conseillée : 1h)</i>	
IV. Bilan : temps de résidence du carbone dans l'atmosphère	02 / 40 (durée conseillée : 20 min)	p 44

**AVANT DE RENDRE VOS COPIES, PRIÈRE DE VÉRIFIER QUE VOUS
AVEZ BIEN INDIQUÉ VOS NOM, PRENOM ET NUMERO DE SALLE EN
TÊTE DE CHAQUE FEUILLE**

- **Partie I. Cycle contemporain du carbone : perturbation par l'Homme et conséquences**

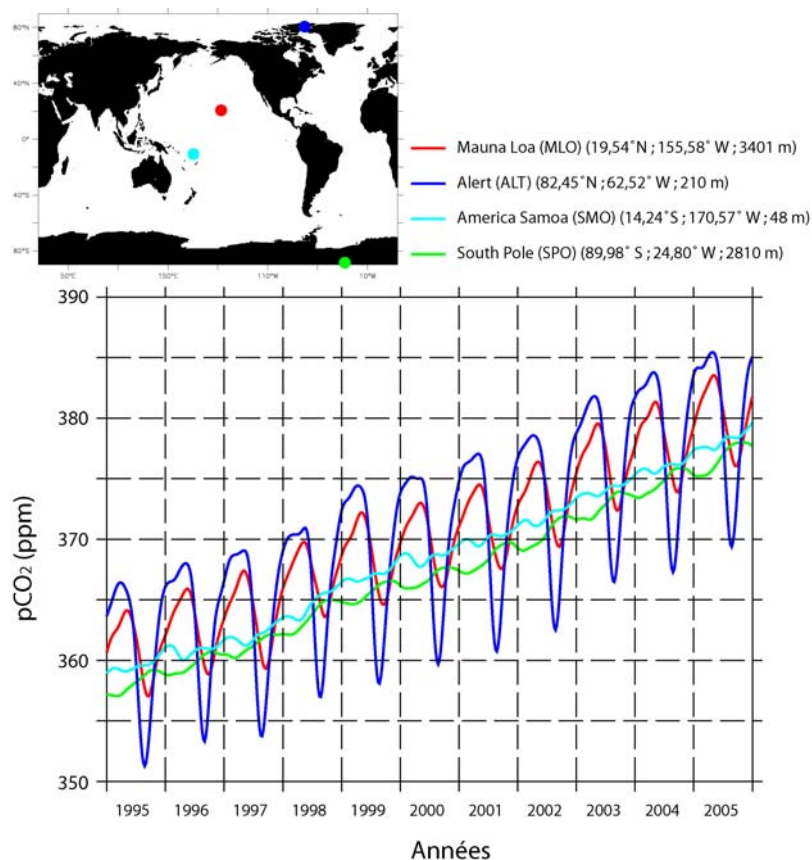
Dans cette partie, nous nous intéressons au cycle moderne du carbone, perturbé par l'Homme. L'objectif des différentes questions qui vous sont posées est double : 1) réaliser un bilan des flux de carbone à l'échelle de la planète pour la dernière décennie et 2) s'intéresser aux conséquences de l'augmentation du carbone pour la chimie des océans.

- **A. Évolution du CO₂ dans l'atmosphère : une origine anthropique ?**

Plusieurs documents vous sont fournis. Ils sont pour la plupart obtenus à partir d'enregistrements atmosphériques (pression partielle de CO₂ à différentes stations, rapport isotopique ¹³C/¹²C, ...). Ils doivent vous permettre de répondre aux différentes questions posées ci-dessous.

- **1. Cycle saisonnier du CO₂ dans l'atmosphère.**

Le document 1 présente le résultat de l'enregistrement du CO₂ atmosphérique à différentes stations de mesures dont les coordonnées géographiques sont indiquées sur le document.



Document 1 – Concentrations atmosphériques de CO₂ mesurées entre 1995 et 2006 pour quatre stations de mesures du réseau GLOBALVIEW.

Nom :

Prénom :

salle n° :

Les stations sélectionnées pour réaliser cette figure ne représentent qu'une petite fraction des stations équipées aujourd'hui pour mesurer de façon routinière le CO₂ dans notre atmosphère (réseau Globalview, plusieurs dizaines de stations) et sont toutes situées dans des sites éloignés des zones très urbanisées.

Question I-A-1 : Comment expliquez-vous les différences des cycles saisonniers (phase, amplitude) enregistrés aux différentes stations ?

Réponse à la question I-A-1.

En comparant les différentes stations les unes aux autres, on remarque :

- que l'amplitude du cycle saisonnier est la plus forte aux hautes latitudes de l'hémisphère nord.
- que le cycle saisonnier est très peu marqué dans les tropiques (2 pics à Samoa).
- que les cycles saisonniers de l'hémisphère nord et de l'hémisphère sud sont en opposition de phase
- que la baisse du CO₂ intervient au printemps et en été, l'augmentation en automne / hiver.

C'est les échanges entre la biosphère continentale et l'atmosphère qui expliquent ce cycle saisonnier, et en particulier la différence entre photosynthèse et respiration (autotrophe et hétérotrophe).

Le cycle saisonnier est plus marqué dans les moyennes et hautes latitudes qu'aux tropiques. Il s'exprime également de façon plus importante dans l'hémisphère nord en raison de l'importance de la surface des continents (par rapport au sud !).

Les échanges avec l'océan ne contribuent que minoritairement au cycle saisonnier du CO₂ dans l'atmosphère. Dans l'océan, l'effet thermique (solubilité du gaz) s'oppose à l'effet lié à la saisonnalité de la production biologique marine : au printemps, le bloom phytoplanctonique consomme du CO₂, mais l'augmentation de température des eaux de surface libère du CO₂ dans l'atmosphère à cause de la diminution de la solubilité avec la température.

▪ 2. Gradient interhémisphérique du CO₂ dans l'atmosphère.

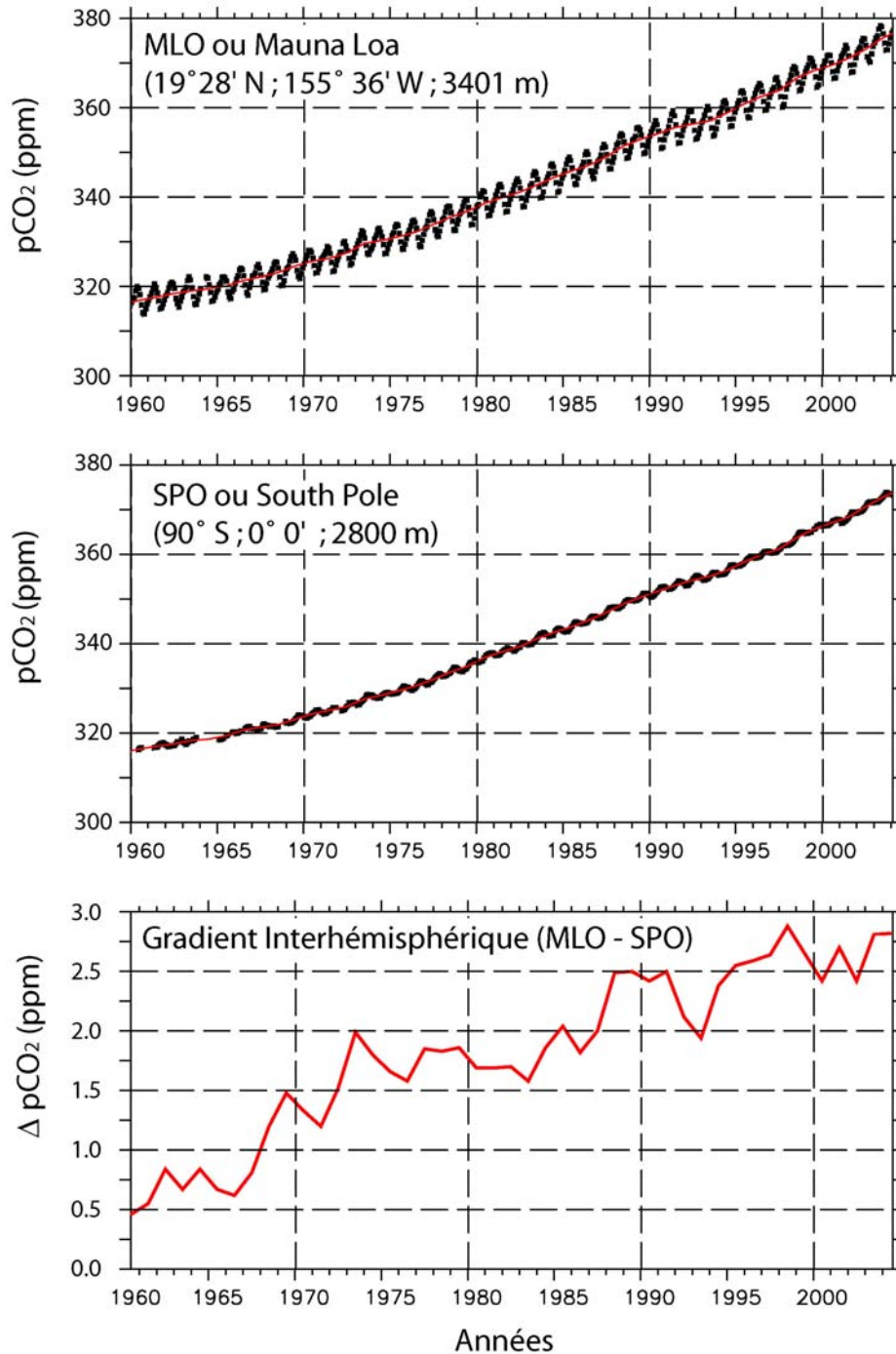
L'américain Charles Keeling est le premier à avoir équipé une station de mesure du CO₂ atmosphérique, la station Mauna Loa à Hawaï, et ceci dès la fin des années 1950. La concentration du CO₂ dans l'atmosphère y est mesurée tous les mois depuis 1958 ! Au même moment, il préleva des échantillons à la station South Pole (Pôle Sud) pour y mesurer également le CO₂ atmosphérique. Le document 2 montre l'évolution de la concentration atmosphérique de CO₂ à Mauna Loa et à South Pole depuis 1960. La différence entre ces 2 concentrations (document 2.c) donne une indication du gradient interhémisphérique de CO₂.

Nom :

Prénom :

salle n° :

Questions I-A-2 : Comment expliquez-vous le fait que ce gradient augmente (c-à-d que le CO_2 augmente plus rapidement dans l'hémisphère nord que dans l'hémisphère sud) ? Quelle indication cette information nous donne-t-elle sur le temps de mélange dans la troposphère libre ?



Document 2 - Évolution de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère de 1960 à 2005 à la station de Mauna Loa dans l'archipel d'Hawaï (MLO), à la station South Pole sur le continent antarctique (SPO). En noir, sont présentées les données mensuelles ; en rouge, le cycle saisonnier a été retiré. Le gradient interhémisphérique est calculé en faisant la différence entre ces deux concentrations (MLO – SPO) (d'après Keeling et al., 2001).

Nom :

Prénom :

salle n° :

Réponses aux questions I-A-2.

Les stations Mauna Loa et South Pole montrent toutes deux une augmentation de la concentration de CO₂. Mais cette augmentation est plus rapide à Mauna Loa. En 2005, la concentration à Mauna Loa est supérieure de près de 3 ppm à celle mesurée à South Pole, alors que la différence entre ces concentrations n'est que de 0.5 ppm en 1960.

Pour expliquer l'évolution de la différence des concentrations entre les 2 stations, on peut imaginer plusieurs mécanismes : un puits de carbone plus important dans l'hémisphère sud que dans l'hémisphère nord, ou une source de carbone plus importante dans l'hémisphère nord. C'est évidemment la deuxième explication qui paraît la plus logique.

Les émissions anthropiques de carbone sont largement concentrées dans l'hémisphère nord [Europe et Amérique du nord]. On peut noter que ce n'est pas le cas pour les émissions liées à la déforestation, principalement concentrées dans les tropiques au cours de la deuxième moitié du XX^{ème} siècle..

L'évolution de cette différence peut renseigner sur le temps de mélange atmosphérique entre les 2 hémisphères. Assez rapide pour que l'évolution du CO₂ se fasse sentir dans les 2 hémisphères, mais assez lent (> 1 an) pour que les cycles saisonniers du CO₂ atmosphérique soient différents entre les 2 hémisphères et pour qu'on puisse détecter une différence de tendance entre South Pole et Mauna Loa [le temps de mélange entre les 2 hémisphères est en fait estimé à 1,3 an].

- 3. *Origine anthropique de l'augmentation récente du CO₂ dans l'atmosphère.*

Question I-A-3 : En utilisant les documents précédents ainsi que le document 3 (évolution du $\delta^{13}\text{C}$ à Mauna Loa) et le document 4 (émissions de carbone anthropique par combustion des énergies fossiles), discutez les arguments qui permettent d'affirmer que l'augmentation récente du CO₂ dans l'atmosphère est d'origine anthropique.

N.B. : Pour convertir des PgC (10^{15} grammes de carbone) en ppmv (parties par million en volume), donc une masse de carbone (sous forme de CO₂) en rapport de concentrations dans l'atmosphère, il faut utiliser la masse atomique d'un atome de carbone (12 g/mol), le volume molaire d'un gaz ($22,4 \text{ L}\cdot\text{mol}^{-1}$) et le volume total de la troposphère (que vous prendrez égal à $3,957 \cdot 10^{18} \text{ m}^3$).

Nom :

Prénom :

salle n° :

Réponse à la question I-A-3

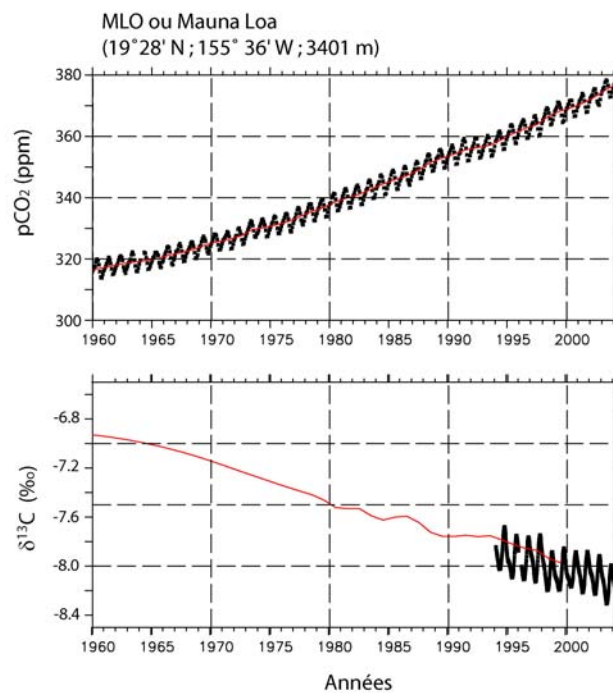
Plusieurs arguments permettent d'appuyer l'affirmation qui explique l'augmentation du CO₂ atmosphérique par les émissions anthropiques de carbone.

- l'évolution du gradient inter-hémisphérique montre que les émissions sont principalement localisées dans l'hémisphère nord.
- on peut aussi comparer les estimations des émissions anthropiques cumulées des 40 dernières années (235 PgC) à l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère sur la même période (+60 ppm). En utilisant les valeurs numériques donnés dans le NB, on peut convertir des PgC en ppmv atmosphérique : 2.12 pgC dans l'atmosphère sous forme de CO₂ représentent 1 ppm. Si tout le carbone émis par l'Homme s'était accumulé dans l'atmosphère, c'est de plus de 100 ppm que le CO₂ atmosphérique aurait augmenté.
- troisième argument : l'évolution du d¹³C montre que l'augmentation du CO₂ atmosphérique est corrélée à une décroissance assez importante du d¹³C de ce carbone atmosphérique. C'est encore une fois compatible avec une origine anthropique de ce carbone additionnel : la pétrole et le charbon sont formés à partir de matière organique pour laquelle le d¹³C peut être assez négatif (de -12 à -25‰).

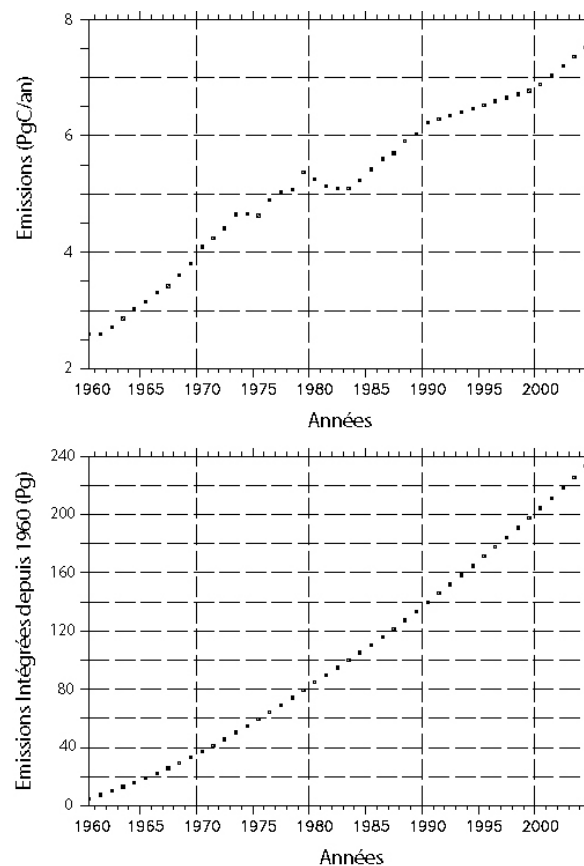
Nom :

Prénom :

salle n° :



Document 3 - Évolution de la concentration de CO_2 (haut) et du $\delta^{13}\text{C}$ du CO_2 (bas) dans l'atmosphère de 1960 à 2005 à la station de Mauna Loa dans l'archipel d'Hawaï (MLO) (d'après Keeling et al., 2001).



Document 4 – Émissions globales de carbone par combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon et gaz) de 1960 à 2005 (haut). Les mêmes, intégrées temporellement depuis 1960 (d'après Marland et al., 2005).

Nom :	Prénom :	salle n° :
--------------	-----------------	-------------------

○ **B. Un bilan des flux de carbone pour la dernière décennie.**

Dans cette sous-partie, l'objectif est de réaliser un bilan (fermé !) des principaux flux de carbone entre l'atmosphère et les autres réservoirs de carbone pour la période contemporaine.

▪ **1. La fraction « airborne »**

La fraction « airborne » est définie comme la part du CO₂ émis par l'Homme (ici liée à la combustion des énergies fossiles) qui s'accumule dans l'atmosphère.

Question I-B-1 : En utilisant les figures des sections précédentes, pouvez-vous calculer cette fraction pour la période 1960-2005 ? Pourquoi cette fraction n'est-elle pas égale à 100 % ?

Réponse à la question I-B-1.

En reprenant les valeurs de la question précédente (I-A-3), on obtient 235 PgC pour les émissions et +60 ppm pour l'évolution du CO₂ atmosphérique. La fraction airborne vaut donc, sur cette période, 54% ($60 \times 2.12 / 235 = 54\%$).

Donc 46% des émissions ont été absorbées dans d'autres réservoirs de carbone : la biosphère continentale et l'océan.

▪ **2. La méthode O₂/CO₂ pour séparer les flux de carbone.**

On ajoute ici aux documents fournis en I-A de nouvelles données. Depuis 1989 sont mesurées dans l'atmosphère les variations relatives de dioxygène (document 5). Les mesures ont montré que cette concentration diminuait dans l'atmosphère. L'utilisation conjointe des mesures de CO₂ et d'O₂ a été utilisée pour séparer les puits terrestre et océanique de carbone. Plusieurs hypothèses sont nécessaires :

- les échanges de carbone entre l'atmosphère et l'océan ne sont pas accompagnés par un flux d'oxygène ;
- les échanges de carbone entre la biosphère continentale et l'atmosphère (photosynthèse / respiration) sont caractérisés par un coefficient stoechiométrique O:C choisi constant et égal à 1,1 mol.mol⁻¹.
- la combustion du pétrole, du charbon et du gaz naturel libère du CO₂ et consomme de l'oxygène ; le rapport stoechiométrique O:C est choisi égal à 1,4 mol.mol⁻¹.

Nom :

Prénom :

salle n° :

Question I-B-2 : Après avoir expliqué pourquoi la concentration de dioxygène diminue dans l'atmosphère, pouvez-vous estimer la valeur des puits de carbone, océanique et continental, pour les années 90-99 en utilisant les données des documents 6a et 6b (vous réaliserez un bilan de masse pour le carbone et l'oxygène sur la période 1990-1999) ?

N.B. Les variations de la concentration d'O₂ dans l'atmosphère sont exprimées sous la forme d'une déviation du rapport O₂/N₂ par rapport à une valeur standard. L'unité de mesure conventionnelle est le per meg, que l'on peut convertir en variation de la concentration d'O₂ dans l'atmosphère, exprimée en ppm d'O₂, en divisant par 4,18.

Réponse à la question I-B-2.

La concentration de di-oxygène diminue dans l'atmosphère parce que la combustion des fuels fossiles (charbon, gaz, pétrole) consomme de l'oxygène.

Pour la période 1990-1999, on peut écrire 2 équations bilans (en reprenant les hypothèses précisées dans la question) :

Pour le carbone : $\Delta \text{CO}_2 = \text{FF} - \text{B} - \text{O}$ (1)

(avec ΔCO_2 l'évolution du CO₂ atmosphérique, FF les émissions de fuels fossiles, B et O les puits continental et océanique de carbone).

Pour l'oxygène : $\Delta \text{O}_2 = -1.4. \text{FF} + 1.1 \text{ B}$ (2)

(en utilisant les coefficients stoechiométriques pour convertir les flux de carbone en flux d'oxygène).

On peut utiliser l'équation (2) pour trouver B, puis l'équation (1) pour trouver O.

$$\text{B} = (\Delta \text{O}_2 + 1.4 \text{ FF}) / 1.1, \text{ soit } \text{B} = ((-259.9 + 103.4)/4.18 \times 2.12 + 1.4 \times (63.223)) / 1.1 = (-79.37 + 88.93)/1.1$$

D'où $\text{B} = 8.68 \text{ Pg}$ (soit 0.87 Pg/an en moyenne sur 1990-1999).

$$\text{Et } \text{O} = (-\Delta \text{CO}_2 + \text{FF} - \text{B}) = (-(372.25 - 356.15) \times 2.12 + 63.223 - 8.68) = (-34.132 + 63.223 - 8.68) = 20.411$$

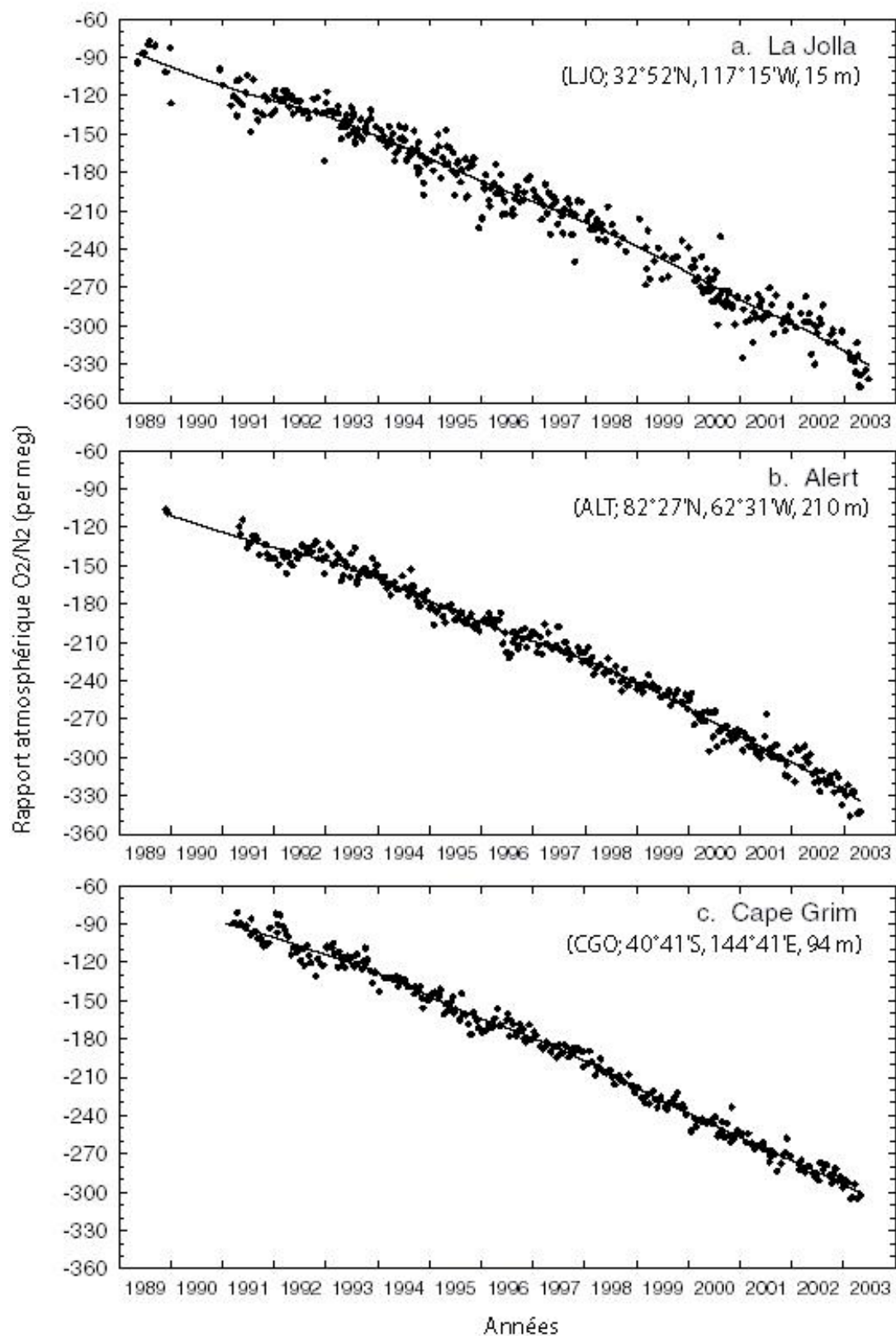
D'où $\text{O} = 20.411 \text{ Pg}$ (soit 2.04 Pg/an en moyenne sur 1990-1999).

Il faut rappeler ici que le flux B (lié à la biosphère continentale) comprend un flux naturel et le flux lié à la déforestation [la déforestation sur cette période est estimé entre 0.9 et 2.2 PgC/an, ce qui donne un puits net naturel pour la biosphère terrestre de 1.8 à 3.0 PgC/an].

Nom :

Prénom :

salle n° :



Document 5 – Évolution du rapport O_2/N_2 dans l'atmosphère, mesuré à trois stations (La Jolla en Californie, Alert au Canada et Cape Grim en Australie) en per meg. Le cycle saisonnier a été retiré (d'après Manning & Keeling, 2006).

Nom :	Prénom :	salle n° :
--------------	-----------------	-------------------

Années	Émissions de CO ₂ (PgC/an)
1990	6,126
1991	6,214
1992	6,088
1993	6,093
1994	6,253
1995	6,401
1996	6,553
1997	6,654
1998	6,649
1999	6,492

Dates	CO ₂ (ppm)	O ₂ /N ₂ (per meg)	ΔO ₂ (ppm)
janvier 1990	356,15	-103,4	
janvier 1991	357,22	-118,6	
janvier 1992	358,48	-134,4	
janvier 1993	358,11	-138,4	
janvier 1994	359,63	-154,4	
janvier 1995	362,16	-174,8	
janvier 1996	364,62	-194,6	
janvier 1997	365,59	-206,5	
janvier 1998	367,49	-221,6	
janvier 1999	370,90	-242,2	
janvier 2000	372,25	-259,1	

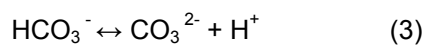
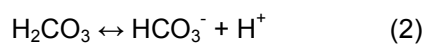
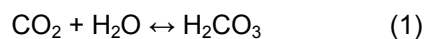
Document 6 – Émissions anthropiques liées à la combustion des énergies fossiles (PgC/an) ; évolution moyenne de la concentration de CO₂ (ppm) et du rapport O₂/N₂ (per meg) dans l'atmosphère (d'après Manning & Keeling, 2006).

○ C. Acidification de l'océan.

Vous avez montré en I-B que l'océan absorbait une part significative du CO₂ émis par l'Homme. Cette absorption n'est pas sans conséquence sur la chimie et la biologie de l'océan.

▪ 1. Absorption du CO₂ par l'océan et acidification.

Une fois dans la couche de surface de l'océan, les molécules de CO₂ se combinent avec des molécules d'eau et sont en équilibre acido-basique avec les ions carbonates et hydrogénocarbonates. Les équations (1) à (3) décrivent l'hydratation de la molécule de CO₂ et les équilibres acido-basiques qui en découlent.



Nom :

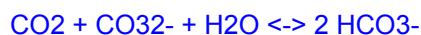
Prénom :

salle n° :

Question I-C-1 : En combinant ces équations, montrez comment l'absorption de CO₂ anthropique par l'océan perturbe ces équilibres et comment cette absorption modifie les concentrations dans l'eau de mer des ions carbonates et hydrogénocarbonates ?

Réponse à la question I-C-1

On peut combiner les équations précédentes et on obtient :



Quand une molécule de CO₂ pénètre dans les couches de surface de l'océan, elle se combine avec une molécule d'eau et un ion carbonate pour donner 2 ions bi-carbonates.

Les équilibres acido-basiques sont modifiés : le pH diminue, la concentration en ions carbonates aussi, les concentrations de CO₂ dissous et de HCO₃⁻ augmentent.

▪ 2. Acidification et impact sur les organismes marins.

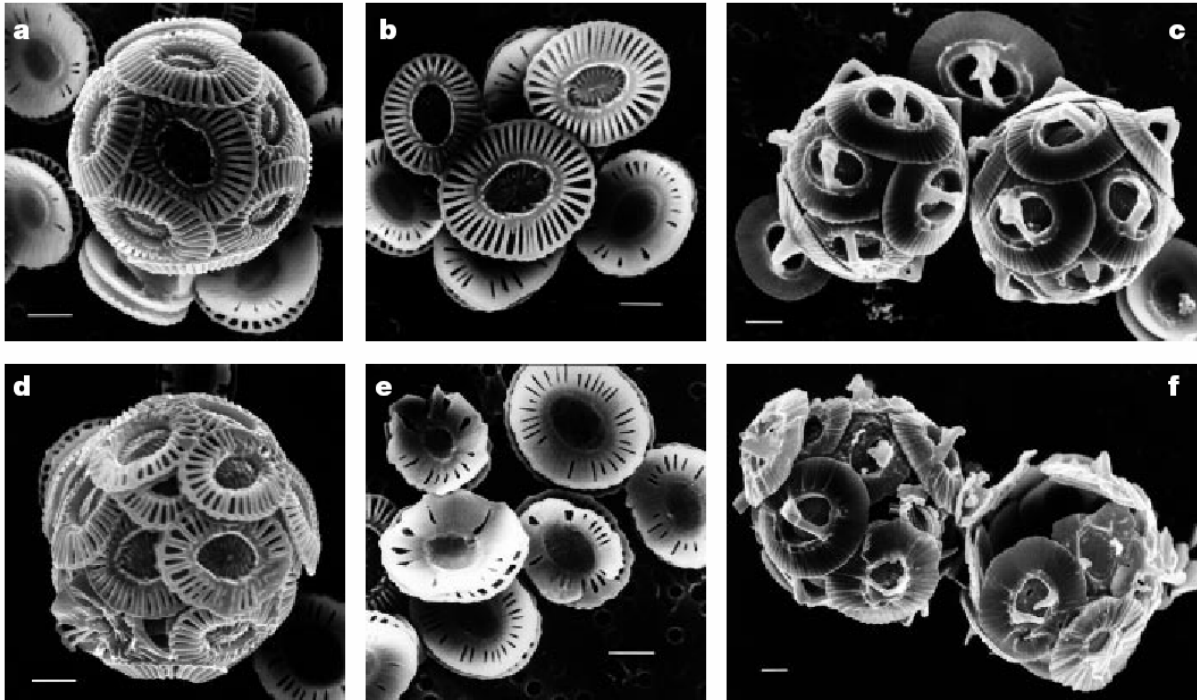
Plusieurs expériences ont été menées en laboratoire pour explorer la réponse de certains organismes marins à la modification de la chimie des carbonates. Certains de ces organismes, *Emiliana huxleyi* et *Gephyrocapsa oceanica*, deux espèces de coccolithophoridés, sont représentés sur le document 7. Ces organismes unicellulaires ont été cultivés dans de l'eau de mer à différents pH. La pression partielle de CO₂ est maintenue constante dans chacune des expériences, mais varie selon les expériences entre 280 ppm et 850 ppm. Des mesures de production de matière organique particulaire et de taux de calcification (document 8) et des photos au microscope électronique (document 7) ont été réalisées après plusieurs jours de culture.

Nom :

Prénom :

salle n° :

Question I-C-2 : En exploitant ces documents, montrez comment les modifications de la chimie des carbonates affectent la croissance de ces organismes.



Document 7 – Photographies en microscopie électronique par balayage de coccolithophoridés (*Emiliana huxleyi* en a,b,d,e et *Gephyrocapsa oeanica* en c et f). Les photos du haut correspondent à des milieux de culture où le CO₂ est maintenu à 300 ppm ; les photos du bas à des milieux où le CO₂ est maintenu à 780-850 ppm.

Réponse à la question I-C-2

Les organismes cultivés à pH faible (à pression équivalente de CO₂ élevée) montrent des défauts de structure (photos au microscope électronique). Les coccolithes en particulier semblent moins bien formés.

Les données quantitatives montrent une augmentation de la production de matière organique, une diminution du taux de calcification et du rapport calcite / matière organique particulière, avec l'augmentation de la pCO₂ et la diminution des ions carbonates, et ceci pour les deux espèces de coccolithophoridés.

L'analyse de ces résultats expérimentaux conduit aux hypothèses suivantes :

- l'augmentation du CO₂ dans l'eau semble fertiliser l'écosystème (augmentation de la production de matière organique, liée sans doute à une augmentation de la photosynthèse).

- au contraire, la calcification répond négativement à la diminution de l'ions carbonates

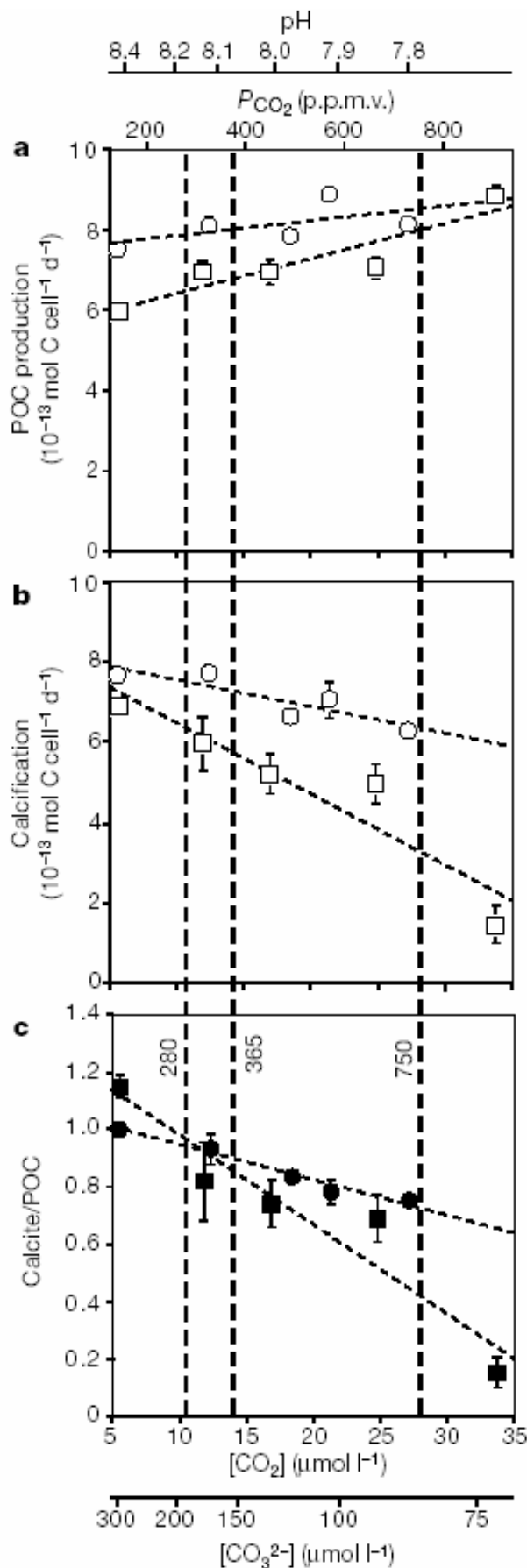


- le rapport calcite / particules organiques diminue. Les organismes sont moins calcifiés.

Nom :

Prénom :

salle n° :

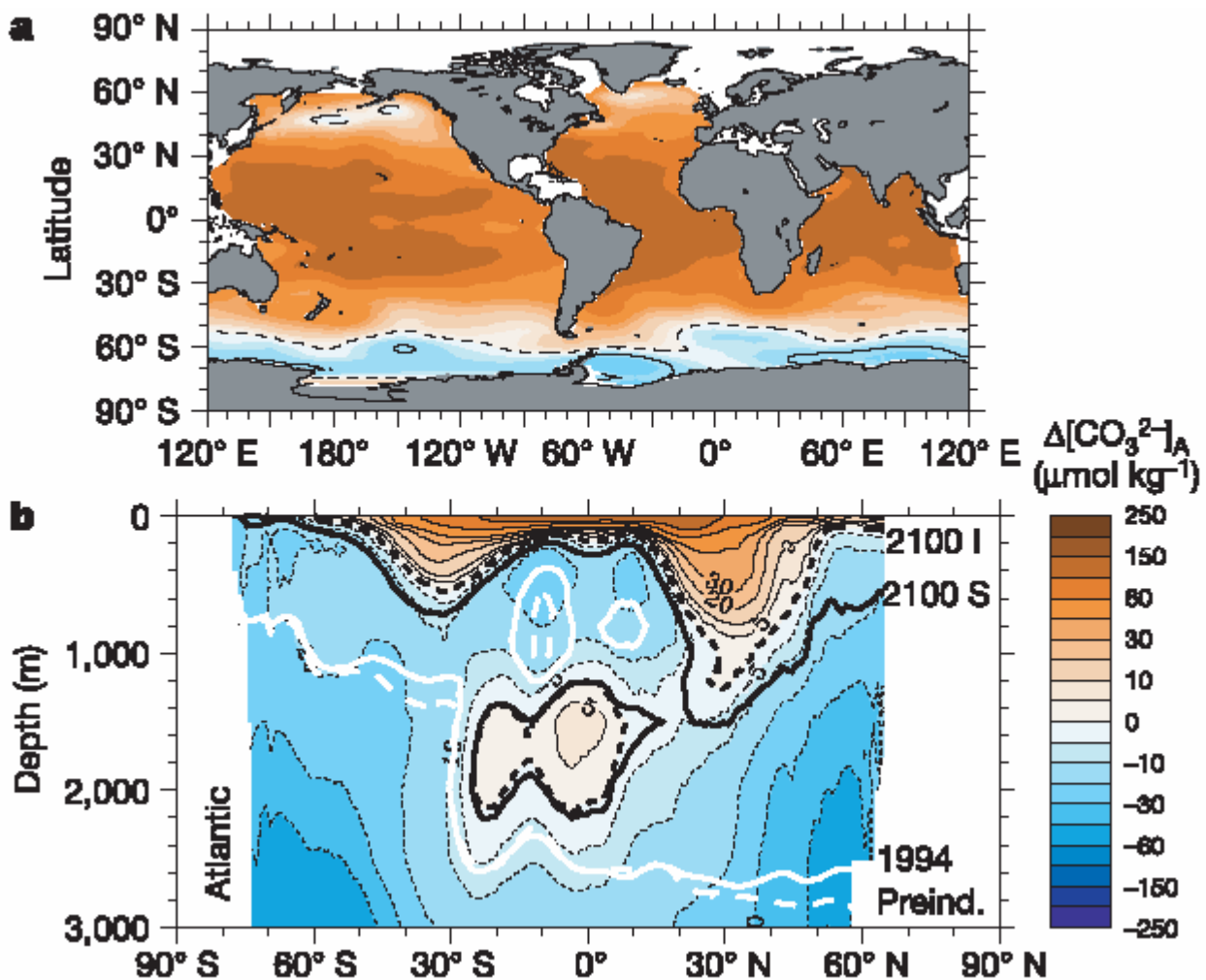


Document 8 – Réponse de la production de carbone organique particulaire (POC) et de carbonate inorganique particulaire (calcite) en fonction de la concentration de CO_2 du milieu de culture. Les cercles documentent les résultats obtenus pour *Emiliana huxleyi* et les carrés les résultats obtenus pour *Gephyrocapsa oceanica*. Les lignes en pointillés ont été tracées en réalisant une régression linéaire. Les lignes verticales représentent des valeurs de $p\text{CO}_2$ de 280, 365 et 750 ppmv, soit les concentrations atmosphériques pré-industrielle, actuelle et (potentiellement) future.

▪ 3. Des projections pour le XXI^e siècle.

Plusieurs modèles du cycle du carbone dans l'océan ont été utilisés pour projeter l'impact d'une augmentation du CO₂ dans l'atmosphère au cours des prochaines décennies sur la chimie de l'océan. Le document 9 montre les résultats de ces simulations : l'écart à la saturation de l'ion carbonate pour l'aragonite ($\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$) y est représenté. Il est calculé en utilisant l'équation (4) :

$$\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A = [\text{CO}_3^{2-}] (\text{in-situ}) - [\text{CO}_3^{2-}] (\text{à saturation pour l'aragonite}) \quad (4)$$



Document 9 – Les couleurs représentent l'écart à la saturation de l'ion carbonate pour l'aragonite ($\Delta[\text{CO}_3^{2-}]_A$) en $\mu\text{mol/kg}$ pour l'année 2100, en surface de l'océan (haut) et en moyenne zonale dans l'Atlantique (bas). Les courbes sur la figure du bas représentent l'horizon de saturation de l'ion de carbonate pour l'aragonite, séparant les eaux sous-saturées des eaux sur-saturées, pour le pré-industriel (blanc, pointillés), 1994 (blanc, continu) et 2100 pour deux scénarios (noir, continu et noir, pointillés) (d'après Orr et al., 2005).

Nom :

Prénom :

salle n° :

Question I-C-3 : En utilisant les résultats présentés sur le document 9, que pouvez-vous conclure des effets potentiels de l'augmentation du CO₂ dans l'atmosphère sur la chimie et la biologie des océans au cours des prochaines décennies ?

Réponse à la question I-C-3.

Le document montre l'évolution dans le temps de l'horizon de saturation pour l'aragonite (une forme de carbonate de calcium). Cet horizon sépare des eaux sur-saturées, au dessus, et des eaux sous-saturées (où l'aragonite se dissout chimiquement) au dessous.

L'acidification de l'océan entraîne une remontée vers la surface de cet horizon. Les modèles prévoient que cet horizon remonterait de plusieurs km dans l'atlantique nord, de plusieurs centaines de mètres dans les autres bassins, parvenant même en surface dans l'océan Austral et dans le Pacifique Nord.

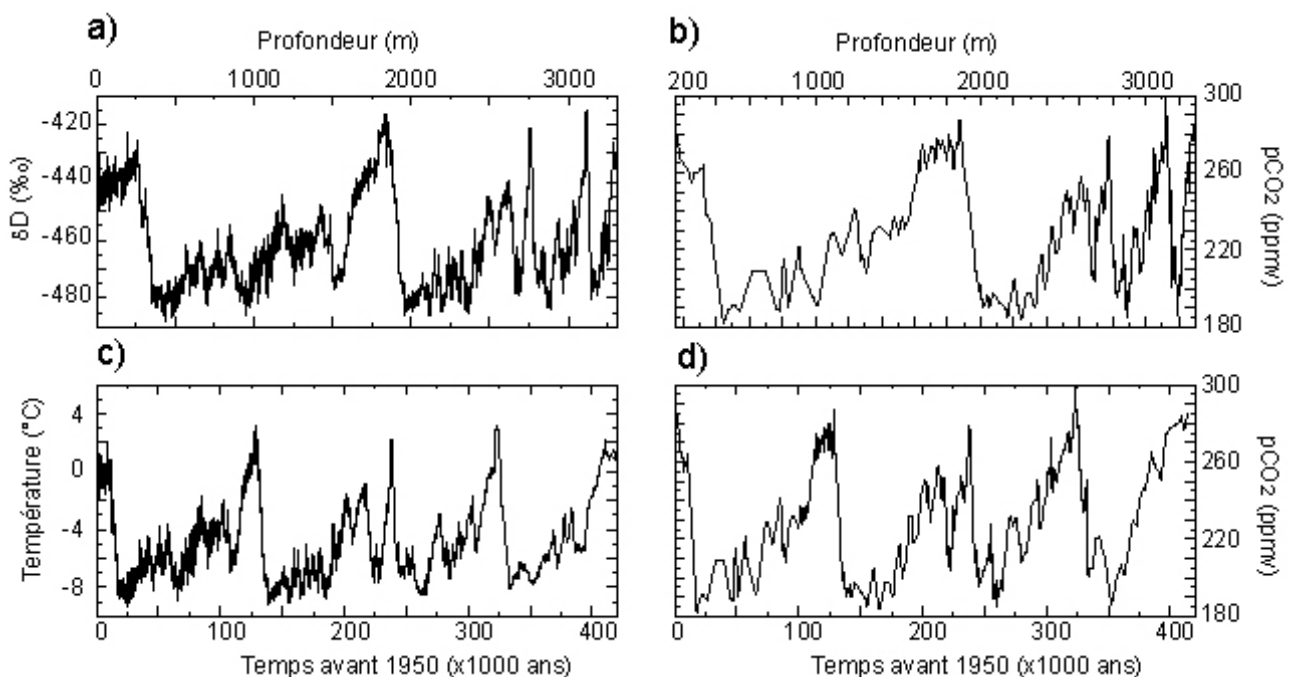
Les conséquences sur la vie marine pourraient être importantes. Plusieurs organismes calcifiants (coraux d'eaux froides, ptéropodes, ...) qui synthétisent de l'aragonite vivent dans des eaux de surface et seront donc potentiellement touchés par la sous-saturation. Les conséquences sur l'ensemble de l'écosystème sont encore largement inconnues.

- **Partie II. Cycle du carbone et couplage au système climatique au cours du dernier million d'années.**

Dans cette partie, nous nous intéressons au cycle du carbone au cours du dernier million d'années et au couplage de ce cycle au système climatique. Les données utilisées proviennent de l'analyse des forages polaires réalisés sur le continent antarctique, à Vostok et à Dome C (EPICA).

○ **A. De la glace aux courbes de température et CO₂ en fonction du temps.**

Les enregistrements de la température et du CO₂ à partir des archives que constitue la glace polaire sont un outil essentiel permettant de comprendre le fonctionnement du cycle du carbone et son couplage au système climatique au cours du dernier million d'années. Le document 10 vous montre les résultats du forage de Vostok : les courbes brutes de δD et CO₂ en fonction de la profondeur (a et b) et les courbes de température et de CO₂ en fonction du temps (c et d), déduites des précédentes.



Document 10 – Quelques résultats issus du forage de Vostok, en Antarctique. En (a) et (b), δD et pCO₂ en fonction de la profondeur à laquelle la glace a été prélevée et en (c) et (d), température déduite du δD et pCO₂ en fonction du temps, compté en années avant 1950 (d'après Petit et al., 1999).

Nom :

Prénom :

salle n° :

Question II-A : Expliquez les différentes étapes qui permettent de passer des premières courbes (a et b) aux secondes (c et d) ? Peut-on directement comparer les deux courbes en fonction du temps pour déterminer qui, du CO₂ ou de la température, précède l'autre ?

Réponse à la question II-A

La première étape pour passer des courbes a et b aux courbes c et d consiste à dater la glace à différentes profondeurs. Cette étape n'est pas triviale, car la glace a tendance à se compacter avec le temps et l'enfouissement : les 1000 mètres de glace correspondent à 75 000 ans, les 1000 mètres situés entre 2000 et 3000 m de profondeur correspondent par contre à plus de 150 000 ans.

Plusieurs techniques sont / ont été utilisées : datation en utilisant des niveaux de cendres qui correspondent à des éruptions volcaniques majeures datées par ailleurs, utilisation du Be10, utilisation de modèles physiques qui calcule la compaction et l'écoulement de la calotte polaire en fonction du temps.

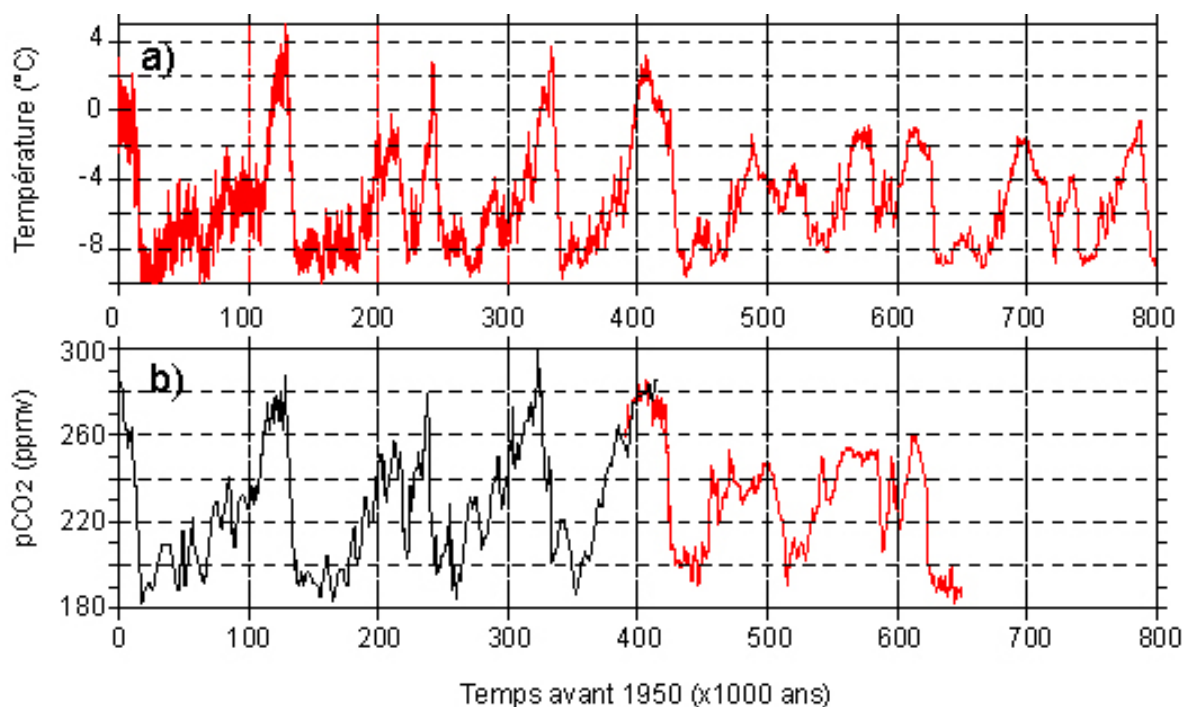
Le CO₂ est mesuré directement dans les bulles d'air coincées entre les cristaux de glace. Le dD est mesuré dans l'eau de glace. Une relation liant la température du site et le dD des précipitations peut être déduite empiriquement de données additionnelles et peut être utilisée pour transformer le dD de la glace en température (du site !). Quand dD augmente, la température du site augmente également.

Ces 2 courbes ne peuvent pas être comparées directement pour déterminer qui de la température ou du CO₂ précède l'autre. En effet, le CO₂ est mesuré dans les bulles, la température à partir de la glace. Plusieurs dizaines / centaines d'années peuvent séparer l'âge de la glace et l'âge des bulles à la même profondeur : dans le névé, en surface de la calotte, l'air circule assez librement sur plusieurs dizaines de mètres. Les bulles sont dites fermées au delà d'une certaine profondeur, la profondeur de fermeture.

○ **B. Une corrélation entre la température et le CO₂ ?**

▪ 1. Des données pour les derniers 800 000 ans.

Un nouveau forage réalisé à Dome C (programme EPICA), également situé au centre du continent antarctique, a permis de prélever de la glace plus vieille qu'à Vostok, et donc de prolonger les courbes de température et de CO₂ déduites du forage de Vostok. Le document 11 vous présente ces courbes pour les derniers 800 000 ans.



Document 11 – Température (déduite du δD) et CO₂ enregistrés dans les glaces prélevées à Vostok (noir) et à Dome C (rouge) au cours des derniers 800 000 ans (d'après Siegenthaler et al., 2004).

Nom :

Prénom :

salle n° :

Question II-B-1 : Que peut-on en déduire quant à la corrélation entre CO₂ et température en Antarctique au cours du dernier million d'années ?

Réponse à la question II-B-1

Sur la période de Vostok, comme sur celle d'EPICA, CO₂ et température en antarctique semblent bien corrélés.

Pour les 400 premiers ka, le CO₂ varie entre 180 et 280 ppm, la température entre -10°C et 2°C ; entre 400 et 650 ka, le CO₂ varie entre 200 et 250 ppm, la température entre -8°C et -2 °C.

Dans les 2 cas, la relation est similaire :

$T = \alpha \text{ pCO}_2 + \beta$ avec $\alpha = 1/8.33 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{ppm}$ et $\beta = -30^\circ\text{C}$ [cela n'est pas demandé explicitement donc pas attendu...]

Cette corrélation ne nous renseigne pas sur les mécanismes, ni sur lien cause –conséquence (attention !).

▪ 2. Mécanismes des variations de la pCO₂ : la biosphère continentale.

Les raisons permettant d'expliquer la corrélation décrite précédemment et les variations d'assez forte amplitude du CO₂ dans l'atmosphère entre périodes glaciaires et interglaciaires sont encore largement discutées par la communauté scientifique. Certaines des hypothèses envisagées font intervenir des échanges avec la biosphère continentale. Ces échanges peuvent être en partie contraints en analysant les variations du $\delta^{13}\text{C}$. Les mesures du $\delta^{13}\text{C}$ dans les coquilles de foraminifères prélevés dans des carottes sédimentaires marines montrent une diminution moyenne du $\delta^{13}\text{C}$ dans l'océan de l'ordre de -0,3 / -0,4 ‰ au dernier maximum glaciaire (DMG) par rapport à l'Holocène.

Nom :

Prénom :

salle n° :

Question II-B-2 : Que peut-on en déduire quant à la contribution de la biosphère continentale à la variation du CO₂ atmosphérique entre périodes glaciaires et interglaciaires ?

Réponse à la question II-B-2

La biosphère continentale est largement appauvrie en carbone 13 (de -12‰ à -25‰ pour les plantes en C4 et C3, respectivement). Une diminution moyenne du C13 dans l'océan, réservoir le plus important de carbone sur ces échelles de temps, peut s'interpréter comme un transfert de carbone pauvre en C13 de la biosphère continentale à l'océan.

Au dernier maximum glaciaire, la biosphère continentale est donc a priori moins importante (en masse de carbone). Elle ne contribue pas aux variations « reconstruites » du CO₂ dans l'atmosphère, au contraire même. Elle aurait conduit à une diminution du CO₂ atmosphérique du Dernier Maximum glaciaire à l'actuel....

▪ 3. Mécanismes des variations de la pCO₂ : l'océan.

De nombreux mécanismes proposés pour expliquer les variations du CO₂ atmosphérique sont liés au fonctionnement du cycle du carbone dans l'océan. L'un de ces mécanismes fait intervenir le cycle du fer.

Question II-B-3-a : En analysant les documents 12 et 13, proposez une hypothèse qui permette d'expliquer une partie des variations de CO₂ entre périodes glaciaires et périodes interglaciaires. Quelle fraction de ces variations pourrait expliquer l'hypothèse que vous venez de formuler ?

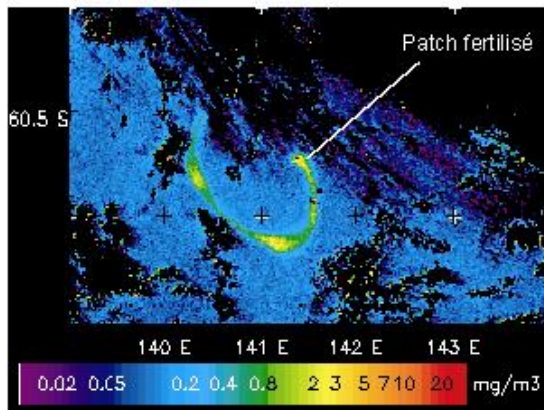
Réponse à la question II-B-3-a

L'expérience SOREE, réalisée dans l'océan austral, montre clairement que le fer est un élément micronutritif limitant et que l'augmentation de sa concentration conduit à une fertilisation de l'écosystème : plus de production (donc de chlorophylle dans l'eau) et diminution de la pCO₂ atmosphérique.

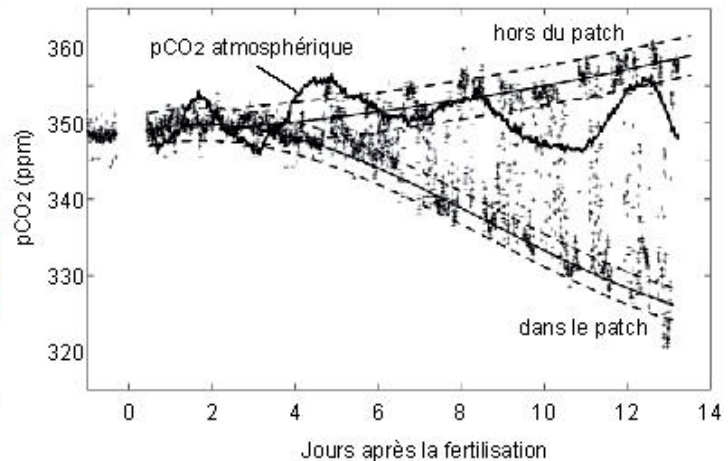
Les données paléo, reconstituant les dépôts de fer à partir des concentrations de poussières mesurées dans la glace, montre des dépôts élevés pendant les périodes froides (climat plus aride, plus de désert, plus de soulèvement de poussières...).

On peut faire ici l'hypothèse d'une fertilisation de la biosphère marine en période froide qui aurait pompé du CO₂ depuis l'atmosphère vers le réservoir océanique. Pendant la transition glaciaire-interglaciaire, les dépôts de fer diminuent, entraînant une diminution de la productivité marine et un dégazage partiel du CO₂ océanique vers l'atmosphère.

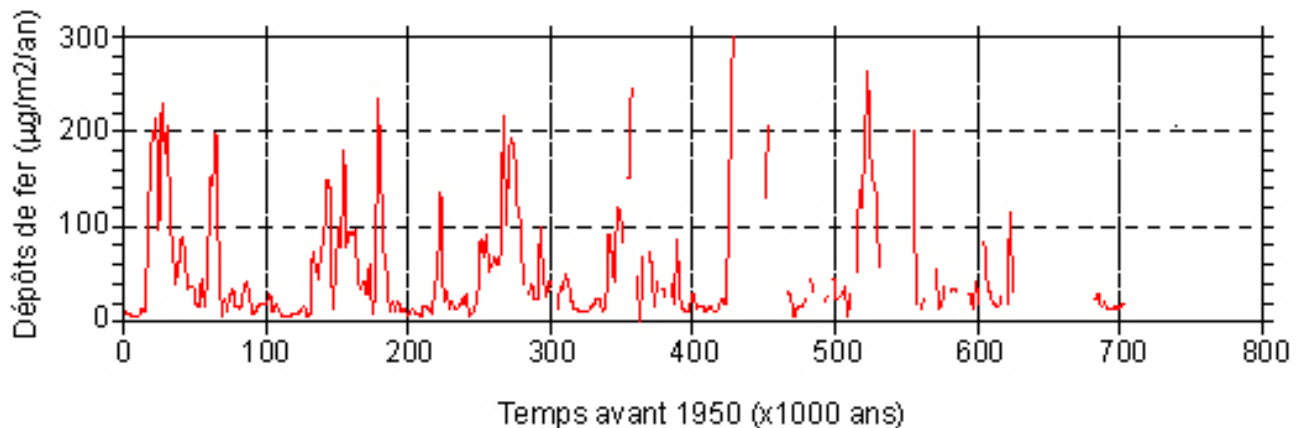
Nom :	Prénom :	salle n° :
<p>Cette hypothèse pourrait expliquer une partie de la variation glaciaire-interglaciaire du CO₂ dans l'atmosphère. Seulement une partie... En effet, de -120 ka à -100ka (du stade 5e au stade 5a), le CO₂ diminue de près de 50 ppm alors que les poussières n'ont que très peu augmenté (à EPICA au moins).</p>		



(image satellite après 14 jours)



Document 12 – Résultats de l'expérience SOIREE, d'ensemencement en fer des eaux de surface dans l'océan austral. Lors d'une campagne océanographique au sud de l'Australie à 60°S, plusieurs centaines de kilogrammes de sulfates de fer ont été déversés en surface de l'océan. L'image de gauche est une image de couleur de l'eau obtenue par l'instrument satellitaire SeaWiFS. Elle représente la concentration de chlorophylle (en mg/m³) dans les eaux de surface, 14 jours après la date d'ensemencement. La figure de droite rapporte les mesures de CO₂ dans l'air (ligne noire continue), et dans l'eau de surface (points), réalisées au cours de la campagne et pendant les 14 jours suivant l'ensemencement. Certaines mesures ont été réalisées hors du patch ensemencé (hors patch), d'autres à l'intérieur (dans le patch) (d'après Boyd *et al.*, 2000).



Document 13 – Dépôts de fer au site Dome C au cours des derniers 700 000 ans. Ces dépôts de fer sont déduits de mesures de concentrations dans la glace prélevée lors du forage et d'une estimation du taux de dépôts de la neige au site Dome C (d'après Wolff *et al.*, 2006).

Nom :

Prénom :

salle n° :

Question II-B-3-b : En vous basant sur vos connaissances du cycle du carbone dans l'océan, pouvez-vous formuler d'autres hypothèses qui permettraient d'expliquer les variations du CO₂ dans l'atmosphère entre périodes glaciaires et périodes interglaciaires ?

Réponse à la question II-B-3-b

D'autres hypothèses pourraient expliquer les variations du CO₂ atmosphérique...

- la diminution de température en surface de l'océan au Dernier maximum glaciaire augmente fortement la solubilité du gaz CO₂ et donc le flux de carbone de l'atmosphère vers l'océan.
- d'autres apports de nutriments vers l'océan en période froide sont aussi envisagées : augmentation de l'altération sur les plateaux continentaux découverts à cause de la baisse du niveau marin,
- modification de la circulation de l'océan (stratification), de la couverture de glace de mer qui ralentissent les échanges entre océan profond (un énorme réservoir de carbone) et l'atmosphère.
- et beaucoup d'autres....

- **Partie III. Variabilité naturelle du cycle du carbone au Phanérozoïque.**

Dans cette partie, nous nous intéressons au cycle du carbone à l'échelle de temps du Phanérozoïque. L'objectif des différentes questions qui vous sont posées est de mettre en évidence des variations de la teneur en CO₂ atmosphérique au cours des temps géologiques et d'identifier quelques facteurs responsables de ces variations afin d'entrevoir comment le cycle du CO₂ atmosphérique peut être modélisé à l'échelle des temps géologiques.

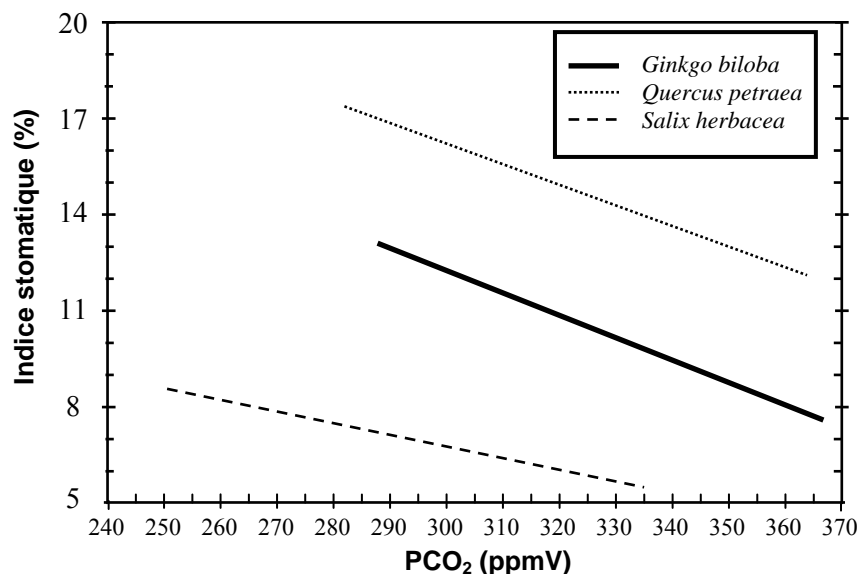
- **A. Reconstruction des paléo-teneurs atmosphériques de CO₂**

- **1. Établissement d'une relation entre pCO₂ et indice stomatique**

La quantité de stomates par unité de surface des feuilles des végétaux dépend pour partie de la concentration en CO₂ de l'atmosphère. Ce paramètre peut donc potentiellement servir de traceur de la pCO₂ pour les temps anciens. On définit l'indice stomatique (SI) comme suit :

$$SI = SD / (SD + ED)$$

SD étant la densité stomatique (c'est-à-dire le nombre de stomates par unité de surface foliaire) et ED étant la quantité de cellules épidermiques présentes par unité de surface foliaire.



Document 14 - Variations de l'indice stomatique en fonction de la teneur atmosphérique en CO₂ mesurées pour trois espèces différentes lors d'expériences en *herbarium* (d'après Royer et al., 2001).

Nom :	Prénom :	salle n° :
--------------	-----------------	-------------------

Question III-A-1 : D'après le document 14, exprimez la relation entre l'indice stomatique SI et la concentration atmosphérique en CO₂, notée pCO₂, pour *Ginkgo biloba*.

Réponses à la question III-A-1

D'après le document 14, on constate qu'il existe une relation linéaire décroissante entre l'indice stomatique SI et la teneur atmosphérique en CO₂ que l'on peut écrire $SI = a \cdot pCO_2 + b$. En prenant 2 points 1 et 2 sur la droite *Ginkgo biloba*, on obtient

$a = (SI_1 - SI_2) / (pCO_{21} - pCO_{22})$ soit $a = (11 - 8) / (318 - 361) = -0,07$

et $b = SI_1 + 0,07 \cdot pCO_{21}$ soit $b = 33,2$

$SI = -0,07 \cdot pCO_2 + 33,2$

(et en corollaire, $pCO_2 = -14SI + 474$)

En mesurant la densité stomatique d'une feuille, il est donc possible de remonter à la teneur atmosphérique en CO₂ en faisant l'hypothèse que cette relation linéaire est générale à tous les individus de l'espèce *Ginkgo biloba*

▪ 2. Mesure de paléo-teneurs en CO₂ de l'atmosphère terrestre

Question III-A-2 : En utilisant les résultats de la question précédente, calculez la concentration de CO₂ atmosphérique pour les différentes époques représentées par les échantillons actuels et fossiles reportés dans le tableau ci-dessous (compléter la colonne 4 du document 15). Qu'en déduisez-vous ?

Espèces	Age	SI	PCO ₂
<i>Ginkgo biloba</i>	1998	9,3 ±0,1	
<i>G. wyomingensis</i>	Danien, 64 ±2 Ma	4,1 ±0,2	
<i>G. adiantoides</i>	Maastrichtien, 66 ±2 Ma	8.1 ± 0,7	
<i>G. manchurica</i>	Berriasien, 142±-5 Ma	5,0 ±0,4	
<i>G. manchurica</i>	Tithonien, 146 ±5 Ma	8,0 ±0,5	
<i>G. sibirica</i>	Bajocien, 175 ±8 Ma	4,5 ±1,7	
<i>G. lunzensis</i>	Carnien, 225 ±5 Ma	6,7 ±1,4	

Document 15 - Indices stomatiques mesurés sur des représentants actuels et fossiles du genre *Ginkgo*.

Nom :	Prénom :	salle n° :
--------------	-----------------	-------------------

Réponse à la question III-A-2.

Deux points sont à noter :

1- le calcul d'incertitude ne prend pas en compte l'incertitude sur la relation entre SI et pCO₂ mais uniquement l'incertitude sur la mesure d'indice stomatique des fossiles

2- la détermination de paléo-pCO₂ requiert 1- de généraliser la relation obtenue sur *Ginkgo biloba* à tous les spécimens du genre Ginkgo et 2- une hypothèse actualiste, c'est-à-dire que la relation entre SI et pCO₂ est restée constante au cours des temps géologiques.

Cette dernière hypothèse est hautement discutable mais permet de suggérer au premier ordre qu'il ya eut des variations de la teneur en pCO₂ au cours des temps géologiques.

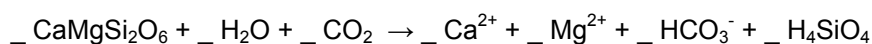
○ **B. Place de l'altération dans le cycle géologique du carbone**

L'objectif de cette partie est de montrer le rôle de l'altération dans le cycle du carbone et d'identifier quelques paramètres faisant varier l'intensité de ce processus sur la Terre actuelle.

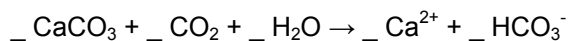
▪ 1. *Bilan chimique des réactions d'altération*

Les équations bilan non équilibrées des réactions de dissolution d'un silicate, d'un sulfate et d'un carbonate sont données ci-dessous.

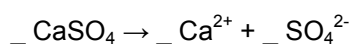
Réaction d'hydrolyse totale d'un diopside :



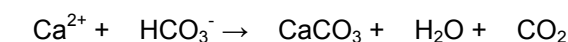
Réaction d'hydrolyse d'une calcite :



Réaction d'hydrolyse d'un gypse :



Réaction de précipitation des carbonates :

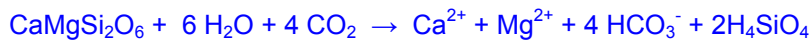


Nom :	Prénom :	salle n° :
--------------	-----------------	-------------------

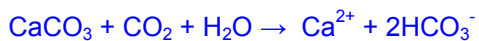
Questions III-B-1 : Afin de déterminer la stœchiométrie de ces réactions, équilibrez-les. Ensuite, pour chaque minéral (diopside, calcite, gypse), faites le bilan final en termes de rejet/fixation de CO₂ lorsque le couplage des réactions de dissolution du minéral et de précipitation des carbonates a lieu.

Réponse aux questions III-B-1.

Hydrolyse d'un diopside :



Réaction d'hydrolyse d'une calcite :



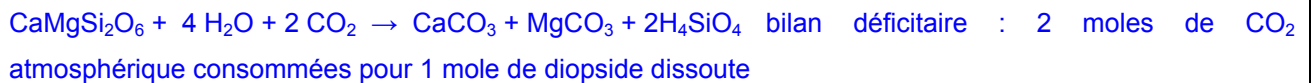
Réaction d'hydrolyse d'un gypse :



Réaction de précipitation des carbonates :



Couplage dissolution/précipitation pour diopside (on peut précipiter les carbonates sous forme de CaCO₃ mais aussi de MgCO₃)



Couplage dissolution/précipitation pour calcite



Couplage dissolution/précipitation pour gypse



▪ 2. Étude de l'altération dans des bassins monolithologiques

On a fait des mesures chimiques sur un certain nombre de cours d'eau dont le bassin versant, dit monolithologique, est constitué d'un seul et même type de roche.

• a. Étude d'échantillons

Vous disposez d'un échantillon de roche et de la lame mince associée que l'on peut trouver dans l'un de ces bassins versants.

Nom :

Prénom :

salle n° :

Questions III-B-2-a : En justifiant votre réponse, déterminez la nature de la roche et, à l'aide de dessins légendés récapitulant vos observations, montrez comment l'altération a affecté cette roche.

Réponse aux questions III-B-2a

Il s'agissait d'échantillons de basaltes de la chaîne des puys (Puy de la vache) partiellement altérés. Sur l'échantillon macroscopique fraîchement coupés, on pouvait noter la relative porosité liée aux vésicules, la pellicule d'altération à la surface des blocs. Sur les lames minces, il fallait noter les caractères classiques d'un basalte : matrice vitreuse avec microlithes de feldspath, les phénocristaux de pyroxène. Sur certains échantillons, quelques olivines. Il fallait ensuite noter qu'en certains endroits, la partie vitreuse semble changer de couleur ; au contact des vésicules notamment, on voit le développement d'une phase d'altération rougeâtre et amorphe, les microlithes de feldspath ont tendance à être moins visibles ; enfin les phénocristaux de ferromagnésiens présentent une couronne brune/rougeâtre d'un matériau amorphe (N.B : cela n'était pas demandé mais pour information il peut s'agir d'aluminosilicates (type allophanes) et/ou d'oxyhydroxydes de fer).

Nom :	Prénom :	salle n° :
--------------	-----------------	-------------------

- b. Quantification des ions hydrogénocarbonates exportés dans des bassins monolithologiques

Questions III-B-2-b : Comment expliquez-vous la richesse systématique en ions hydrogénocarbonates (HCO_3^-) des cours d'eau répertoriés dans le document 16 ? Connaissant l'écoulement spécifique (runoff), c'est-à-dire la quantité d'eau qui s'écoule par unité de surface et de temps, déduisez, pour chaque bassin, la quantité d'ions hydrogénocarbonates exportés par ces rivières par unité de temps et de surface (remplir la colonne correspondante du document 16). D'après les équations-bilan précédentes, quel est le devenir ultime des ions hydrogénocarbonates ? Par conséquent, quel processus important dans le cycle du carbone est quantifié par le taux spécifique d'exportation des ions hydrogénocarbonates ?

Nom du bassin versant	HCO_3^- ($\mu\text{mol/l}$)	Ruissellement (= runoff) en $\text{mm}^3/\text{mm}^2/\text{an}$	Taux spécifique d' HCO_3^- exportés par les rivières ($\text{mol}/\text{km}^2/\text{an}$)	T (Kelvin)	$1000/T$ (K^{-1})
Columbia P.	354	1053		280,4	
Deccan	2719	463		300	
Hawaii	407	1612		289	
Islande	415	1883		275	
Islande	480	2432		275	
Java	1987	4052		297,8	
Massif Central	686	406		281,7	
Massif Central	698	478		281,7	
Mont Cameroun	1623	2120		298,6	
Parana	817	1020		293,2	
La Réunion	1311	2433		290	
Açores	763	734		289	

Document 16 – Teneurs en hydrogénocarbonates, température et ruissellement mesurés pour quelques cours d'eau drainant un seul et même type de lithologie (d'après Dessert *et al.*, 2003).

Nom :

Prénom :

salle n° :

Réponse aux questions III-B-2-b

a- Les bassins versant du doc 16 sont tous constitués principalement de basaltes. Les ions hydrogénocarbonates ne proviennent par conséquent pas de la dissolution de carbonates, mais de la fixation de CO_2 atmosphérique lors de la dissolution des silicates (cf. réaction de dissolution de l'augite dans III.B.1 par exemple).

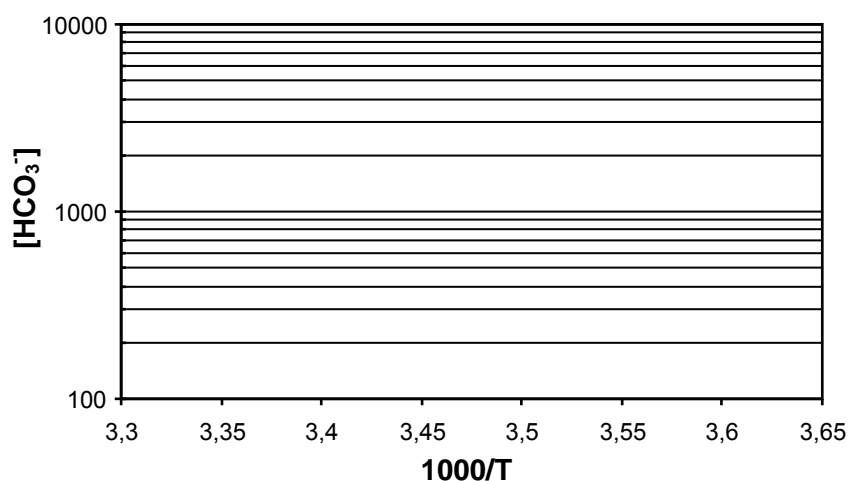
b- Le taux spécifique d' HCO_3^- exporté par un cours d'eau est égal à la concentration en HCO_3^- de ce cours d'eau multiplié par son écoulement spécifique. Il fallait cependant faire des conversions d'unité préalablement. Les concentrations étaient en $\mu\text{mol/l}$ soit 10^{-6}mol/dm^3 soit 10^{-6}mol/km^3 . Le taux d'écoulement en $\text{mm}^3/\text{mm}^2/\text{an}$ soit mm/an soit 10^{-6}km/an . Il suffisait donc de multiplier les deux colonnes du tableau pour obtenir la troisième.

c- Le devenir ultime des ions hydrogénocarbonate est d'être incorporé dans des carbonates de calcium ou de magnésium et donc d'être piégé dans les roches.

d- Le taux spécifique d'exportation des carbonates est par conséquent une mesure de la quantité de CO_2 atmosphérique piégé par un bassin versant donné par dissolution des silicates.

- c. Facteurs faisant varier l'exportation des ions hydrogénocarbonates dans un cours d'eau

Questions III-B-2-c-i : Reportez sur le graphique donné ci-dessous (semi-log) la concentration en ions hydrogénocarbonates en fonction de $1000/T$ pour les points mesurés du document 16. Quelle est l'expression de la courbe obtenue. Qu'en déduisez-vous ? Quel type de rétroaction cela implique pour le cycle du CO_2 atmosphérique ?



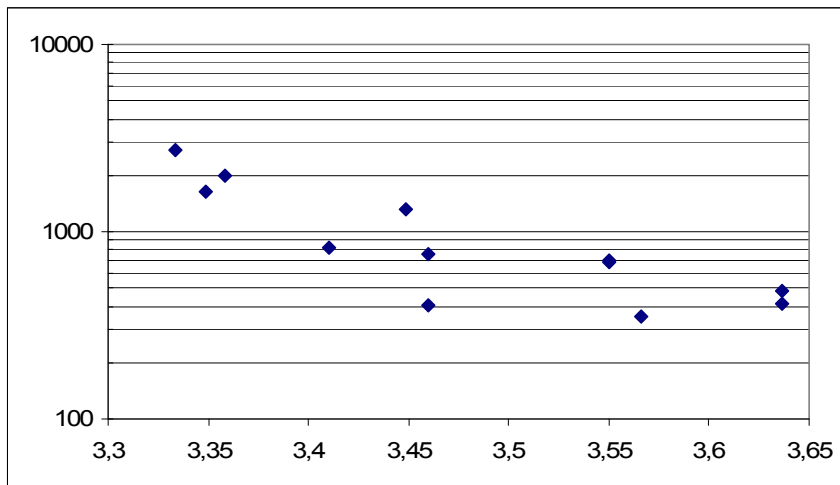
Nom :

Prénom :

salle n° :

Réponse aux questions III-B-2-c-i

Il fallait préalablement remplir la dernière colonne du tableau 16 égale à $1000/T$ (K).



Il est possible de tracer une droite de régression à travers ces points. On a donc une relation entre la concentration en ions hydrogénocarbonates et la température du type :

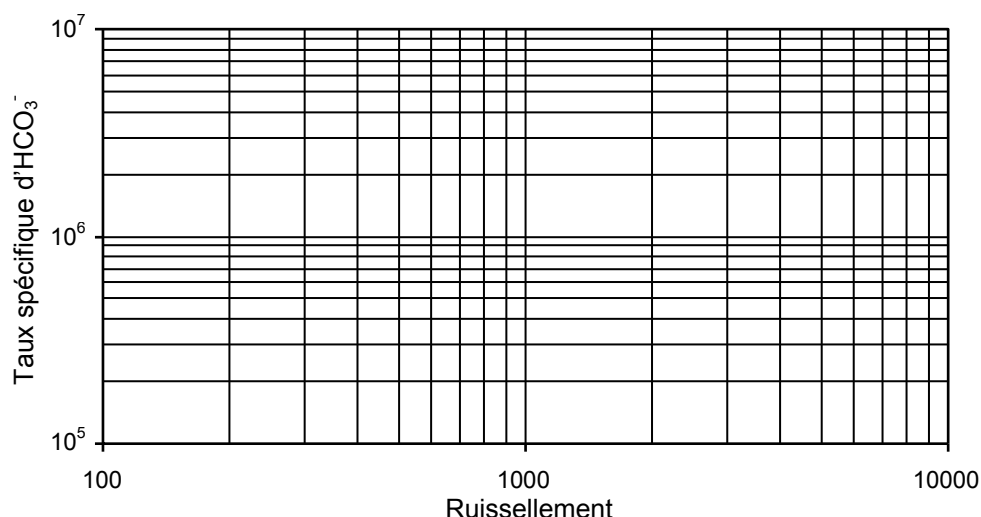
$\text{Log}([\text{HCO}_3^-]) = -a/T + b$ avec a positif

Soit $[\text{HCO}_3^-] = C \cdot \exp(-a/T)$, C est une constante (égale à $\exp(b)$).

Ce type de dépendance vis-à-vis de la température est classique pour de nombreuses réactions chimiques et est nommé loi d'Arrhénius. De ces données sur une certaine diversité de bassins versants à travers le monde, on peut donc voir que la température est un paramètre pouvant contrôler l'intensité du piégeage de CO_2 atmosphérique par l'altération des silicates.

Cela implique une rétroaction négative. Quand la température atmosphérique augmente, le piégeage de CO_2 atmosphérique augmente d'après la relation établie. L'effet de serre diminuant, la température de l'atmosphère diminue alors, diminuant l'altération etc... On a donc ici un processus potentiellement régulateur de la teneur en CO_2 de l'atmosphère.

Questions III-B-2-c-ii : Reportez dans le graphique ci-dessous (log-log) les taux spécifiques d'ions hydrogénocarbonates exportés en fonction du ruissellement pour les différentes rivières du document 16. En considérant séparément les groupes (Columbia, Hawaii et Islande), (Massif Central, Açores, Parana, La Réunion) et (Deccan, Cameroun, Java), discutez les relations observées.

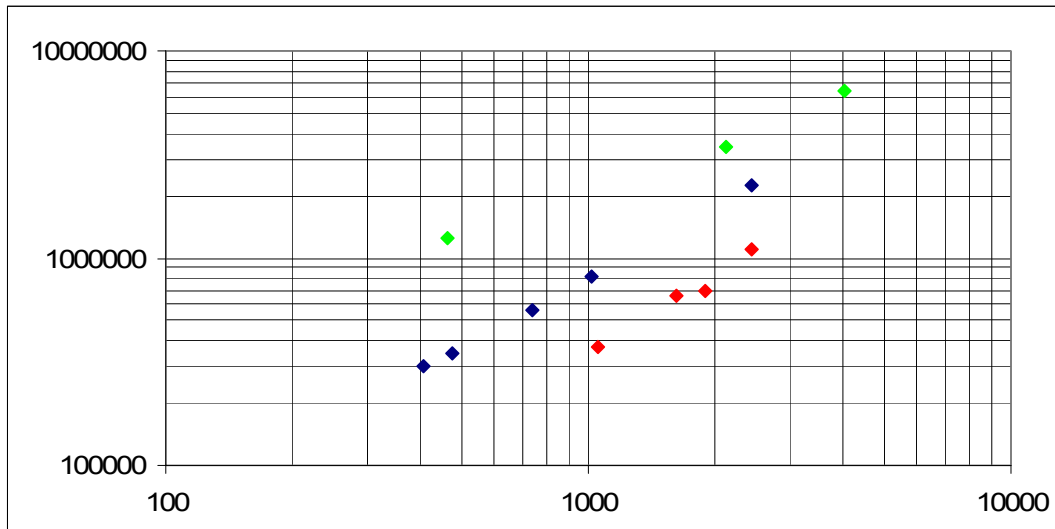


Nom :

Prénom :

salle n° :

Réponse aux questions III-B-2-c-ii



Si on distingue les 3 groupes, on peut tracer 3 régressions linéaires :

$\text{Log}([\text{HCO}_3^-]) = a \cdot \text{Log}(\text{ruissellement}) + b$ avec a et b différents selon les 3 groupes de bassins versant considérés.

Soit $[\text{HCO}_3^-] = C \cdot (\text{ruissellement})^a$ soit une relation puissance entre quantité d'ions hydrogencarbonates exportés et le ruissellement.

Le ruissellement est donc un facteur supplémentaire important dans le contrôle de l'altération des silicates. Lorsque le ruissellement augmente, l'altération augmente (le contact entre minéraux et solution augmentant) et le piégeage de CO₂ atmosphérique augmente diminuant par conséquent la température. Il s'agit d'un paramètre fort, on remarque par exemple que les basaltes islandais pompent plus de CO₂ que les basaltes du massif central malgré les différences de températures. Pour une valeur d'écoulement spécifique donnée en revanche, l'altération consomme davantage de CO₂ lorsque les températures sont plus élevées d'où les différentes relations possibles. Nous attendions des candidats qu'ils discutent au moins l'existence des différentes relations. Au premier ordre, la lithologie est la même partout. Est-ce la température, ou bien le relief ou bien l'âge des terrains qui contrôlent ces différences ?

Nom :

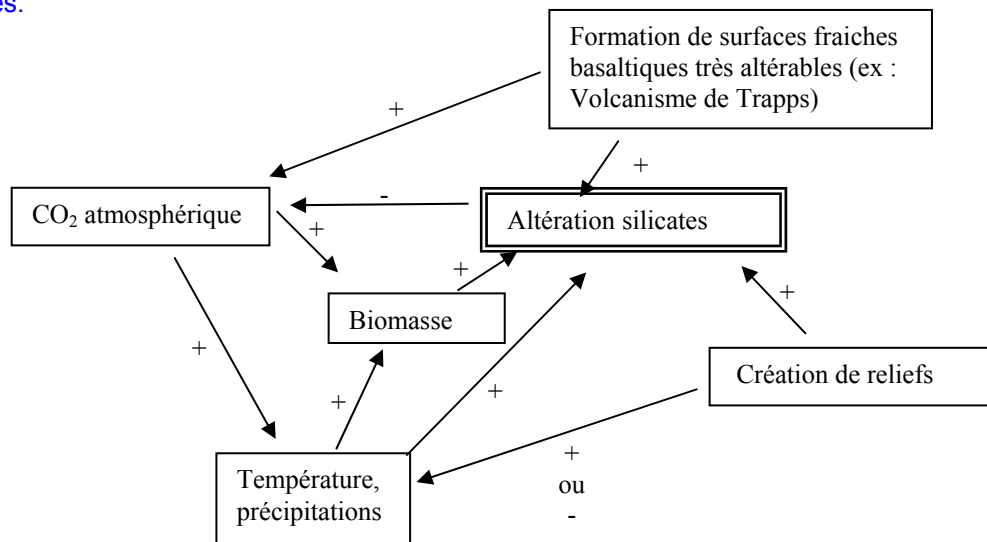
Prénom :

salle n° :

Questions III-B-2-c-iii : D'après vos connaissances, proposez d'autres facteurs pouvant faire varier les taux d'exportation d'ions hydrogénocarbonates. Vous ferez un schéma résumant les paramètres influençant à l'échelle des temps géologiques l'altération des silicates et indiquerez comment ils impliquent des boucles de rétroactions.

Réponse aux questions III-B-2-c-iii

Par exemple, d'autres facteurs sont la création de relief et de pentes permettant notamment une dénudation plus efficace des roches, l'action du vivant (rhexistasie/biostasie), la composition minéralogique de la roche (certaines phases s'altérant plus vite que d'autres), la formation de surfaces fraîches lors d'épisodes volcaniques.



Nom :

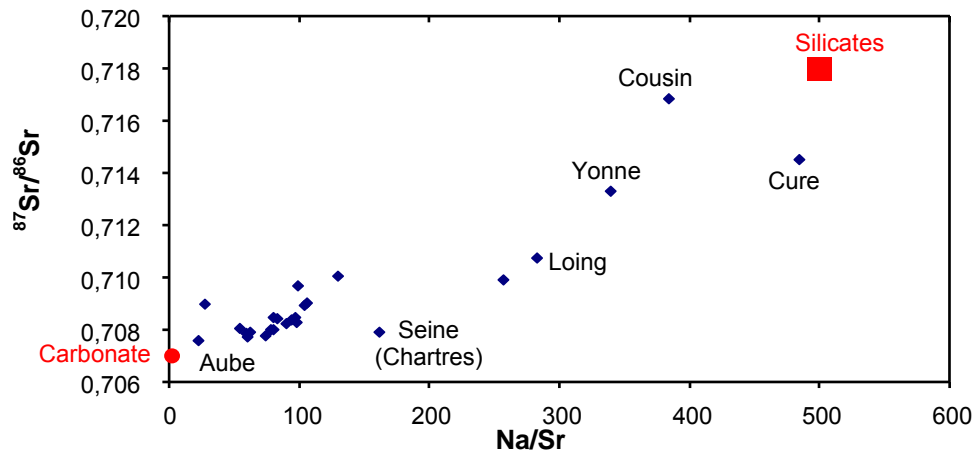
Prénom :

salle n° :

▪ 3. Étude de l'altération dans des bassins polyolithologiques

Généralement les bassins versants ne sont pas monolithologiques.

Questions III-B-3 : D'après les équations-bilan écrites plus haut, quel problème cela pose t-il en ce qui concerne l'interprétation des teneurs en ions hydrogénocarbonates des eaux de rivière ? Expliquez, de manière concise et en vous appuyant sur le document 17, comment on peut remédier à ce problème.



Document 17 - $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus Na/Sr d'eaux prélevés en différents endroits et affluents du bassin versant de la Seine. Les valeurs moyennes des roches carbonatées et silicatées du bassin parisien sont reportées en rouge sur le même graphique

(d'après Roy et al., 1999).

Réponse aux questions III-B-3

Lorsque les bassins ne sont pas monolithologiques, il est plus difficile de relier la concentration en ions hydrogénocarbonates à la quantité de CO_2 atmosphérique piégée par l'altération des silicates. En effet une partie des ions hydrogénocarbonates peut provenir de la dissolution des carbonates (qui au total, après précipitation de carbonates dans l'océan ont un bilan nul vis-à-vis du CO_2 atmosphérique). Enfin s'il y a présence de sulfates minéraux dans le bassin versant, le bilan peut aussi être modifié significativement.

Pour éventuellement remédier à ce problème et quantifier la part relative des silicates et des carbonates dans la production d'ions hydrogénocarbonates on peut essayer de tracer ces deux composantes. Pour cela on peut par exemple mesurer les compositions isotopiques du strontium dans les eaux du bassin versant ainsi que le rapport Na/Sr. Cela permet de discriminer deux pôles : un pôle carbonate et un pôle silicate. Chaque point est un mélange de ces deux pôles avec une proportion relative donnée qui peut être facilement calculée sur ce genre de diagramme. On connaît alors la contribution des silicates et donc le bilan en termes de CO_2 atmosphérique piégé.

Nom :

Prénom :

salle n° :

○ **C. Évolution du réservoir de carbone organique terrestre à l'échelle des temps géologiques**

Le but de cette partie est d'évoquer les liens existant entre le réservoir de carbone organique terrestre et l'évolution du CO₂ à l'échelle des temps géologiques.

▪ *1. Étude d'échantillons*

Vous disposez de deux échantillons macroscopiques. Le premier a été prélevé dans la zone Briançonnaise des Alpes occidentales, le second au niveau des Schistes Lustrés alpins.

Questions III-C-1 : En illustrant votre réponse à l'aide de dessins résumant vos observations, identifiez les échantillons fournis. Qu'illustrent ces échantillons par rapport au cycle du carbone ?

Réponse aux questions III-C-1

Deux échantillons macroscopiques étaient proposés : 1 charbon de la zone houillère du Briançonnais dans lequel pouvaient être observés éventuellement des cristaux de quartz détritiques, des cristaux de pyrite formés pendant la diagenèse, des textures liés à une histoire tectonique : foliation, microplis, cisaillements.

L'autre échantillon était un schiste noir avec alternance de lits clairs et de lits foncés riches en carbone pouvant être trouvé classiquement dans la zone de flyschs à Helminthoïdes ou dans la zone des schistes lustrés.

Ces échantillons montrent l'existence d'un réservoir dit géologique de carbone organique, c'est-à-dire qu'en plus du réservoir carbonate, il existe une part assez importante de carbone sous forme de carbone organique piégée dans les roches. Ce carbone, « évolué » suite aux épisodes de diagenèse et métamorphisme qu'il a subis, est très résistant et peut probablement être recyclé plusieurs fois lors des épisodes d'altération et de sédimentation sans être dégradé en CO₂.

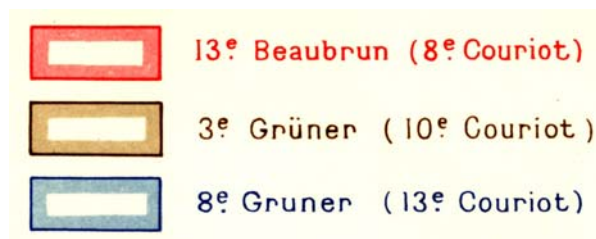
Nom :

Prénom :

salle n° :

- 2. Étude de la carte minière du Bassin de Saint-Étienne au 1/10 000^{ème}
 - a. Coupe géologique

Les deux extraits de carte présentés dans cet exercice sont des documents d'application illustrant l'exploitation du bassin houiller de Saint-Étienne. Y sont représentés les principaux faisceaux productifs et leur limites suivant le codage suivant (exemple concernant le document 18a) :



La géométrie de ces faisceaux est déterminée par les isohypses du mur, et le nom des faisceaux dérive de celui de puits d'exploitation.

Le premier extrait (document 18a) concerne le « groupe de Firminy » et le second extrait (document 18b), situé environ quatre kilomètres au sud, concerne le « groupe de La Ricamarie ».

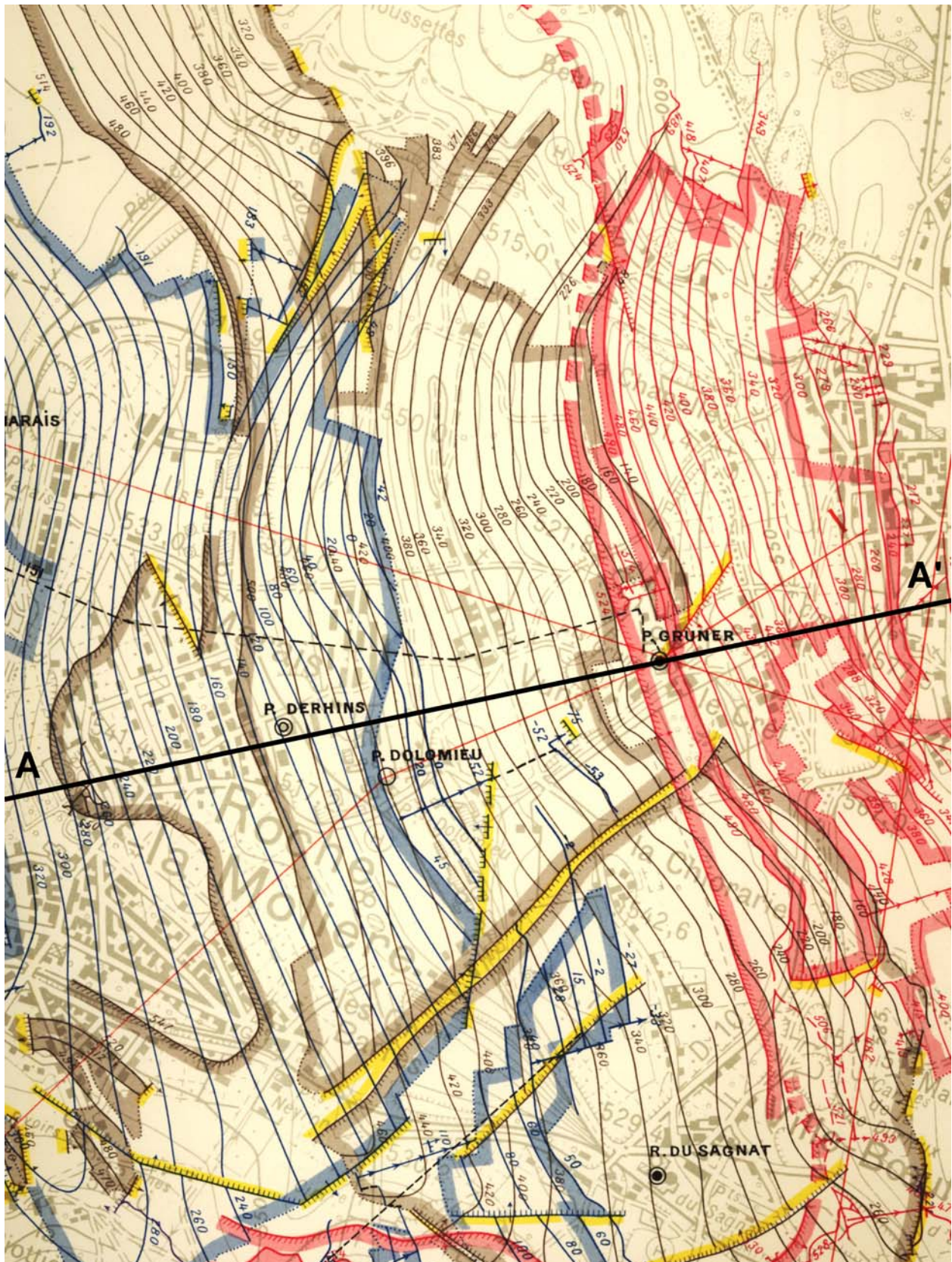
La totalité des faisceaux identifiables sur les deux extraits est résumé dans la figure ci-dessous.



Nom :

Prénom :

salle n° :



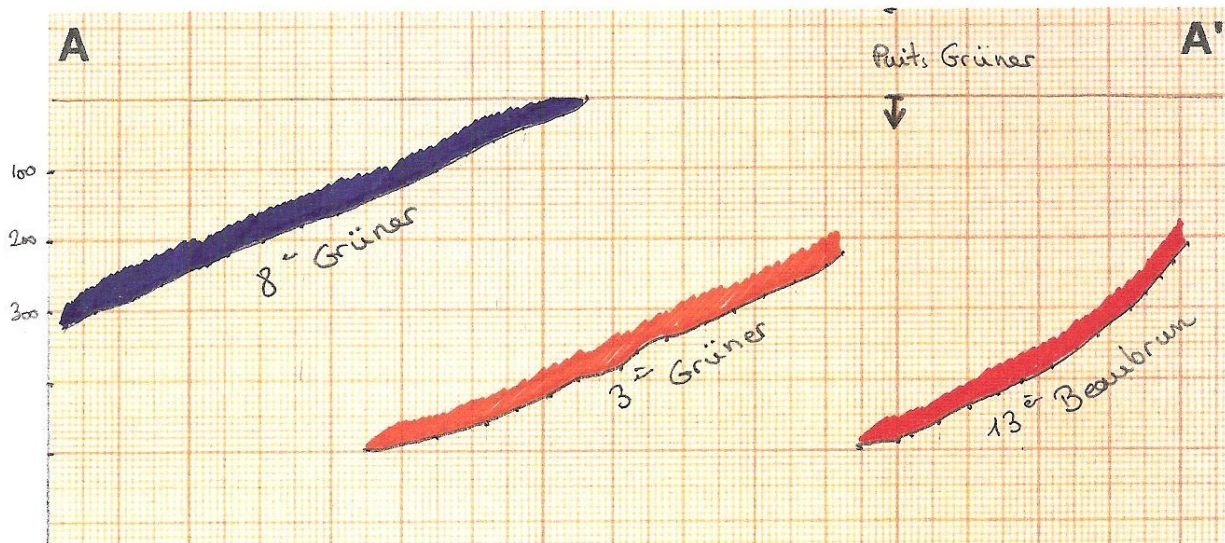
Document 18a – Extrait de la carte centré sur le puit Grüner (groupe de Firminy). La couleur des isohypses correspond à celles des faisceaux, leur valeur (rapportée au zéro géographique) est celle du mur du faisceau. Les zones faillées sont surlignées en jaune.

Nom :

Prénom :

salle n° :

Question III-C-2-a-1 : Construisez une coupe géologique représentant les différentes couches exploitées selon le profil A-A' tracé sur le document 18a.



Question III-C-2-a-2 : Que pouvez-vous déduire de l'analyse géométrique en trois dimensions du document 18a (rejet de faille, implantation des puits, limites d'exploitation,...) ?

Réponse aux questions III-C-2-a-2

Les faisceaux pendaient vers l'Est. En reportant point par point, on obtenait les pendages précisément. La notation s'est basée sur le respect des pendages, le report des accidents tectoniques, le respect de l'échelle, la propreté de la coupe.

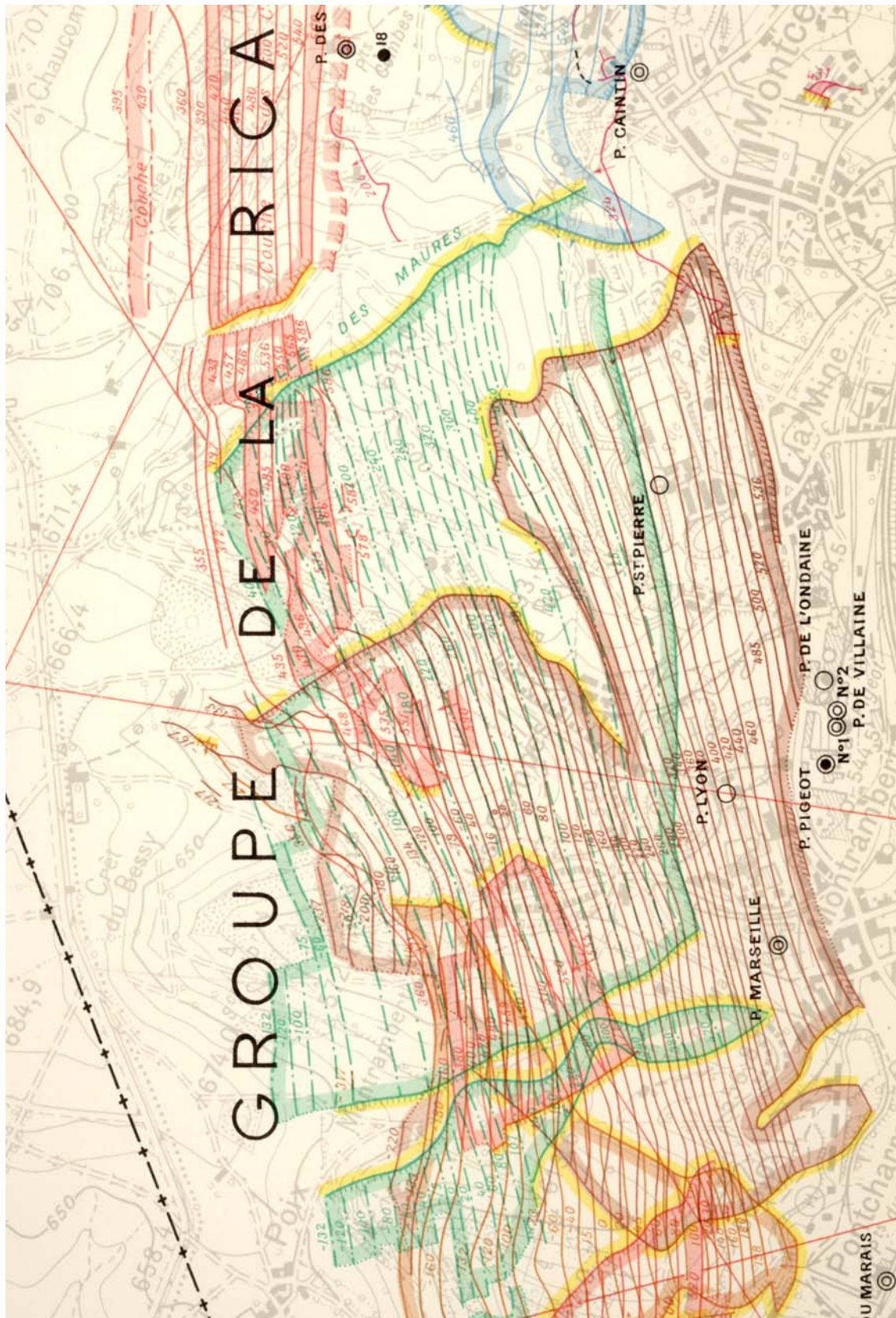
Au niveau des déductions qui pouvaient être apportées (nous n'attendions pas cette liste quasi-exhaustive) :

- remarquer la superposition des faisceaux
- Les puits sont à des endroits où plusieurs faisceaux peuvent être recoupés
- Les limites d'exploitation sont souvent liées à la présence de faille et dans des endroits où il n'y a pas besoin d'aller trop profondément pour trouver le charbon
- Sur 18a, on voit des pendages Est-Ouest, sur 18b des pendages Nord-Sud indiquant qu'entre ces deux bassins il y a eut des jeux tectoniques différents.
- des précisions pouvaient être apportés sur le jeu des failles soit des jeux verticaux (pouvant être quantifiés d'après le décalage de l'altitude des murs de part et d'autre d'une faille) ou des jeux horizontaux (déformation de ces isohypses).

Nom :

Prénom :

salle n° :



Document 18b – Extrait de carte du groupe de La Ricamarie

Nom :

Prénom :

salle n° :

- b. Synthèse

Question III-C-2-b : En vous appuyant sur l'étude des deux extraits proposés (documents 18a et 18b), et sur vos connaissances, rappeler les facteurs favorisant l'enfouissement géologique de carbone organique.

Réponse à la question III-C-2-b

Une production primaire importante (éventuellement liée à des températures élevées et/ou un apport important de nutriments limitant) est indispensable (cf. la forêt houillère du Carbonifère par exemple). Un enfouissement rapide (lié à une subsidence efficace) aidé notamment par la tectonique est une autre condition pour la préservation et la maturation de carbone organique (cf. structure tectonique des bassins houillers).

- 3. Rôle du carbone organique dans le cycle du carbone
 - a. Rôle direct

Question III-C-3-a : Après avoir rappelé l'équation-bilan de la photosynthèse, déduisez-en le(s) effet(s) d'un enfouissement accru de carbone organique sur la chimie de l'atmosphère (vous ne vous limiterez pas au carbone).

Réponse à la question III-C-3-a



1 mole de CH₂O enfouie équivaut d'après cette réaction bilan au piégeage d'une mole de CO₂ atmosphérique et à la libération d'une mole d'oxygène. Cet oxygène peut éventuellement être piégé par l'oxydation d'autres éléments (si par exemple du fer réduit ou du soufre réduit sont présents en abondance) ou alors passer dans l'atmosphère. Etant donné les quantités de carbone enfouies à certaines époques de l'histoire géologique, on peut par bilan de masse raisonnablement imaginer que la teneur en oxygène de l'atmosphère était significativement différente.

Nom :

Prénom :

salle n° :

- b. Rôle indirect

Question III-C-3-b : En vous appuyant sur le document 19, déduisez-en un effet supplémentaire des variations de la biomasse sur la composition de l'atmosphère.

Localité	Rapport flux de Ca entre zone végétale/zone nue
Alpes suisses	8
Islande de l'Ouest	5
Colorado Moutains	4
New Hampshire	10

Document 19 – Comparaison des flux de cations dissous (Ca) dans les eaux drainant une même roche recouverte soit de végétation (végétale) soit sans couverture végétale (nue) (d'après Berner et al., 1998).

Réponse à la question III-C-3-b

Une augmentation de la biomasse peut entraîner une augmentation de l'enfouissement et donc une augmentation du piégeage de CO₂. Ici on voit aussi que le vivant peut augmenter l'altération des roches (d'où l'augmentation de flux de cations dissous entre une zone nue et une zone recouverte de végétation) et donc potentiellement des silicates, contribuant ainsi à l'augmentation du piégeage de CO₂ par altération des silicates.

On peut par exemple imaginer que l'apparition de végétation au cours des temps géologiques a eu une influence importante sur les taux d'altération des silicates et donc une répercussion sur les teneurs en CO₂ atmosphérique.

Nom :

Prénom :

salle n° :

- D. Vers l'établissement d'un modèle des variations de la teneur en CO₂ atmosphérique pour les temps géologiques

- 1. Écriture de l'équation différentielle

La variation de la concentration de CO₂ atmosphérique pendant un bref intervalle de temps est notée $d[\text{CO}_2]/dt$; la quantité de CO₂ émis pendant cet intervalle de temps est noté source(t) ; la quantité de CO₂ piégé pendant cet intervalle de temps est notée puits(t).

Questions III-D-1 : Écrivez la relation qui lie $d[\text{CO}_2]/dt$, source(t) et puits(t). D'après les questions précédentes et vos connaissances, rappelez quelle(s) sont la(les) principale(s) source(s) ? Quel(s) sont le ou les principaux puits ? Expliquez la notation (t) ajoutée aux termes source et puits. Expliquez qualitativement comment on peut procéder pour résoudre l'équation différentielle obtenue ?

Réponse aux questions III-D-1

$$d[\text{CO}_2]/dt = \text{source}(t) - \text{puits}(t)$$

La principale source de CO₂ atmosphérique est le volcanisme. Les puits principaux sont l'altération des silicates et le piégeage de carbone organique fossile.

L'intensité de ces différents processus a varié au cours des temps géologiques. L'intensité du volcanisme global (et les rejets de CO₂ associés) a varié au cours de l'histoire de la Terre ; l'altération des silicates peut être influencée par les cycles orogéniques (créant des reliefs), enfin on sait d'après l'âge des gisements d'hydrocarbures et de charbons que l'efficacité de l'enfouissement de carbone organique fossile a varié au cours des temps géologiques. C'est pourquoi l'intensité des puits et des sources dépend de la variable temps.

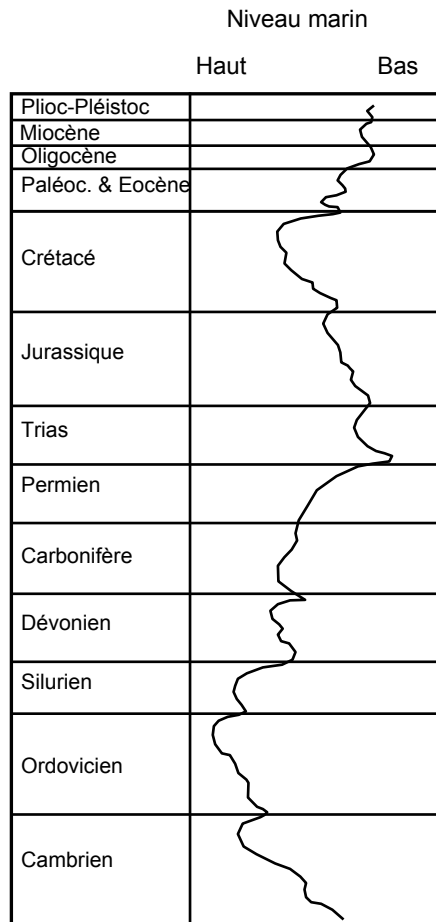
Pour résoudre cette équation différentielle, on pourrait essayer d'établir des relations mathématiques entre les puits et le temps et les sources et le temps. Ces fonctions cependant comme nous l'avons partiellement vu précédemment avec l'altération des silicates ne sont pas simples et sont multiparamétriques. Une autre approche consiste donc plutôt à établir grâce à un certains nombres d'archives géologiques les variations temporelles des puits et des sources au cours de l'histoire de la Terre. On connaît alors à chaque instant la valeur de la différence entre source et puits. On peut alors intégrer pas à pas l'équation différentielle donnée ci-dessus au cours des temps géologiques.

Nom :

Prénom :

salle n° :

- 2. Utilisation de la courbe de variation du niveau marin



Document 20 – Courbe du niveau marin au cours du Phanérozoïque (d'après Hallam et al., 1984).

Question III-D-2 : Expliquez comment le document 20 peut apporter des informations sur la variation de la quantité de CO₂ émis au cours du Phanérozoïque.

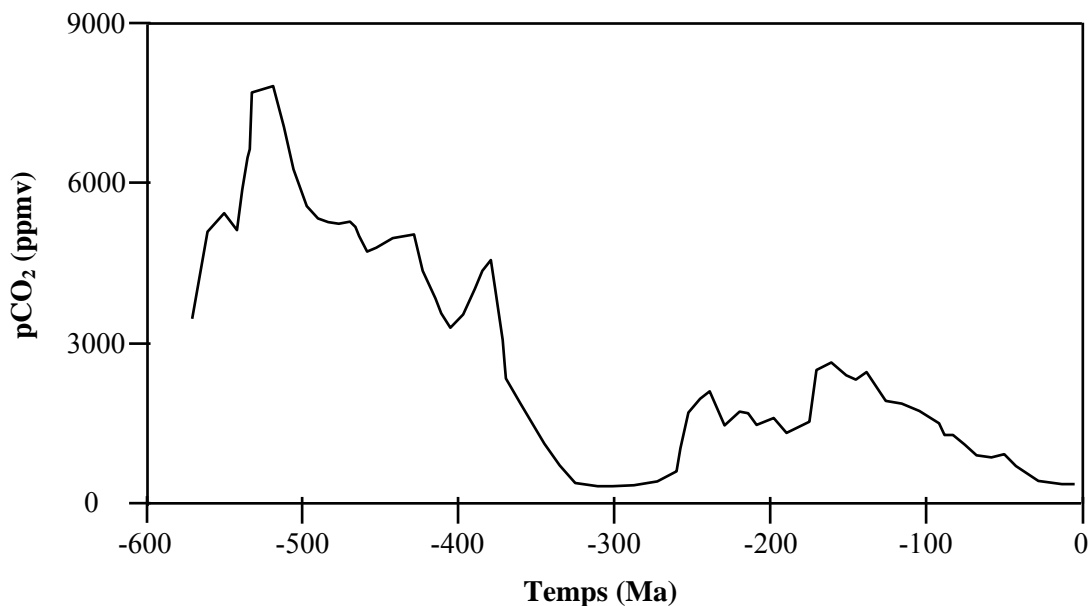
Réponse à la question III-D-2

Les variations du niveau marin au cours des temps géologiques peuvent être décomposées en différents cycles dont les périodes (ou longueurs d'ondes) sont différentes. Une des causes importantes de ces variations aux échelles de temps géologiques est la variation de l'activité volcanique globale (au niveau des dorsales, la plus grande chaîne volcanique sur Terre). Ainsi, d'après cette courbe de variation des niveaux marins, on peut estimer la variation de l'activité volcanique globale à la surface de la Terre au cours des temps géologiques, ce qui nous donne au premier ordre les variations du terme source(t) de l'équation différentielle précédente.

- 3. Discussion des variations de la teneur en CO_2 atmosphérique au cours du Phanérozoïque

Le document 21 montre la courbe d'évolution du CO_2 atmosphérique au Phanérozoïque déduite du modèle dont quelques lignes ont été abordées dans les questions précédentes.

Question III-D-3 : À l'aide de vos connaissances, discutez les variations de la teneur en CO_2 atmosphérique observées dans l'intervalle de temps 450 – 300 Ma, notamment leurs implications géobiologiques pour l'histoire de la vie et de la Terre.



Document 21 – Variations de la teneur atmosphérique en CO_2 au cours du Phanérozoïque obtenue à partir du modèle GEOCARB III (d'après Berner, 2003).

Réponse à la question III-D-3

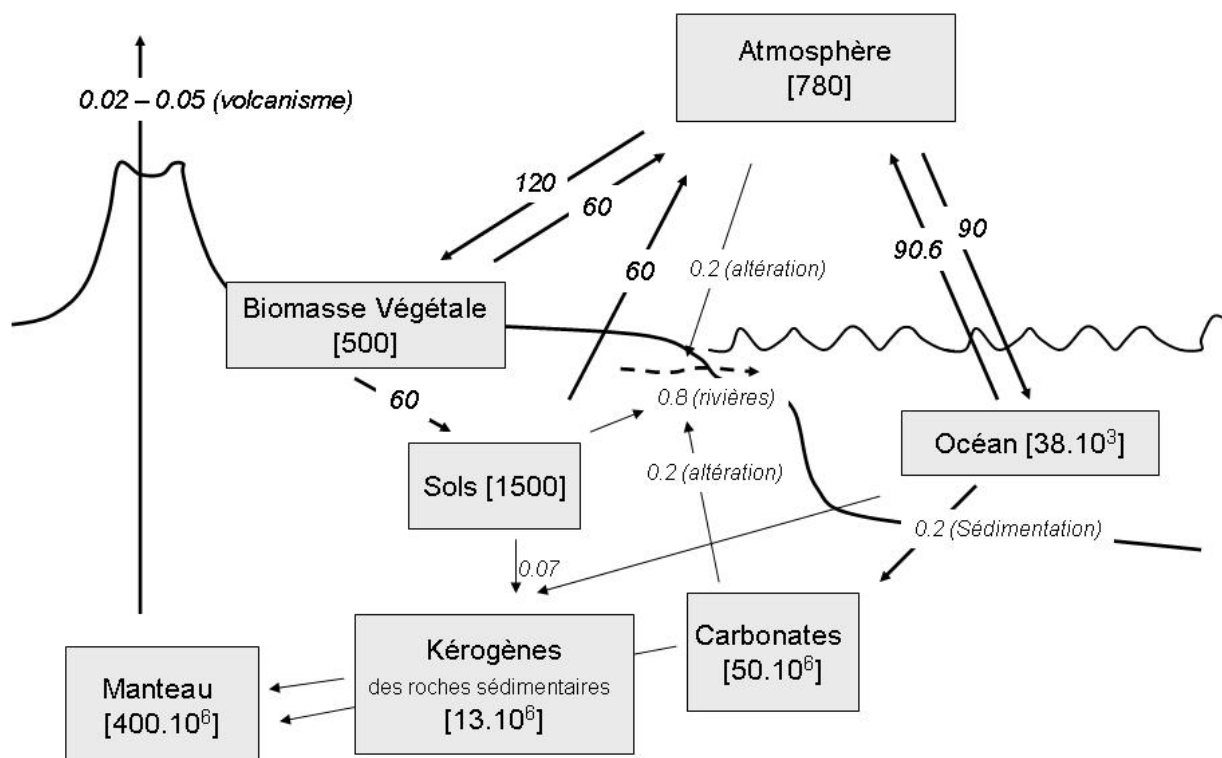
Le modèle GEOCARB III qui intègre l'équation différentielle exposée précédemment suggère qu'il y a eu une diminution importante de la teneur atmosphérique en CO_2 entre 450 et 300 Ma. Au premier ordre, cela pourrait soit résulter d'une diminution de l'activité volcanique à cette période (avec des bas niveaux marins par conséquent) et/ou d'une augmentation du terme puits, c'est-à-dire une augmentation de l'altération des silicates et/ou de l'enfouissement accru de matière organique fossile. L'ensemble de ces facteurs ont probablement joué mais au niveau géobiologique, on ne peut s'empêcher de noter la corrélation de cette diminution du CO_2 atmosphérique avec la colonisation des continents par les plantes. On sait en effet que les plus vieux fossiles de végétaux continentaux connus datent du Silurien (autour de 400 Ma), les champignons et lichens avaient certainement déjà colonisé les continents, il y eut un fort développement de la végétation continentale avec une apogée au Carbonifère avec les forêts houillères autour de 320 Ma.

- Partie IV. Bilan : les cycles du carbone aux différentes échelles de temps.

- A. Temps de résidence du carbone dans les différents réservoirs

Les parties précédentes vous ont permis de mettre en évidence l'existence de flux de carbone entre le réservoir atmosphérique et les autres réservoirs. Le document 22 illustre les quantités de carbone contenues dans chacun de ces réservoirs et les flux entre ces réservoirs.

Questions IV-A : À partir de ce document, pouvez-vous estimer le temps de résidence de carbone dans chacun de ces réservoirs (océan, biosphère continentale, sols, roches carbonatées, kérogènes des roches sédimentaires, manteau, atmosphère). Peut-on parler d'un unique temps de résidence du carbone dans l'atmosphère ? Pourquoi ?



Document 22 – Les principaux réservoirs de carbone. Quantités de carbone en PgC et flux de carbone en PgC.a⁻¹.

Nom :

Prénom :

salle n° :

Réponse aux questions IV-A

Réservoir	Masse de Carbone (PgC)	Flux entrant ou sortant (PgC/an)	Temps de résidence (an)
Atmosphère	780	210	3,7 (mais...)
Océan	38 000	90	422
Biomasse végétale	500	120	4,2
Sols	1500	60	25
Carbonates	$50 \cdot 10^6$	0,2	$250 \cdot 10^6$
Kérogène des roches sédimentaires	$13 \cdot 10^6$	0,07	$186 \cdot 10^6$
Manteau	$400 \cdot 10^6$	0,02	$20 \cdot 10^9$

On ne peut pas parler d'un temps de résidence unique du carbone dans l'atmosphère. L'atmosphère est au contact de réservoirs de carbone aux échelles de temps caractéristiques très différentes

○ **B. Le devenir du carbone anthropique.**

L'Homme émet chaque année plusieurs PgC dans l'atmosphère (voir la première partie du TP). On estime que la poursuite de l'utilisation des ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz) pourrait conduire à l'émission cumulée de plusieurs milliers de Pg de carbone dans l'atmosphère au cours des prochaines décennies.

Question IV-B : Pour combien de temps ce carbone restera-t-il dans l'atmosphère ?

Réponse à la question IV-B.

Une partie de ce carbone est très vite absorbée par les réservoirs de surface (océans et biosphère continentale). En effet, près de 50% de ce carbone émis est ré-absorbé chaque année... (voir la réponse à la question sur les « airborne fractions »).

Les échanges avec le sol et avec l'océan profond sont beaucoup plus lents et l'équilibre ne sera atteint qu'après plusieurs dizaines / centaines d'années.

Enfin, une fraction de carbone sera re-absorbée dans les réservoirs géologiques (sédimentaires et mantelliques). Et là c'est plusieurs millions d'années qu'il faudra pour que ce carbone disparaisse de l'atmosphère.

Commentaires de l'épreuve de TP de contre-option – secteur A

Le sujet était organisé en deux parties indépendantes.

La première partie comprenait des colorations histologiques à l'orcéine qui permettaient de mettre en évidence les différentes phases de la mitose de cellules de méristèmes racinaires d'oignons. Cette partie a été traitée par la très grande majorité des candidats. Les colorations ont été dans l'ensemble correctement réalisées. En revanche, le plus souvent, l'observation de ces colorations n'a pas été réalisée de manière satisfaisante. Certains candidats ne maîtrisent pas parfaitement l'utilisation du microscope, s'arrêtent sur le premier champ d'observation sans s'attacher à trouver les champs les plus démonstratifs. L'adéquation entre les dessins des différentes phases de la mitose et l'observation n'est pas toujours bonne.

Les photographies de cellules en mitose après l'induction de cassures chromosomiques ont été, en général, correctement interprétées et légendées.

La seconde partie était constituée d'un exercice sur le contrôle du cycle cellulaire aux premières étapes du développement embryonnaire. Il incluait l'observation d'embryons de xénope aux stades blastula et gastrula. Peu de candidats ont traité cette partie dans son ensemble. Ceci est le signe d'une mauvaise gestion du temps. L'exercice comprenait des questions qui pouvaient être traitées de manière indépendante (en particulier des questions relatives à des techniques) et qui ne nécessitaient pas la compréhension globale des objectifs de l'étude proposée. La très grande majorité des candidats ne sait pas calculer une concentration d'ADN à partir des mesures de densité optique. Les principes des techniques utilisées couramment en biologie moléculaire et cellulaire (Western blot, PCR) ne sont pas maîtrisés par un trop grand nombre de candidats. Lorsqu'elles étaient présentes, l'analyse et l'interprétation des résultats expérimentaux étaient pertinentes. En revanche, les observations des embryons à la loupe binoculaire n'ont pas été satisfaisantes, en particulier pour le stade gastrula. Beaucoup de candidats se sont contentés d'observer les embryons dans une seule position (pôle animal vers l'observateur) et n'ont pas pu voir l'encoche du blastopore.

En conclusion l'aspect expérimental a été correctement réalisé mais de nombreux candidats ne savent pas observer. Nous rappelons également que la maîtrise des principes des techniques de base utilisées en biologie cellulaire et moléculaire est un pré-requis à la compréhension de la biologie moderne.

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

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2008

TRAVAUX PRATIQUES DE CONTRE-OPTION DU SECTEUR A

CANDIDATS DES SECTEURS B ET C

Durée totale : 2 heures

La mitose

Ce sujet comporte deux parties indépendantes :

❖ Partie I : pages 2 à 8

Étude histologique des figures de mitose de méristème racinaire d'oignon et
analyse de documents

○ *Durée conseillée : 1 h – 10 points*

❖ Partie II : pages 9 à 18

Contrôle du cycle cellulaire aux premières étapes du développement embryonnaire

○ *Durée conseillée : 1h – 10 points*

Attention, il est vivement conseillé de commencer par l'étude histologique (Partie I) qui comprend une étape de coloration de 20 minutes.

Les réponses aux questions figureront dans les cadres réservés à cet effet, et, le cas échéant, au verso des feuilles (dans ce cas signalez-le avec une mention TSVP).

N'oubliez pas d'appeler les correcteurs pour vérifier préparations et dessins lorsque cela est demandé.

AVANT DE RENDRE VOTRE COPIE, VÉRIFIEZ QUE VOUS AVEZ BIEN INDIQUÉ VOS NOM, PRENOM ET NUMERO DE SALLE EN TÊTE DE CHAQUE FEUILLE, ET QUE LES 18 PAGES SONT PRÉSENTES.

PARTIE I - Influence de la température sur le cycle cellulaire : étude histologique des figures de mitose du méristème racinaire du bulbe d'oignon.

Ce travail sera effectué à partir de bulbes d'oignon mis à germer dans deux conditions : de l'eau potable à température ambiante (H_2O , 20°C, 8 jours), de l'eau potable à 4°C (H_2O , 20°C, 6 jours, suivi de H_2O , 4°C deux jours). La date de mise en germination est indiquée : vérifiez que vos deux échantillons ont été mis en germination à la même date.

Question I-A - Pour chaque bulbe, observez l'aspect et la taille des racines. Prélevez 6 à 8 racines au ras du plateau du bulbe avec des ciseaux fins et mesurez leur taille. Indiquez vos résultats dans le tableau ci-dessous et commentez brièvement.

Réponse à la question I-A	Bulbe 1 (H_2O , 20°C)	Bulbe 2 (H_2O , 4°C)
Nombre de racines prélevées		
Taille moyenne des racines (en mm)		
Conclusion sur la croissance comparée des racines dans ces deux conditions.	Malgré une taille variable des racines, il existe une différence significative entre les deux conditions. La température basse a donc un effet sur la croissance globale des racines.	

B - Les parties apicales des racines contenant le méristème (qui se distingue par sa coloration jaune-brun), seront prélevées, préparées et analysées par coloration histologique du matériel chromosomique selon le protocole suivant.

- 1- Avec des ciseaux fins, coupez environ 5mm du segment terminal d'une racine pour chacun des bulbes (vérifier que le méristème est prélevé). Déposez le fragment sur une lame porte-objet. Réalisez deux préparations pour chaque type de bulbe (soit quatre lames au total).
- 2- Préparez une solution d'orcéine diluée : à l'aide de la pipette Pasteur, mettez 19 gouttes d'eau distillée dans un tube de 5mL puis ajoutez une goutte de solution-mère d'orcéine. Fermez le tube et homogénéisez. Rincez la pipette à l'eau distillée.
- 3- Recouvrez les échantillons d'une goutte d'acide chlorhydrique (1mol.L^{-1}). Incubez 5 minutes puis absorbez l'acide avec du papier essuie-tout, en faisant attention à ne pas toucher l'échantillon. Rincez soigneusement la pipette à l'eau distillée.
- 4- Recouvrez l'échantillon d'une goutte de solution d'orcéine diluée et laissez agir pendant 20 minutes.

- 5- Éliminez le colorant avec du papier essuie-tout sans toucher l'échantillon. Recouvrez d'une goutte d'acide éthanoïque à 45%, puis recouvrez d'une lamelle couvre-objet en appuyant délicatement pour aplatir l'échantillon et obtenir une monocouche de cellules partiellement dissociées.
- 6- Explorez la préparation pour observer les figures de mitose au microscope.

Question I-B-1 - Quelle est l'action de l'acide sur le fragment de racine ?

Réponse à la question I-B-1

L'acide chlorhydrique, utilisé en digestion ménagée (1mol.L^{-1} pendant 5 min), digère le ciment pectique des parois cellulaires et facilite la dissociation des cellules. Cette étape permettra d'obtenir une monocouche de cellules entre lame et lamelle.

Question I-B-2 - Nommez et décrivez les quatre phases de la mitose dans le cadre ci-dessous. Identifiez une cellule dans chacune de ces phases, dans l'échantillon Bulbe 1 (H_2O , 20°C) et réalisez le dessin annoté de chacune de ces phases dans le tableau ci-dessous. Indiquez éventuellement si vous n'avez pas pu observer une phase particulière.

N'oubliez pas d'appeler un examinateur pour contrôler l'adéquation du dessin avec l'observation pour au moins deux des phases.

Réponse à la question I-B-2

Les quatre phases de la mitose sont:

- 1- La prophase, dont les principales caractéristiques sont la condensation des chromosomes et la disparition de l'enveloppe nucléaire.
- 2- La métaphase, phase d'alignement des chromosomes sur la plaque métaphasique.
- 3- L'anaphase, pendant laquelle on observe la migration des chromosomes vers les pôles du fuseau.
- 4- La télophase, phase de reformation des enveloppes nucléaires, de décondensation des chromosomes, et de séparation des cellules filles.

<i>Dessin annoté des observations, question I-B-2 : échantillon Bulbe 1 (H₂O, 20°C).</i> Contrôle par l'examineur (2 phases au moins)		
Phase 1 : nom Prophase		
Phase 2 : nom Métaphase		
Phase 3 : nom Anaphase		

C - Calcul de la durée relative des phases de la mitose dans les deux conditions de culture.

Question I-C : Sur chaque type de préparation (Bulbe 1, Bulbe 2), observez une quarantaine de cellules et déterminez si elles sont en interphase ou en mitose, en précisant dans quelle phase de la mitose elles se trouvent. Reportez vos observations dans les tableaux ci-dessous et calculez la durée relative de chacune des phases du cycle dans les deux conditions. Justifiez brièvement votre calcul.

BULBE 1	Prophase	Métaphase	Anaphase	Télophase	Interphase	Total
Nombre de cellules	10	4	1	5	20	40
Pourcentage de cellules	25%	10%	2,5%	7,5%	50%	100%

BULBE 2	Prophase	Métaphase	Anaphase	Télophase	Interphase	Total
Nombre de cellules	9	8	0	2	21	40
Pourcentage de cellules	22,5%	20%	0%	5%	52,5%	100%

Réponse à la question I-C

On peut estimer que la durée relative d'une phase du cycle cellulaire correspond au pourcentage de cellules observées dans cette phase: plus une phase est longue, plus nombreuses seront les cellules observées dans cette phase.

Si une phase n'est pas observée :

1/ soit la préparation ne permet pas l'observation (mauvaise qualité, mauvais champ d'observation)

2/ soit cette phase est très courte (il faudrait observer un nombre de cellules plus important).

Question I-D - Commentez les effets de la température de l'eau sur la croissance racinaire et le cycle cellulaire.

Réponse à la question I-D

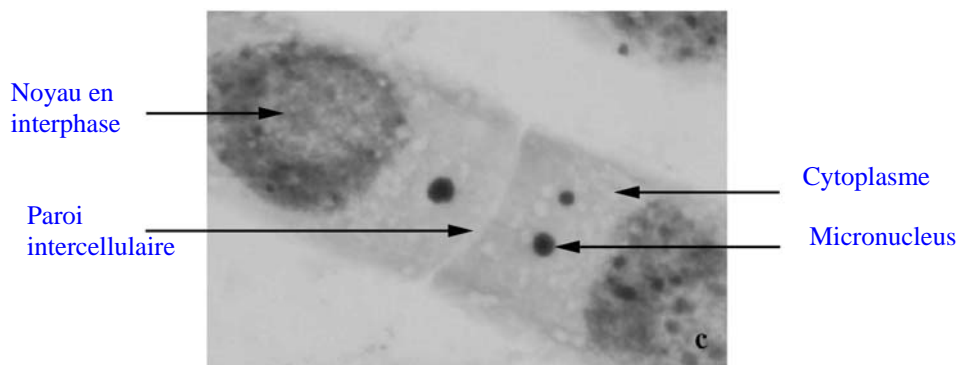
L'analyse de la longueur des racines montre que la croissance globale de la racine est réduite dans la condition de basse température.

Par l'analyse histologique, dans l'exemple présenté ci-dessus, on observe que la température basse provoque un allongement de la durée relative de la métaphase, ce qui se traduit par une plus grande proportion de figures de métaphase dans la préparation du bulbe 2.

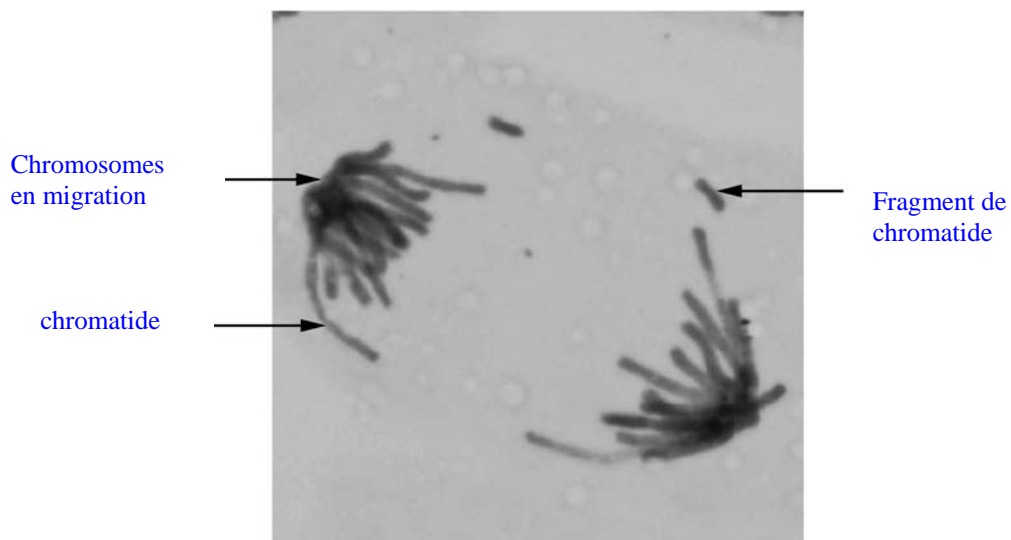
E - Une analyse cytogénétique similaire a été réalisée pour évaluer l'effet de l'acide borique (un conservateur alimentaire) sur la mitose (Turkoglu, 2006). Une partie des résultats (fortes doses) est présentée ci-dessous.

	Nombre de cellules examinées	Nombre de mitoses observées	Anomalies de mitose (%)	Micronucleus en interphase (%)	Cassure chromosomique (%)
Contrôle (H ₂ O, 20°C)	1031	230	0	0	0
Acide Borique	1022	100	46	27	2

Observation microscopique de micronucleus en interphase (observation à l'objectif x100)



Observation microscopique de cassure chromosomique (observation à l'objectif x100)



Question I-E : En utilisant les flèches, légendez les images ci-dessus. Commentez les effets de l'acide borique sur le cycle cellulaire et la mitose. Que pouvez-vous en déduire ? Quels avantages présente ce test pour son utilisation en biotechnologie? Que proposeriez-vous pour améliorer sa fiabilité?

Réponse à la question I-E

1. L'acide borique, à la forte dose utilisée dans ce test, inhibe la mitose et provoque des anomalies mitotiques telles que des cassures chromosomiques qui perturbent la ségrégation des chromosomes. Ces cassures ont pour conséquence la formation de micronuclei dans le cytoplasme des cellules en interphase.

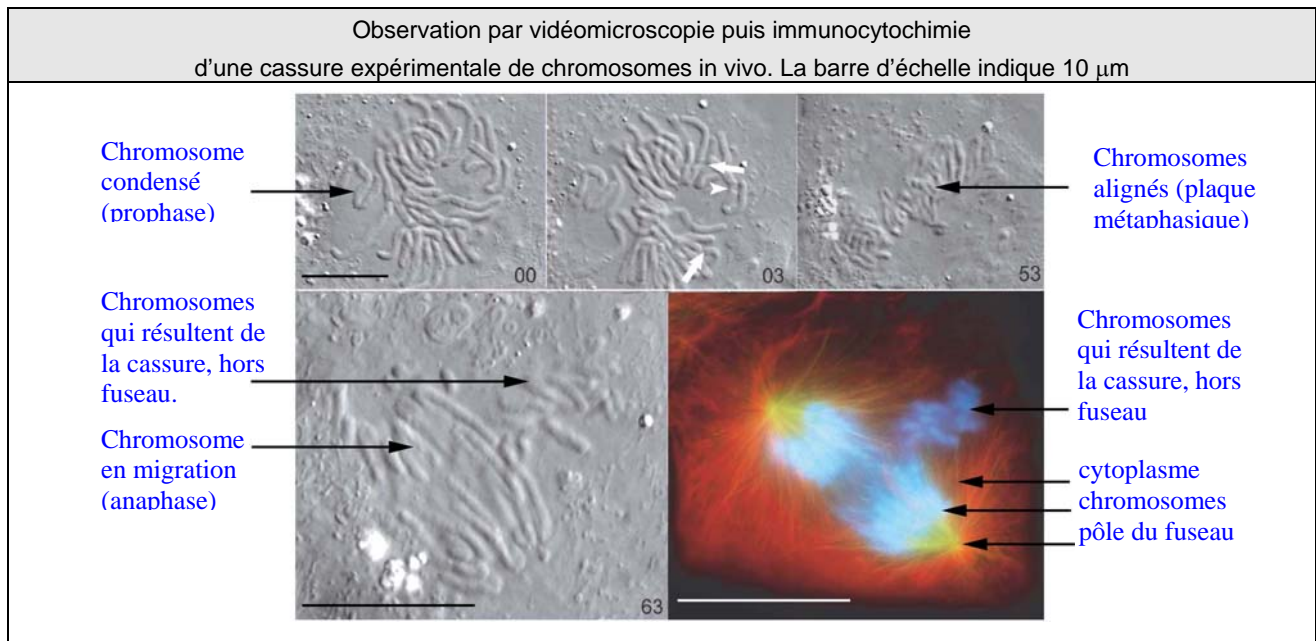
2. L'analyse cytogénétique des figures de mitose de la racine d'oignon est un test utilisé pour les études environnementales de qualité de l'eau, l'analyse de la toxicité de différents produits chimiques comme le mercure, ou le cuivre, ou encore pour tester des conservateurs alimentaires. Ces analyses sont une première indication des doses admissibles utilisables pour la consommation humaine par exemple.

Les résultats présentés ici indiquent que si l'acide borique est utilisé pour conserver des aliments, la dose utilisée doit être inférieure à celle utilisée dans le test.

3- Les avantages de ce test sont de plusieurs ordres: les cellules analysées sont des cellules eucaryotes, les jeunes racines sont très sensibles aux polluants de l'eau. De plus, ce test est rapide et peu coûteux.

4- Par rapport à la manipulation proposée ici, pour assurer la validité du test, il faudrait faire plusieurs manipulations complémentaires: par exemple, analyser l'effet de doses croissantes du produit chimique testé, analyser un grand nombre d'échantillons (au moins 10) par condition. Enfin, réaliser des tests statistiques pour valider les variations observées.

F - On réalise des cassures chromosomiques double-brin expérimentales sur des cellules vivantes, en utilisant une microdissection au laser. La cassure est réalisée sur la partie distale de trois chromosomes. L'effet de ces cassures est analysé au cours de la mitose en contraste de phase : photographies des cellules à $t = 00$ min (avant manipulation), à $t = 03$ min (cassure réalisée : les flèches blanches indiquent les sites de cassure), à $t = 53$ min, puis les cellules sont fixées à $t = 63$ min et les microtubules sont analysés par coloration immunocytochimique (coloration vert-jaune), l'ADN est coloré en bleu, le cytoplasme est contre-coloré en rouge (*Morrison et Rieder, 2004*).



Question I-F : En utilisant les flèches, légendez les photographies en contraste de phase ci-dessus à $t = 00$ min, $t = 53$ min, $t = 63$ min et la coloration immunocytochimique à $t = 63$ min. Quelles conclusions tirez-vous de cette expérience ?

Réponse à la question I-F

- 1- Les cassures, réalisées à un stade de la mitose où les chromosomes sont déjà condensés, ne perturbent pas l'organisation des chromosomes en plaque métaphasique ($t=53\text{min}$).
- 2- A ce stade, les cassures ne sont pas réparées et les fragments de chromosomes ne sont pas attachés sur le cytosquelette : ils restent à l'équateur de la cellule et ne participent pas à l'anaphase ($t=63$ min). Ceci parce que les fragments générés (partie distale du chromosome) ne comportent pas de site d'attachement au kinétochore.
- 3- De cette manipulation résultent
 - des cassures non réparées: ce type d'analyse met en évidence l'importance de la phase du cycle cellulaire pour que la réparation de l'ADN soit possible (notion de point de contrôle).
 - des anomalies de répartition des chromosomes, qui entraîneront l'aneuploidie des cellules filles avec les conséquences de ce type d'anomalies sur la biologie de la cellule.

PARTIE II - Exercice et observation d'échantillons : contrôle du cycle cellulaire aux premières étapes du développement embryonnaire

Question II-A : À l'aide d'un schéma, définissez les quatre phases du cycle cellulaire des eucaryotes.

Réponse à la question II-A

Les quatre phases sont G2-M-G1-S (présenter par exemple un schéma circulaire ou un graphe donnant la quantité d'ADN par cellule).

Phase S (Synthèse): réplication de l'ADN et duplication du centrosome.

Phase M : mitose.

Phase G2 (Gap, intervalle) : croissance et préparation de la mitose.

Phase G1 (Gap, intervalle) : croissance, préparation de la réplication.

B - L'entrée en phase de mitose est sous le contrôle d'un complexe constitué de la cycline B et de la protéine kinase Cdc2. L'activation de ce complexe est en partie contrôlée par la phosphorylation de la tyrosine 15 de Cdc2. La kinase Wee1 phosphoryle ce site et inactive le complexe, alors que la phosphatase Cdc25A le déphosphoryle, ce qui conduit à l'activation du complexe. Par ailleurs, la kinase Wee1 n'est active que lorsqu'elle est elle-même phosphorylée.

Expérience 1 : Une surexpression modérée de la protéine Wee1 dans les embryons de xénope est réalisée en injectant des ARNm Wee1 au stade deux cellules, dans les deux blastomères. Après l'injection, les embryons sont mis en culture. On observe une mortalité importante au stade gastrula âgée (14h après la fécondation). Trois types d'analyses sont réalisés : analyse morphologique, analyse de la quantité d'ADN, analyse de l'expression de Cdc2.

- Analyse morphologique : les embryons sont fixés 7h après la fécondation. Vous disposez d'un échantillon de ces embryons dans les boîtes de pétri (Wee1 7h) ainsi que des embryons témoins non injectés cultivés en parallèle (T 7h).

Question II-B-1a : À l'aide de la loupe binoculaire, décrivez et comparez le phénotype morphologique des embryons fournis.

Réponse à la question II-B-1a

Les embryons observés se présentent comme une sphère constituée de cellules pigmentées en brun dans l'hémisphère animal et non pigmentées dans l'hémisphère végétatif.

Le volume et la forme des embryons sont globalement identiques.

On observe une différence dans la taille des cellules :

La taille des cellules de l'embryon wee1 est supérieure à celle des cellules de l'embryon témoin.

Ceci suggère que l'embryon Wee1 contient moins de cellules que le témoin.

- Analyse de la quantité d'ADN: l'ADN total de 4 embryons témoins ou injectés avec les ARNm Wee1, est extrait après 7h de développement et est repris dans 80 μ L. 2 μ L de cette solution sont dilués dans 100 μ L d'eau distillée. On mesure au spectrophotomètre la densité optique (DO) à 260 nm et 280 nm de cette solution. Les résultats pour chaque échantillon sont indiqués dans le tableau 1 (page 11).

Question II-B-1b : Quel est l'intérêt de faire une mesure à 280 nm?

Réponse à la question II-B-1b

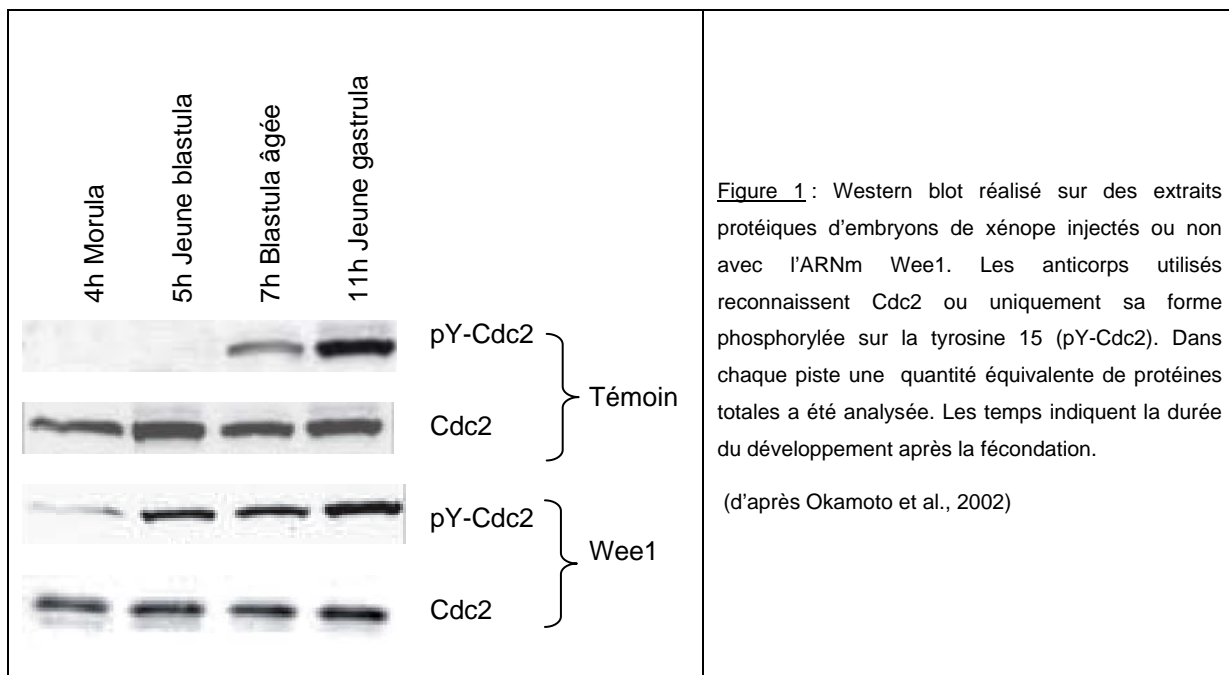
La mesure à 280 nm permet de rechercher une éventuelle contamination de la préparation d'ADN par des protéines, car les protéines absorbent non seulement à 280 nm mais aussi à 260 nm. Un ADN pur doit avoir un rapport DO 260/DO 280 compris entre 1,8 et 2.

Question II-B-1c : Sachant que pour un ADN double brin, 1 Unité D.O. = 50 µg/mL à 260 nm, indiquez dans le tableau ci-dessous la concentration en ADN de l'échantillon mesuré et la quantité d'ADN total par embryon.

Tableau 1

Réponse à la question II-B-1c	Wee1 7h	Témoin 7h
DO 260 nm	0,164	0,392
DO 280 nm	0,092	0,236
Concentration de l'échantillon mesuré (µg/mL)	$0,164 \times 50 = 8,2$ $r \ 260/280 = 1,78$	$0,392 \times 50 = 19,6$ $r \ 260/280 = 1,66$
Quantité d'ADN total par embryon (en µg)	$(DO \times 50 \times \text{dilution} \times \text{volume total (ml)}) / \text{nombre d'embryons}$ $= (DO \times 50 \times 50 \times 80.10^{-3}) / 4$ $= DO \times 50 = 8,2$	$(DO \times 50 \times 50 \times 80) / (4 \times 1000) =$ $19,6$

- Analyse de l'expression de l'expression de Cdc2 : des extraits protéiques d'embryons injectés ou non sont réalisés après 4h, 5h, 7h et 11h de culture. Ils sont analysés en western blot avec un anticorps spécifique de la forme phosphorylée sur la tyrosine 15 de Cdc2 (Figure 1).



Question II-B-1d : Donnez le principe de la technique de western blot.

Réponse à la question II-B-1d

Technique qui permet d'analyser l'expression d'une protéine dans un extrait tissulaire donné.

Les protéines totales sont extraites des cellules ou des tissus. Elles sont dénaturées par un détergeant anionique, le SDS (Sodium Dodecyl Sulfate), qui se fixe en grande quantité sur les protéines et les charge négativement. Les protéines sont ensuite séparées en fonction de leur masse moléculaire par électrophorèse en gel de polyacrylamide. Cette étape est suivie d'un transfert sur feuille de nitrocellulose et d'une mise en évidence de la protéine d'intérêt à l'aide d'anticorps spécifiques par immunodétection.

Question II-B-1e : Analysez et interprétez les résultats de la figure 1.

Réponse à la question II-B-1e

La quantité totale de protéine Cdc2 est constante et non modifiée par la surexpression de la protéine Wee1. Dans les embryons injectés, Cdc2 est phosphorylée plus tôt qu'au cours du développement normal (3h avant, dès le stade morula).

Expérience 2 : Des embryons de xénope sont injectés au stade deux cellules, dans les deux blastomères, avec des ARNm codant une forme mutée de Wee1 (Wee1-KD). La protéine Wee1-KD porte une mutation qui la rend incapable de phosphoryler son substrat. Après l'injection, les embryons sont mis en culture et soumis aux trois types d'analyses réalisées dans l'expérience 1 (analyse morphologique, analyse de la quantité d'ADN, analyse de l'expression de Cdc2). Les résultats ne révèlent aucune différence significative entre les embryons témoins et les embryons injectés avec les ARNm Wee1-KD.

Question II-B-2 : En tenant compte des résultats obtenus dans les deux expériences et les trois types d'analyse (analyse morphologique, de la quantité d'ADN et de l'expression Cdc2), proposez une interprétation du phénotype obtenu en réponse à la surexpression de Wee1.

Réponse à la question II-B-2

La protéine Wee1 phosphoryle Cdc2 et l'activité kinase de Wee1 est responsable des phénotypes observés (expérience 2)

Les embryons surexprimant Wee1 sont constituées de moins de cellules et moins d'ADN, ce qui indique que le cycle cellulaire est perturbé.

Interprétation : La surexpression de Wee1 provoque la phosphorylation prématurée de cdc2, ce qui inactive le complexe cdc2/Cycline B et bloque ou retarde l'entrée en phase de mitose des cellules.

C - Les embryons sont injectés dans les deux blastomères au stade deux cellules avec des oligonucléotides antisens (ASWee1) dirigés contre l'ARNm codant Wee1, puis ils sont mis en culture. Les embryons injectés avec les ASWee1 meurent 14h après la fécondation. Trois types d'analyses sont réalisées 12h après la fécondation : analyse morphologique, de l'expression de la forme phosphorylée de l'histone H3 et de gènes marqueurs du mésoderme.

- Analyse morphologique : Vous disposez d'un embryon injecté avec l'oligonucléotide ASWee1 (boîte de pétri ASWee 12h) et d'un embryon témoin (boîte de pétri T12h), fixés 12h après la fécondation.

Question II-C-1 : À l'aide de la loupe binoculaire, décrivez et comparez le phénotype morphologique des embryons fournis. Faites un schéma annoté de ces embryons.

Réponse à la question II-C-1

Témoin : Stade gastrula âgée : bouchon vitellin

Injectés ASWee1 : encoche blastoporale, gastrulation bloquée ou retardée

(présenter un schéma comprenant l'orientation de l'embryon: pôle animal, pôle végétatif, et légendé: bouchon vitellin, encoche blastoporale).

Question II-C-2 : Proposez une expérience qui permette de vérifier l'efficacité de l'oligonucléotide antisens ASWee1.

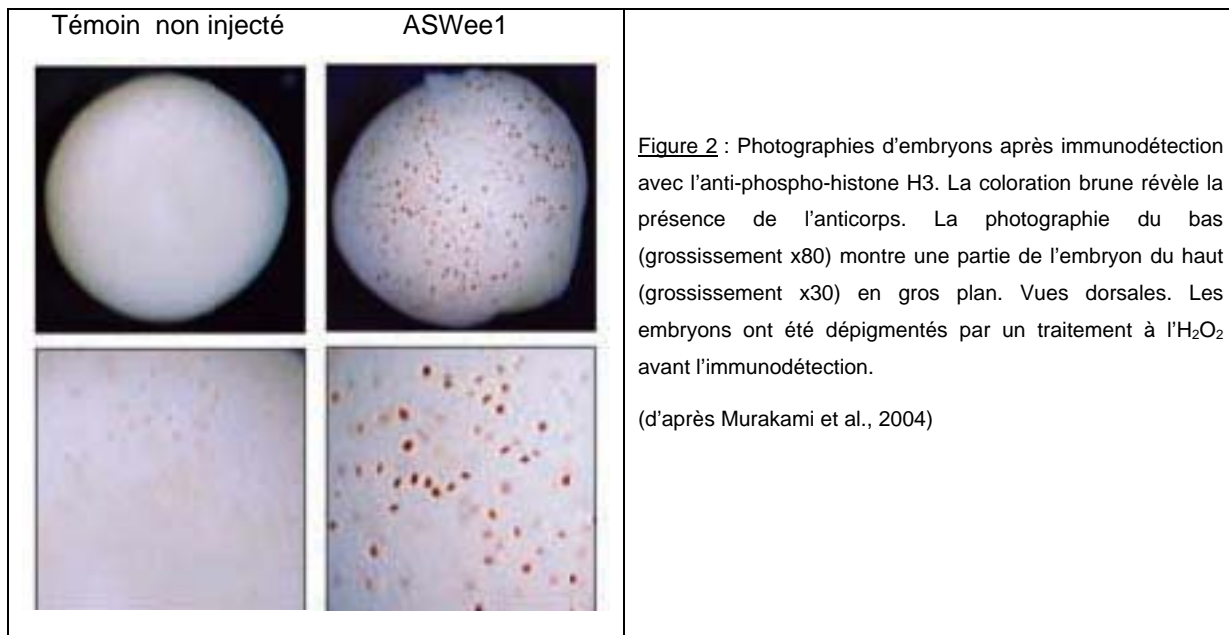
Réponse à la question II-C-2

Western blot montrant que l'expression de la protéine Wee1 est inhibée dans les embryons injectés avec l'antisens

Ou

Northern blot montrant que l'expression de l'ARN codant Wee1 n'est pas présent dans les embryons injectés avec l'antisens

- Analyse de l'expression de la phospho-histone H3: les embryons sont fixés et une immunodétection sur embryon entier est réalisée avec un anticorps reconnaissant la forme phosphorylée de l'histone H3. Cette forme est exprimée uniquement lorsque les cellules sont en mitose.



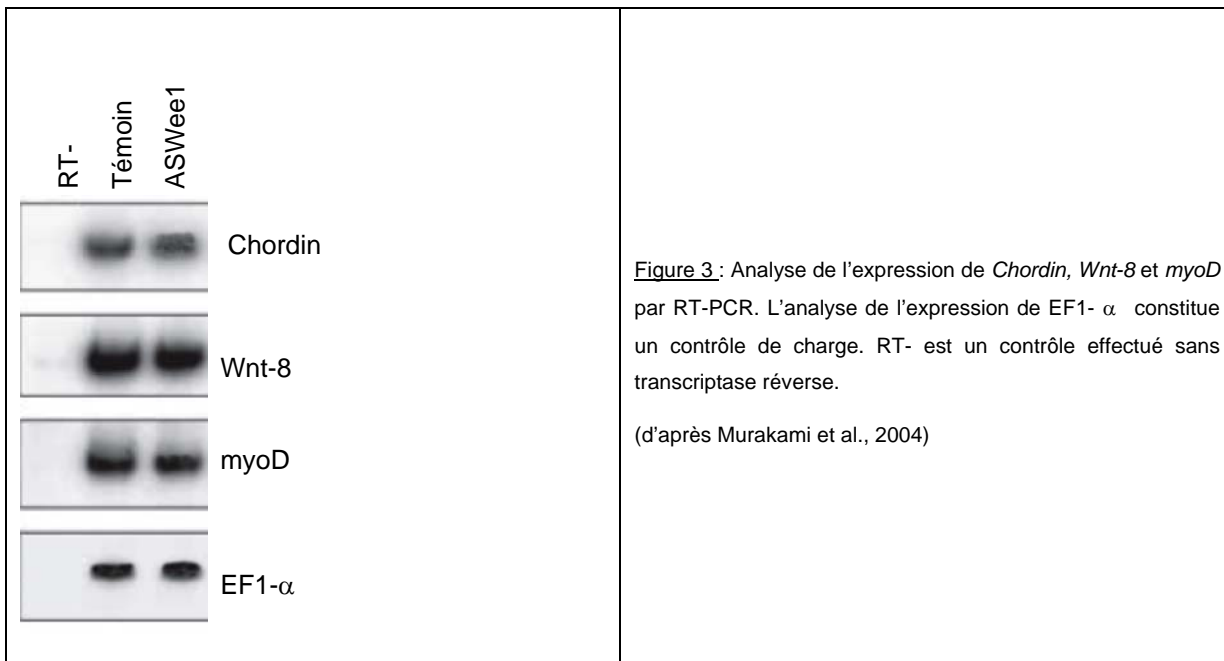
Question II-C-3 : Commentez et interprétez les résultats de la figure 2.

Réponse à la question II-C-3

On observe plus de cellules en mitose dans les embryons injectés par l'ASWee1

Wee1 est requis pour l'inhibition du passage en phase M.

- Analyse de l'expression de gènes marqueurs du mésoderme par RT-PCR : *Chordin*, *myoD* et *Wnt-8* sont des gènes marqueurs exprimés respectivement dans les régions dorsale, latérale et ventrale du mésoderme de la gastrula. On analyse leur expression par RT-PCR semi-quantitative dans les embryons témoins et dans les embryons injectés avec les ASWee1. Les résultats sont présentés dans la figure 3.



Question II-C-4 : Donnez le principe et les principales étapes du protocole de la technique de RT-PCR.

Réponse à la question II-C-4

La technique de RT-PCR permet d'analyser la présence d'un ARNm spécifique dans un tissu donné.

Principe :

La RT-PCR associe une RT (Reverse Transcription) à une PCR (Polymerase Chain Reaction).

La RT permet de synthétiser un ADN complémentaire (ADNc) à partir d'un ARN matrice.

La PCR permet d'amplifier spécifiquement une région d'ADN en présence d'amorces (oligonucléotides complémentaires des deux extrémités de la région à amplifier) et d'une ADN polymérase active à haute température (68-72 °C) .

Principales étapes du protocole :

- Extraction des ARN du tissu, élimination de l'ADN génomique
- RT : transcription reverse
- PCR : répétition du cycle ci-dessous plusieurs dizaines de fois.

Dénaturation de l'ADN à 95°C (les ADN double brin se dénaturent en simple brin)

Hybridation entre les amorces et l'ADN (45-65°C)

Synthèse d'un brin complémentaire à partir du 3'OH de l'amorce hybridée (68-72°C)

- Analyse des produits de PCR sur gel d'agarose

Une portion de la séquence de l'ADN complémentaire (ADNc) de *Chordin* est représentée ci-dessous.

```
1  ATGCAGTGTG CCCCCATCCT ACTTGTGTGG ACCCTGTGGA TTATGGCTGT GGATTGCTCT CGCCCCAAGG TTTTCTTGCC
91  CATTGAGCCT GAACAGGAGC CCCTCCAATC CAAGACTCCA GCAGGTTGTA CATTTGGTGG GAAATTTTAC TCCCTGGAGG
171 ATTCATGGCA TCCAGATCTT GGGGAACCAT TCGGAGTTAT GCACTGCGTA CTATGCTATT GTGAGCCGCA GCGAAGTCGT
251 CGGGGAAAAC CATCTGGTAA AGTCAGCTGC AAAAACATCA AACATGATTG CCCCTCACCC TCCTGTGCTA ACCCTATACT
331 GCTCCCATTA CATTGCTGCA AGACTTGTC CAAAGCTCCT CCTCCTCCTA TAAAGAAATC AGACTTTGTT
```

Question II-C-5 : Déterminez la séquence de deux amorces pour amplifier de façon spécifique par PCR un fragment d'environ 200 bases de cet ADNc.

Réponse à la question II-C-5

Les séquences proposées doivent répondre aux critères suivants:

Taille des oligonucléotides (environ 25 nucléotides, une dizaine admis)

Amorces orientés 5', 3', Sens et antisens

200 nucléotides entre les deux amorces.

Question II-C-6 : Interprétez les résultats de la figure 3.

Réponse à la question II-C-6

L'inhibition de l'expression de Wee1 ne modifie pas l'expression des marqueurs mésodermiques étudiés.

La protéine Wee1 n'est pas impliquée dans la régionalisation du mésoderme.

Nom :

Prénom :

salle n° :

Question II-C-7 : Proposez une hypothèse quant au rôle de la kinase Wee1 dans le contrôle des mouvements de la gastrulation et dans la régionalisation du mésoderme.

Réponse à la question II-C-7

Wee1 phosphoryle Cdc2 et inhibe la mitose.

Au cours du développement, l'inhibition de la mitose par Wee1 est requise pour le bon déroulement des mouvements de la gastrulation mais pas pour la régionalisation du mésoderme.

Question II-C-8 : Quel phénotype attendez-vous d'une surexpression de Cdc25A dans l'embryon de xénope ? Justifiez votre réponse.

Réponse à la question II-C-8

Cdc25 déphosphoryle Cdc2, ce qui devrait conduire à l'activation du complexe Cdc2/Cycline B et à favoriser l'entrée en mitose.

On s'attend à phénotype similaire à celui obtenu après injection des ASWee1 : augmentation du nombre de mitoses, ce qui conduit au blocage de la gastrulation.

Commentaires de l'épreuve de TP de contre-option – secteur B

Quelques aspects de la pollinisation des fleurs par les animaux

Le sujet portait sur quelques aspects de la pollinisation des fleurs par les animaux et comportait quatre parties indépendantes. Il permettait d'évaluer diverses compétences nécessaires chez un futur enseignant : réalisation de dissections, de préparations microscopiques, analyse de résultats expérimentaux, élaboration de synthèses à partir de documents et identification de quelques espèces communes.

Partie I

Etonnamment, l'exercice de dissection florale semble peu connu des candidats qui se contentent le plus souvent d'une simple incision de la fleur ou bien d'un découpage des pièces florales sans réelle organisation.

Une dissection florale doit révéler, par son organisation et sa présentation, sans annotation ni commentaire, l'organisation de la fleur. L'énoncé précisait que plusieurs fleurs pouvaient être utilisées. Il fallait utiliser au moins deux modes de présentation révélant d'une part le nombre de pièces de chaque enveloppe et d'autre part les pièces soudées et les pièces libres (voir page suivante quelques propositions de présentation).

Normalement, cette dissection florale doit aboutir à l'établissement du diagramme floral. Ce dernier ne doit pas être appris par cœur mais corrélé avec une dissection correcte. La présentation du diagramme floral manque souvent de soin. Il ne faut pas oublier la bractée, puisque cette dernière est présente à la base de chaque fleur de Muflier, et l'axe floral afin d'orienter le diagramme.

Partie II

A - La dissection des pièces buccales de l'abeille est rarement correctement réalisée. La plupart des candidats se contentent "d'arracher" l'ensemble des pièces et les présentent sans aucun montage sur une lame de verre voire directement sur le dépoli de la loupe (!). Le jury mettait pourtant à disposition de chaque candidat un flacon d'eau glycinée et des lames et lamelles permettant une présentation bien étalée et surtout non desséchée des pièces buccales. Les dessins d'observation ressemblent souvent à des croquis parfois sans titre ni échelle.

Pour l'annotation des différentes parties des appendices et de leurs fonctions, les candidats semblent mal maîtriser leurs connaissances et mélangent les différents types de pièces buccales (broyeur, piqueur, suceur).

B - La dissection de la patte métathoracique P3 est souvent incomplète (absence des coxa et trochanter). Les remarques sur la qualité des dessins présentées dans la partie II-A sont les mêmes. Le premier tarse (T1) est très souvent confondu avec le tibia et la légende est donc complètement décalée. Très peu de candidats ont dessiné les deux faces de la patte (corbeille externe, brosse interne).

Partie III-

Il fallait, dans cet exercice, à partir de documents, trouver les raisons de l'isolement reproductif de deux espèces du genre *Mimulus* qui ne s'hybrident pas lorsqu'elles coexistent dans leur habitat naturel malgré une interfertilité quand on dépose artificiellement du pollen d'une espèce sur le pistil de l'autre espèce.

III-A : Environ la moitié des candidats ont bien vu la notion d'espèces sœurs possédant un ancêtre commun exclusif ; par contre la notion de spéciation sympatrique n'a pas souvent été citée et a parfois été confondue avec celle de spéciation allopatrique.

III-B : L'analyse des documents a généralement été hâtive et superficielle, se limitant souvent à une simple paraphrase. La compétition entre le pollen « intraspécifique » et le pollen « interspécifique » vis-à-vis du pistil *M.cardinalis* a été correctement vue ; par contre, la notion de barrière prézygotique diminuant l'hybridation entre deux espèces différentes a été trop peu citée.

Les candidats ne se posent pas assez de questions sur la différence observée dans le cas d'un dépôt de pollen « intraspécifique » et de pollen « interspécifique » sur un pistil *M.lewisii*. Dans ce cas, les deux types de pollen ont le même potentiel fécondant et pourtant le nombre moyen de graines par fruit est nettement diminué en présence de pollen interspécifique. Quasiment aucun candidat n'a souligné cette contradiction apparente, ni proposé d'hypothèse explicative comme l'existence éventuelle d'une barrière post-zygotique (mise en évidence par la question III-C).

III-C : Cette question devait permettre de résoudre le problème posé par la question III-B. IIIC-3 suscitait d'ailleurs une confrontation entre les deux questions. Autant dire que le jury est, la plupart du temps, resté sur sa faim...

III-D : Même si ce document a souvent été compris, de trop nombreux candidats analysent linéairement les graphiques et oublient totalement de faire un bilan court et clair.

III-E : Synthèse trop souvent négligée

Partie IV

Cette partie révèle le faible niveau de connaissances naturalistes des candidats en biologie animale comme en biologie végétale. Par exemple, on note de nombreuses confusions entre le sedum blanc et la salicorne, l'achillée millefeuille et la carotte sauvage, le xylocope et une mouche. Le plus surprenant étant la confusion très fréquente du syrpe, insecte diptère très commun (nombre d'ailes et appareil buccal pourtant bien visibles sur le cliché fourni) avec l'abeille dont les candidats possédaient pourtant deux échantillons pour les dissections.

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

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2008

TRAVAUX PRATIQUES DE CONTRE-OPTION DU SECTEUR B

CANDIDATS DES SECTEURS A ET C

Durée totale : 2 heures

Quelques aspects de la pollinisation des fleurs par les animaux

Ce sujet comporte quatre parties indépendantes les unes des autres :

- ❖ Partie I : pages 2 et 3
 - *Durée conseillée : 30 min – 5 points*
- ❖ Partie II : pages 4 et 5
 - *Durée conseillée : 30 min – 5 points*
- ❖ Partie III : pages 6 à 15
 - *Durée conseillée : 50 min – 8 points*
- ❖ Partie IV : page 16
 - *Durée obligatoire : 10 min – 2 points*

Répondre directement sur les feuilles du sujet dans les espaces prévus à cet effet

Rendre la totalité des feuilles (y compris la page 1 de présentation)

**AVANT DE RENDRE VOS COPIES, PRIERE DE VERIFIER QUE
VOUS AVEZ BIEN INDIQUE VOS NOM, PRENOM ET NUMERO
DE SALLE EN TÊTE DE CHAQUE FEUILLE**

Partie I

Structure d'une fleur à pollinisation entomophile, le Muflier (*Antirrhinum majus*)

A- Dissection florale

Question I-A : Réalisez, sur une feuille de papier blanche, une dissection florale de la fleur de Muflier.

Présentez cette dissection de façon à montrer, sans légende, l'organisation de la fleur et des différentes pièces florales.

Vous disposez de plusieurs fleurs.

B- Étude de l'ovaire du Muflier

Question I-B : Réalisez une coupe transversale de l'ovaire de la fleur de Muflier. Réalisez un dessin d'observation annoté de votre coupe (cadre I-B).

C- Diagramme floral et formule florale

Question I-C-1 : Réalisez le diagramme floral de la fleur de Muflier (cadre I-C-1).

Question I-C-2 : Ecrivez la formule florale de la fleur de Muflier (cadre I-C-2).

Appelez un examinateur pour évaluer en même temps votre dissection florale, votre coupe d'ovaire et l'adéquation de ces préparations avec vos dessins.

Réponse(s) à la question I-B

Le dessin doit être conforme à la coupe réalisée et non un schéma

Titre

Technique d'observation

Echelle

Légendes attendues:

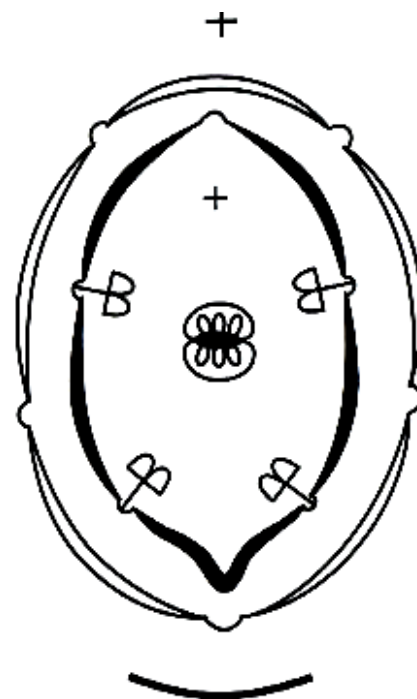
- paroi de l'ovaire
- 2 loges
- ovule
- placenta
- placentation axile

Réponse(s) à la question I-C-1

Deux représentations possibles pour le diagramme floral



ou



Dans le cas où des représentations non conventionnelles sont utilisées, ajouter une légende

Réponse(s) à la question I-C-2

X , (5S) + ((5 P) + 4 E) + (2 C)

X: zygomorphe, P: pétale, S: sépale, E: étamines, C: carpelle, () : soudure, C : ovaire supère

Partie II

Étude d'un insecte pollinisateur, l'Abeille domestique (*Apis mellifera*)

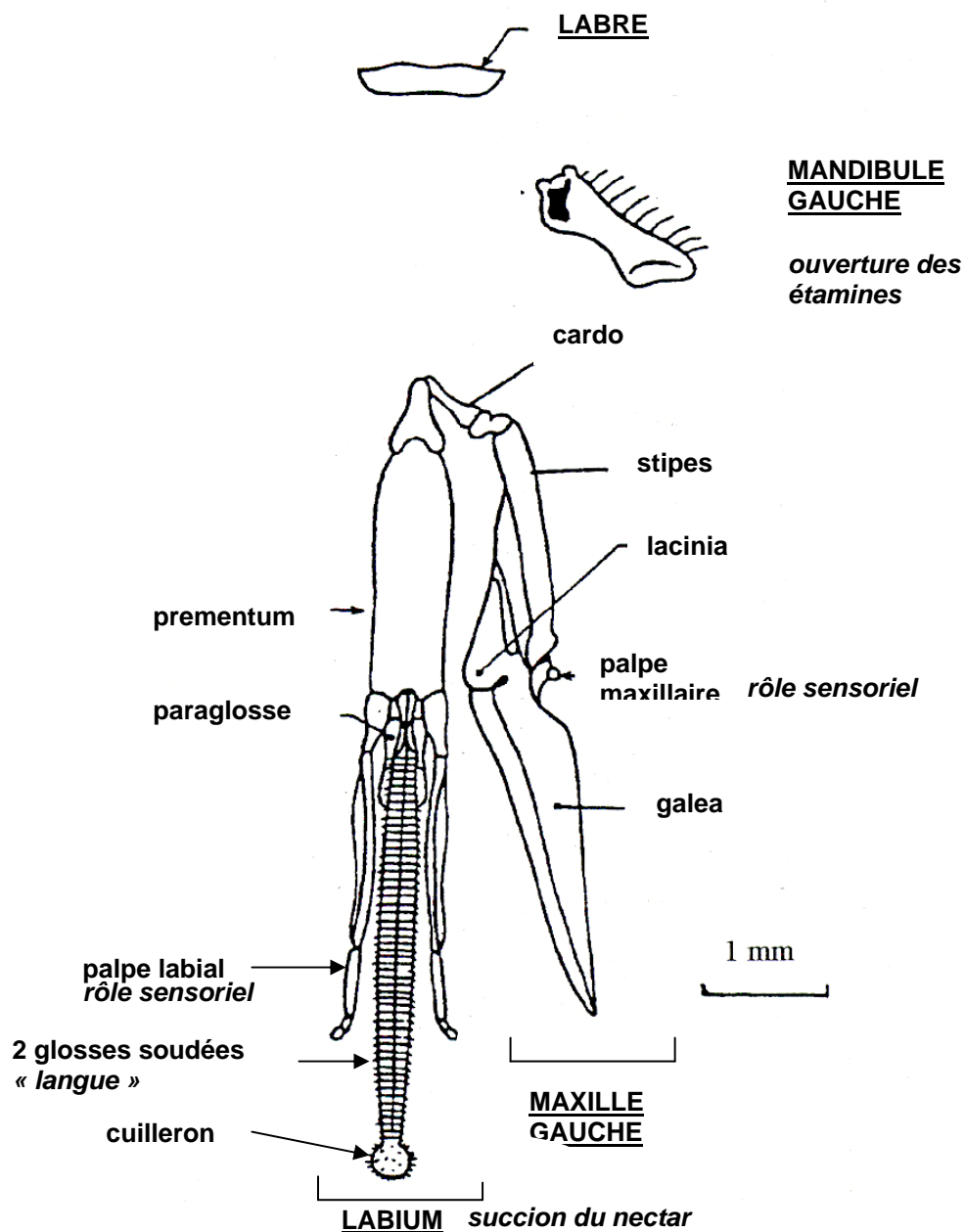
A - Étude des pièces buccales de l'Abeille domestique

Question II-A : Réalisez une dissection des pièces buccales de l'Abeille domestique. Faites un dessin d'observation légendé de votre dissection (cadre II-A).

Les différentes parties de chaque appendice seront annotées. Leurs fonctions dans la collecte de la nourriture seront précisées.

Appelez un examinateur pour évaluer votre dissection et son adéquation avec votre dessin.

Réponse(s) à la question II-A

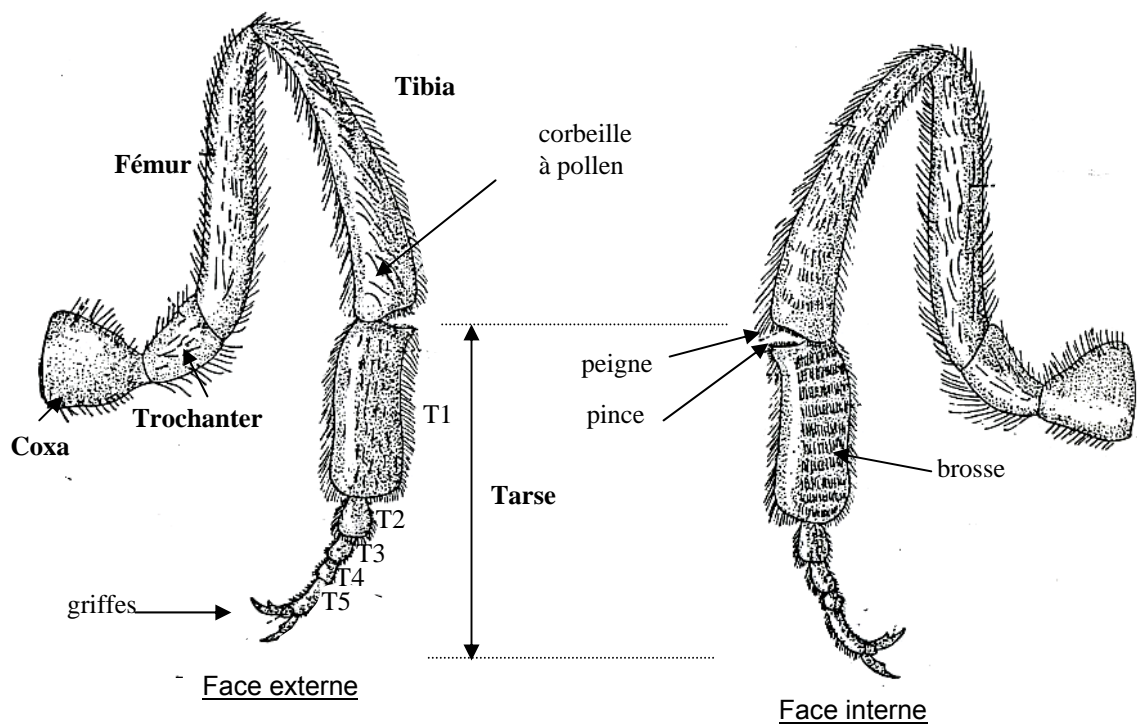


B - Étude d'une patte postérieure de l'Abeille domestique

Question II-B : Prélevez une patte postérieure d'Abeille domestique (P3). Représentez les structures de cette patte impliquées dans la collecte et le transport du pollen (cadre II-B).

Les différentes parties de cette patte seront annotées, leurs fonctions seront précisées.

Réponse(s) à la question II-B







Partie III

Étude de l'isolement reproductif de deux espèces de *Mimulus*

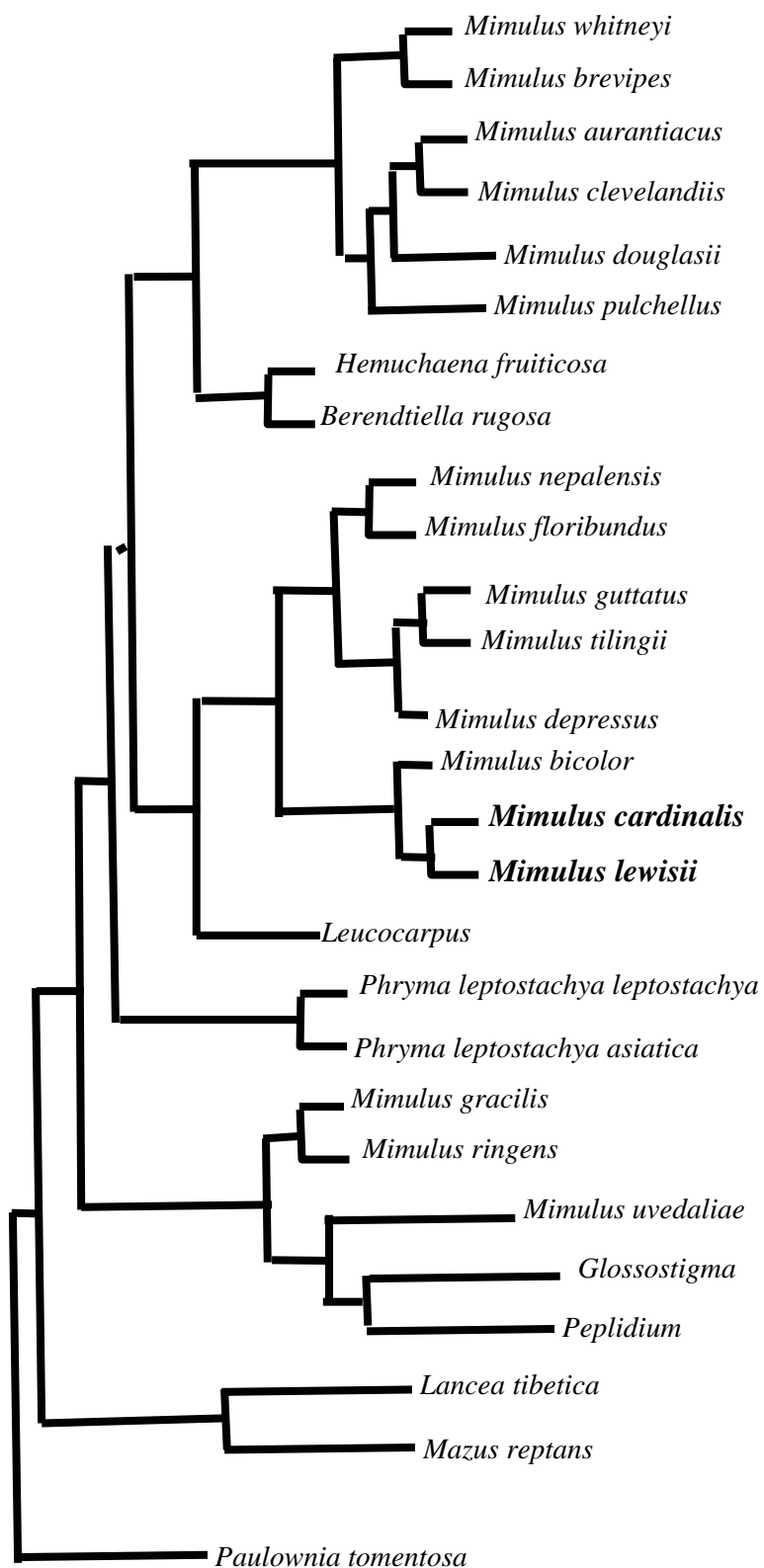
D'après Ramsey et al. (2003), Schemske et Bradshaw (1999)

Mimulus lewisii et *Mimulus cardinalis* sont deux espèces appartenant à la famille des Phymaceae et répandues dans l'ouest de l'Amérique du Nord. *Mimulus lewisii* est surtout trouvée dans des zones d'altitude moyenne à élevée des Rocheuses. *Mimulus cardinalis* est surtout trouvée dans des zones d'altitude faible à moyenne. Ces deux espèces se côtoient dans la Sierra Nevada.

Le tableau ci-dessous présente quelques caractéristiques de ces deux espèces.

	<i>Mimulus lewisii</i>	<i>Mimulus cardinalis</i>
		
Altitude moyenne de l'habitat	2264 m	1140 m
Altitude min -altitude max	de 915 à 3201 m	de 11 à 2744 m
Couleur des fleurs	rose	rouge
Longueur moyenne du pistil	25 mm	48 mm
Forme de la corolle	large	étroite
Quantité moyenne de nectar	25 µL	75 µL
Pollinisateurs	bourdons 	colibris 

Arbre phylogénétique de la famille des Phymaceae



A – Comparaison de la reproduction dans l'habitat naturel et en serre

Dans la zone où *Mimulus lewisii* et *Mimulus cardinalis* coexistent, en Sierra Nevada, aucune plante hybride n'a été trouvée malgré d'intenses recherches. Par contre, en serre, on peut obtenir des hybrides interfertiles en déposant artificiellement du pollen d'une espèce sur le pistil de l'autre espèce.

Question III-A : À l'aide de l'arbre phylogénétique page 7 et des caractéristiques des fleurs des deux espèces de *Mimulus* présentées page 6, formulez (cadre III-A) des hypothèses pour rendre compte de ces résultats.

Réponse(s) à la question III-A

D'après l'arbre phylogénétique, *Mimulus lewisii* et *Mimulus cardinalis* sont deux espèces sœurs car elles partagent un ancêtre exclusif.

Les résultats obtenus en serre, par des croisements artificiels, montrent qu'elles sont interfertiles.

Toutefois, dans leur habitat naturel, lorsqu'elles coexistent, aucune plante hybride n'a été trouvée.

Leur morphologie différente associée à des pollinisateurs différents peut expliquer cela. Ce qui laisse supposer une barrière prézygotique empêchant l'hybridation en milieu naturel.

Une spéciation sympatrique est à l'origine de ces deux espèces car, même interfertiles, elles peuvent partager le même environnement géographique et écologique sans s'hybrider.

B- Résultats de pollinisations artificielles en serre

Afin de proposer des explications à l'isolement reproductif observé chez ces deux espèces, des études sont menées à partir de plantes cultivées en serre.

Les étamines sont enlevées avant leur maturité sur un lot de *M. lewisii* et sur un lot de *M. cardinalis* : on forme des fleurs « féminisées ».

Pour chaque espèce, on dépose sur le pistil d'une fleur féminisée, le même nombre de grains de pollen (5 à 10 fois plus important que le nombre d'ovules). Chaque lot de grains de pollen est constitué :

- soit de 100% de pollen intraspécifique (pollen de la même espèce que le pistil),
- soit de 100% de pollen interspécifique (pollen de l'autre espèce),
- soit d'un mélange :
 - 3 :1 (75% de pollen intraspécifique + 25 % de pollen interspécifique),
 - 1 :1 (50% de pollen intraspécifique + 50% de pollen interspécifique),
 - 1 :3 (25% de pollen intraspécifique + 75% de pollen interspécifique).

La figure 1 (page 10) présente le nombre de graines obtenues par fruit. Le comptage est effectué sur 17 fruits pour chaque type de pollinisation et pour chaque espèce de « fleur **féminisée** ».

- **1A/ Fleur féminisée d'espèce *M. lewisii***
- **1B/ Fleur féminisée d'espèce *M. cardinalis***

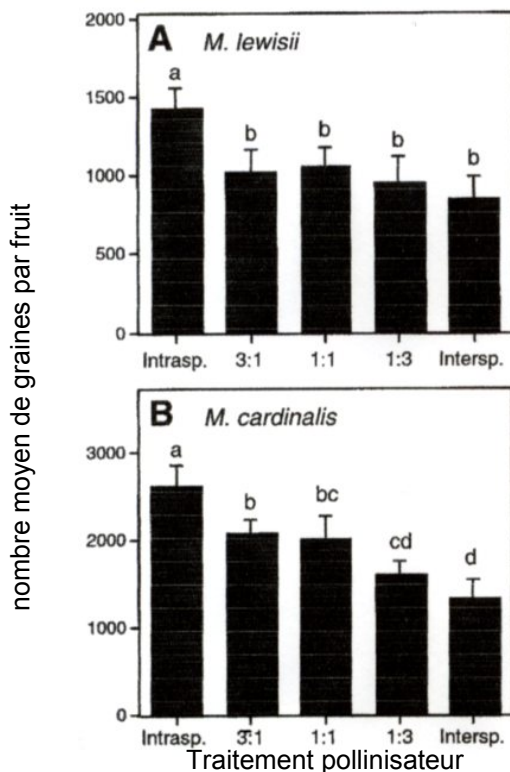
La figure 2 (page 10) présente le pourcentage de graines hybrides obtenues dans chaque type de pollinisation. Chaque cercle indique le pourcentage d'hybrides obtenus pour une pollinisation.

La ligne diagonale indique le pourcentage d'hybrides obtenus si le pollen intraspécifique et le pollen interspécifique ont le même potentiel de fécondation.

- **2A/ Fleur féminisée d'espèce *M. lewisii***
- **2B/ Fleur féminisée d'espèce *M. cardinalis***

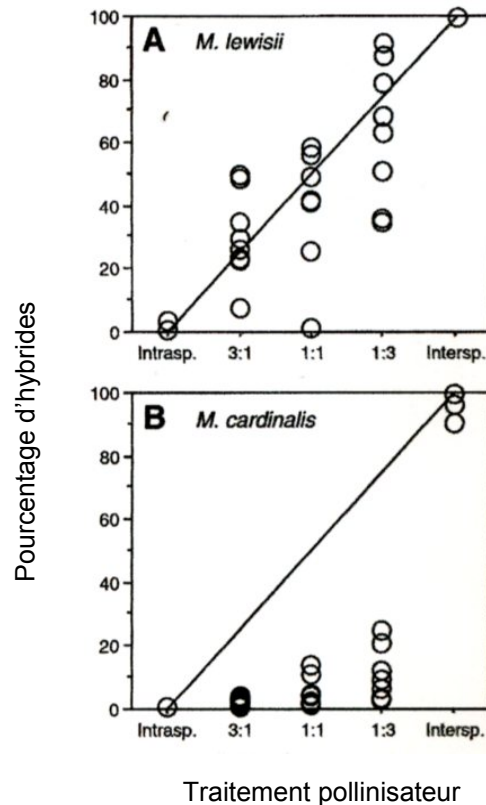
Question III-B : Vous analyserez et interpréterez les graphiques présentés page 10 et répondrez dans le cadre III-B (page 10).

Figure 1



Les moyennes avec des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les barres correspondent à l'erreur standard.

Figure 2



Traitement pollinisateur

Réponse(s) à la question III-B

1A et 1B : Taux de graines par fruit

- La pollinisation interspécifique produit moins de graines par fruit que la pollinisation intraspécifique (45% de graines en moins par fruit si 100% de pollen C pollinise des fleurs L et 52% de graines en moins par fruit si 100% pollen L pollinise des fleurs C).

- chez *M.Lewisii*, le nombre de graines obtenues par fruit est similaire lorsque du pollen interspécifique ou des mélanges de pollen interspécifique et intraspécifique sont utilisés.

- chez *M.cardinalis*, le nombre de graines obtenues par fruit est intermédiaire lorsque des mélanges de pollen sont utilisés.

2A et 2B : Etude du % d'hybrides de F1

- chez *M.Lewisii*, malgré des résultats hétérogènes, la moyenne du % d'hybrides obtenus dans le cas des divers mélanges correspond aux valeurs obtenus en cas de pollen intraspécifique et interspécifique de même potentiel fécondant. Le pistil de *M.lewisii* est aussi réceptif au pollen intraspécifique qu'au pollen interspécifique

On doit donc être étonné du résultat du graphique 1A qui montre une diminution du nombre de graines dans le cas d'utilisation d'un mélange de pollen interspécifique et intraspécifique Cette diminution du nb de graines n'est pas due à une compétition entre le pollen interspécifique et le pollen intraspécifique Hypothèse : mort précoce des embryons hybrides diminuant le taux de graines obtenues, existence d'une barrière postzygotique diminuant la capacité d'hybridation ?

- chez *M.cardinalis*, les mélanges de pollens intraspécifique et interspécifique produisent très peu d'hybrides même lorsqu'il y a un taux de 75% de pollen interspécifique. Le pollen *cardinalis* présente un meilleur potentiel reproducteur que le pollen *lewisii* pour le pistil *cardinalis*. Il y a compétition entre le pollen intraspécifique et le pollen interspécifique pour le pistil *cardinalis* au détriment du pollen interspécifique

Même si *M. lewisii* et *M. cardinalis* sont interfertiles, l'efficacité des fécondations interspécifiques est moindre.

C - Détermination de la *fitness* des hybrides à partir de cultures réalisées en serre

Afin d'estimer la *fitness* des hybrides obtenus entre ces deux espèces, divers paramètres (nombre de graines par fruit, taux de germination des graines, taux de survie des plantules, masse des graines.....) sont mesurés sur la descendance des croisements suivants :

- ***M. lewisii*** : 100% de pollen intraspécifique de *M. lewisii* sur pistil de *M. lewisii*
- ***M. cardinalis*** : 100% de pollen intraspécifique de *M. cardinalis* sur pistil de *M. cardinalis*
- **H(L) F1** : hybrides F1 obtenus par dépôt de pollen *M. cardinalis* sur pistil *M. lewisii*
- **H(C) F1** : hybrides F1 obtenus par dépôt de pollen *M. lewisii* sur pistil *M. cardinalis*

Plusieurs paramètres sont comparés entre le parent *M. lewisii* et les individus de F1 hybrides H(L) d'une part et entre le parent *M. cardinalis* et les individus de F1 hybrides H(C) d'autre part. Les résultats sont présentés dans le **tableau 1**.

Tableau 1 - *Fitness* relative de *Mimulus lewisii*, *M. cardinalis* et les hybrides F1 produits avec *M. lewisii* H(L) et *M. cardinalis* H(C). Pour chaque paramètre, la plus forte valeur de *fitness* est considérée égale à 1 et la plus basse valeur est exprimée de façon relative par rapport à 1.

	<i>M. lewisii</i>	H(L) F1	<i>M. cardinalis</i>	H(C) F1
Nombre de graines par fruit	1	0,595	1	0,511
Taux de germination	1	0,797	1	0,953
Taux de survie des plantules	1	1	1	1
Pourcentage de floraison	1	1	1	1
Biomasse des plantes	0,418	1	1	0,944
Viabilité du pollen	1	0,338	1	0,372
Masse des graines	1	0,591	1	0,263

Question III-C-1 : Rappelez la définition de la *fitness* (cadre III-C-1).

Réponse(s) à la question III-C-1

La *fitness* ou valeur sélective d'un génotype correspond au nombre de descendants viables et fertiles que produit en moyenne chaque individu de ce génotype à la génération suivante. Elle dépend principalement de sa survie entre le stade zygote (œuf) et le stade adulte, et de sa fertilité (nombre de descendants viables capables de se reproduire)

Question III-C-2 : Analysez et interprétez les résultats donnés dans le tableau 1 (cadre III-C-2).

Réponse(s) à la question III-C-2

Les hybrides sont moins fertiles que leurs parents (viabilité du pollen, nombre de graines par fruit, masse des graines, % de germination plus faibles). Toutefois si les plantules hybrides se développent, leur taux de survie est normal et leur biomasse est même supérieure à celle de leurs parents.

L'absence d'obtention d'hybrides viables et fertiles entre *M.lewisii* et *M.cardinalis* en conditions naturelles semble donc liée aux caractéristiques des hybrides eux-mêmes (ils produisent moins de graines, leur pollen est moins viable ...).

C'est surtout leur potentiel reproductif qui est affecté plutôt que leur développement végétatif.

Question III-C-3 : Confrontez les résultats obtenus à la question III-B (page 10) aux résultats obtenus à la question III-C-2 (page 12) (cadre III-C-3).

Réponse(s) à la question III-C-3

Les figures 1 et 2 de la question III-B montrent que même si *M.lewisii* et *M.cardinalis* sont potentiellement interfertiles, l'efficacité des fécondations interspécifiques est moindre. Ceci montre que l'isolement reproductif, observé dans les conditions naturelles, entre ces deux espèces est lié à des processus pré-zygotiques.

Mais le Tableau 1 indique aussi que, dans le cas où des hybrides sont obtenus, ces derniers sont eux-mêmes moins fertiles. Il y a donc également des processus post-zygotiques qui interviennent pour établir cet isolement reproductif.

Des processus pré-zygotiques et post-zygotiques interviennent pour expliquer l'isolement reproductif observé entre *M.lewisii* et *M.cardinalis*

D - Étude du comportement des pollinisateurs

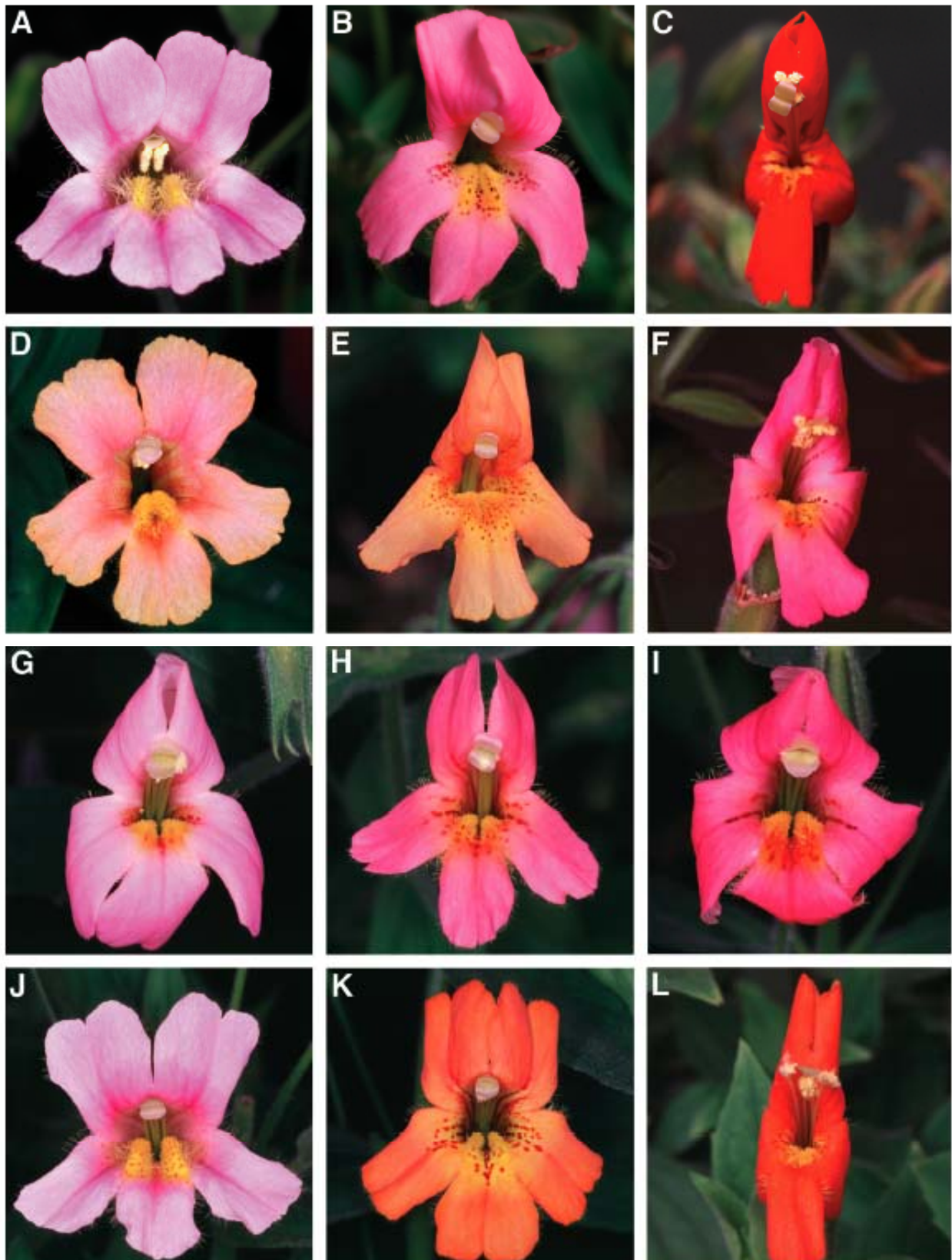
Chez ces deux espèces, le gène YELLOW UPPER (YUP) contrôle la présence ou l'absence de caroténoïdes dans les pétales :

- l'allèle C provoque la synthèse des pigments caroténoïdes et est à l'origine de la couleur rouge de la fleur chez un individu homozygote CC. Les individus *Mimulus cardinalis* sont homozygotes CC.

- l'allèle L empêche la synthèse des pigments caroténoïdes; la fleur est rose chez un individu homozygote LL. Les individus *Mimulus lewisii* sont homozygotes LL.

Le gène YUP suit une ségrégation mendélienne.

Un croisement est effectué entre un individu homozygote LL *Mimulus lewisii* et un individu homozygote CC *Mimulus cardinalis*. À titre indicatif, l'aspect des fleurs des hybrides F1 et de quelques hybrides F2 est présenté page 13.

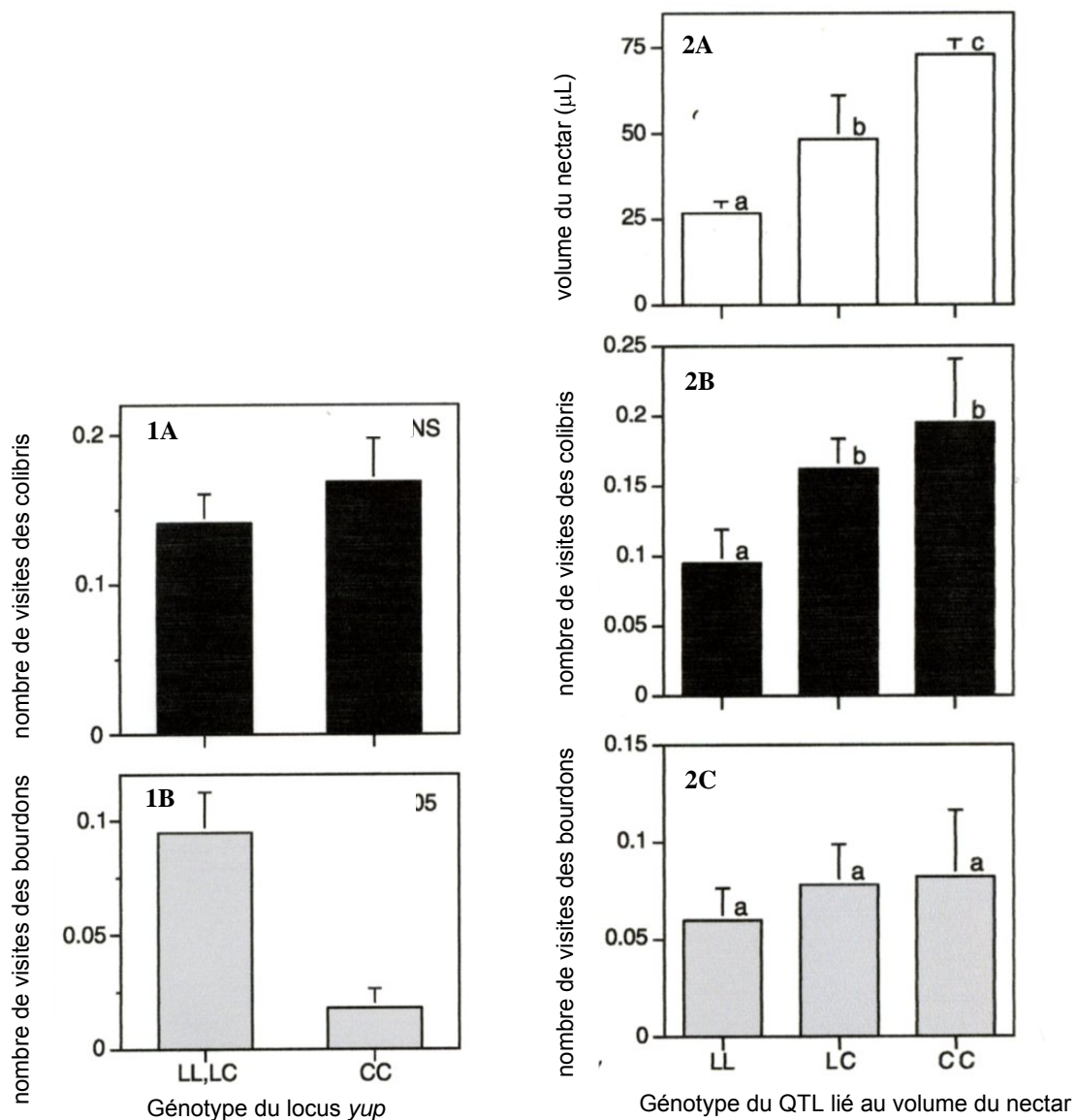


M. lewisii (A), un hybride F1 (B), *M. cardinalis* (C) et des exemples de la variation observée chez les fleurs des hybrides F2 (d'après Schemske et Bradshaw 1999)

Le taux de visites pollinisatrices par des colibris (figure 1A) ou des bourdons (figure 1B) est mesuré en nombre de visites par fleur et par jour dans le cas des différents génotypes du gène YUP trouvés parmi les hybrides F2 LL, LC, CC.

En parallèle, le volume de nectar (figure 2A) et le taux de visites pollinisatrices par des colibris (figure 2B) ou des bourdons (figure 2C) (en nombre de visites par fleur et par jour) sont mesurés en fonction des génotypes concernant le locus à effet quantitatif (QTL) contrôlant le volume de nectar. On note ici aussi LL, LC et CC les divers génotypes.

On rappelle qu'un locus à effet quantitatif (QTL) est un locus pour lequel la variation allélique est associée à la variation d'un caractère quantitatif.



Les moyennes avec des lettres identiques ne sont pas significativement différentes. Les barres correspondent à l'erreur standard.

Question III-D : Quelles conclusions tirez-vous de ces documents ? Rédigez votre réponse dans le cadre III-D.

Réponse(s) à la question III-D

Les colibris visitent pratiquement autant les fleurs de génotype Yup LL, LC et CC : ils ne sont pas très sensibles à la couleur de la fleur.

Les bourdons par contre ne visitent que très peu les fleurs de génotype CC, leur comportement est influencé par la couleur des fleurs, les bourdons préfèrent les fleurs roses aux fleurs rouges.

Les fleurs de génotype CC pour le QTL lié à la teneur en nectar, présentent le volume de nectar le plus important. On constate que ce sont aussi les fleurs les plus visitées par les Colibris. Plus la teneur en nectar est importante, plus le nombre de visites par les Colibris est forte.

Par contre les bourdons visitent indifféremment des fleurs sécrétant un volume différent de nectar.

Les colibris sont sensibles à la présence de nectar et peu sensibles à la couleur de la fleur

Les bourdons sont sensibles à la couleur de la fleur et peu sensibles à la présence de nectar.

Question III-E : Rédigez une conclusion générale pour la partie III (cadre III-E).

Réponse(s) à la question III-E

Mimulus lewisii et *Mimulus cardinalis* sont deux espèces sœurs qui, dans un environnement naturel, ne sont pas du tout pollinisées par les mêmes pollinisateurs. Du pollen d'une espèce a très peu de probabilité de se retrouver sur le pistil de l'autre espèce. Malgré un habitat naturel commun en Sierra Nevada, l'hybridation entre ces deux espèces est difficile.

Toutefois, elles peuvent avoir une descendance lors de pollinisations artificielles en serre, mais des processus de compétitions entre pollen intraspécifique et pollen interspécifique et une fitness plus faible des hybrides obtenus contribuent aussi à l'isolement reproductif de ces deux espèces.

Ainsi ces deux espèces sœurs sont issues d'une spéciation sympatrique liée à la mise en place d'un isolement reproductif malgré le partage d'une zone d'habitat commune en Sierra Nevada.

Partie IV

Exercice d'identification de huit échantillons

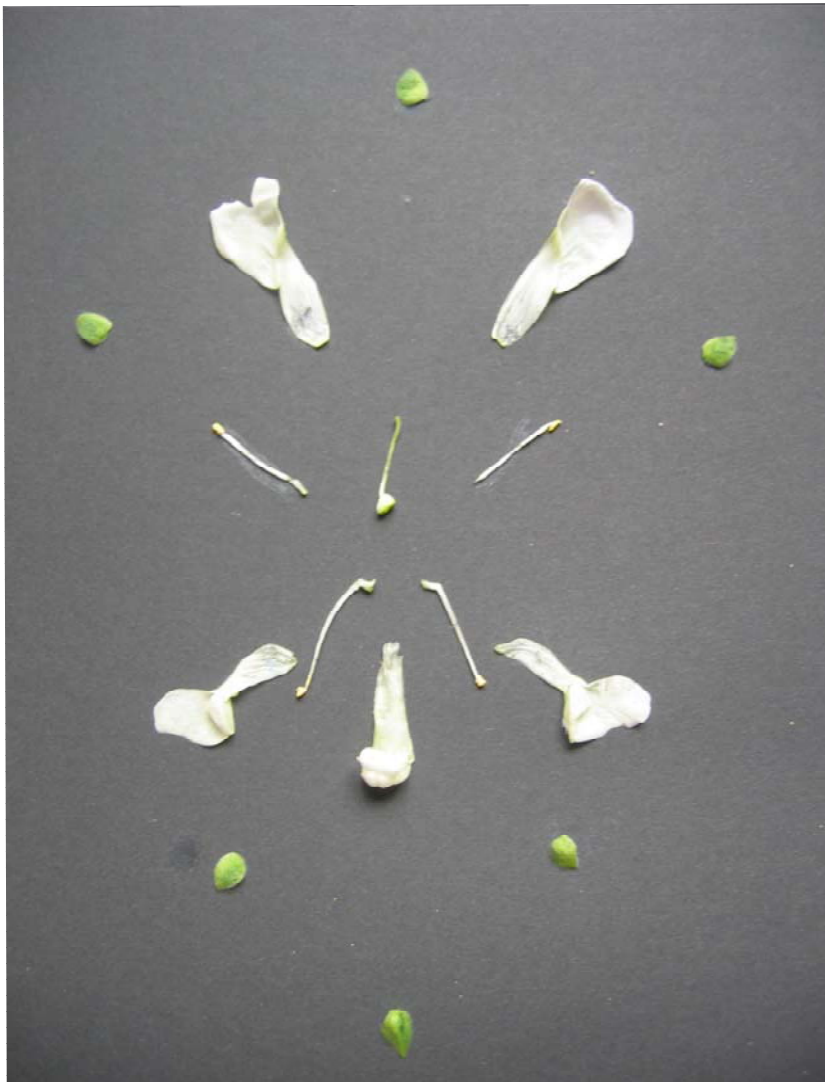
N° échantillon	Identification (nom vernaculaire et nom scientifique, position systématique)
1	syrphes du groseillier syrphus ribesii diptère (brachycère muscomorphe) syrphidae
2	xylocope violet , bourdon noir, Abeille charpentière xylocopa violacea hyménoptères Apidae
3	sphinx bourdon ou bombilyforme ou gazé, sphinx de la scabieuse hemaris tityus lépidoptères sphinx sphingidae
4	Scutellaire rayée, punaise arlequin, graphosome graphosoma italicum Hémiptère pentatomidae
5	sedum blanc, orpin blanc Sédum album crassulaceae
6	seneçon jacobée ou de jacob jacobea vulgaris asterales asteraceae
7	achillée millefeuille, herbe de la saint-jean, herbe a dinde, herbe au charpentier Achillea millefolium asterales asteraceae
8	brunelle commune prunella vulgaris lamiales lamiaceae

Nom :

Prénom :

salle n° :

Exemples de présentation de la dissection florale



Présentation mettant en évidence le nombre de pièces florales



Présentation mettant en évidence l'ovaire supère



Présentation mettant en évidence la structure gamosépale et gamopétale



Présentation mettant en évidence la position de la soudure des étamines



Présentation mettant en évidence la soudure d'un étamine à la corolle

TP_b

Commentaires de l'épreuve de Travaux pratiques de contre option - secteur C

L'épreuve de travaux pratiques de géologie pour les candidats des secteurs A et B portait en 2008 sur l'étude d'un objet géologique à l'échelle européenne : le Fossé rhénan, exemple classique de rift continental.

Elle comportait trois parties :

- la première partie (I) permettait de dégager les grands traits de la structure et de l'histoire du Fossé rhénan
- la seconde partie (II) consistait en une étude de pétrographie à partir de trois échantillons d'un même ensemble sédimentaire et devait déboucher sur une discussion des conditions de genèse de cette formation
- la troisième partie (III) abordait un aspect de la gestion des ressources à travers l'exemple de la géothermie

L'épreuve visait à évaluer la maîtrise par les candidats de différentes méthodes utilisées en sciences de la Terre :

- lecture de cartes géologiques : extrait de la carte géologique de la France au millionième (un document « incontournable » d'après le programme) et extrait de la carte géologique au 1/50 000ème de Colmar (extrait agrandi au 1/25 000ème) avec réalisation respectivement d'un schéma structural (question I.B) et d'une coupe géologique avec profil topographique fourni (question I.C)
- lecture et interprétation d'un document géophysique : un profil de sismique réflexion (question I.A)
- identification macroscopique d'échantillons de roches (II.A et B))

Elle permettait aussi de tester l'aptitude à raisonner à partir d'une mise en relation de données (parties II et III)

L'analyse des copies a montré une maîtrise globalement satisfaisante des méthodes citées ci-dessus, mais moins d'aisance dans la mise en relation des données et leur exploitation pour construire un raisonnement étape par étape.

Pour une plus grande efficacité, on rappellera quelques conseils généraux :

- **nécessité de connaissances solides sur tous les aspects fondamentaux, y compris sur le plan physique** : à titre d'exemple, savoir qu'un gradient géothermique fort / faible est un indicateur respectivement d'un transport de chaleur par conduction / convection.
- **aborder l'ensemble du sujet** en proposant des réponses à toutes les questions : par exemple, réaliser la coupe géologique (I.C) ou compléter le tableau de l'histoire du Fossé rhénan (I.D)
- ne pas rédiger de longs textes...et privilégier **des réponses précises et concises dégageant l'essentiel. En aucun cas, les candidats ne doivent dépasser les cadres prévus pour les réponses**

- exploiter un document ne consiste pas à le paraphraser, mais à extraire une / des donnée(s) utilisée(s) dans un raisonnement construit de façon à proposer une réponse à la question posée. Il est fondamental que les différents éléments de la réponse soient cohérents les uns avec les autres.
- ne pas chercher à aller plus loin que les documents fournis ne le permettent : ainsi pour la discussion des conditions de formation de la série sédimentaire abordée dans la seconde partie, il fallait se limiter en tenant compte de la localisation géographique et géologique à évoquer la mise en place d'une série détritique en bordure du Fossé rhénan : le caractère détritique parfois très grossier conduisait à évoquer l'érosion de reliefs, en bordure du fossé ; la forme usée des gros galets ou grains de quartz dans les deux roches fournies conduisant à une mise en place par des eaux courantes ; les variations de granulométrie et de constitution suggérait des variations de la dynamique de ces eaux courantes ; mais aucune donnée ne permettait de discuter du caractère marin ou non du milieu de dépôt, et donc d'éventuelles variations du niveau marin, comme trop de candidats ont cherché à le faire.

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

CONCOURS EXTERNE – ÉPREUVES D'ADMISSION – session 2008

TRAVAUX PRATIQUES DE CONTRE-OPTION DU SECTEUR C CANDIDATS DES SECTEURS A ET B

Durée totale : 2 heures

Géologie du Fossé rhénan

Ce document contient 20 pages numérotées de 1 à 20.

Répondez directement sur les feuilles dans les espaces prévus à cet effet.

Même en cas de non réponse, vous devez rendre la totalité de vos feuilles en indiquant vos nom, prénom et numéro de salle en tête de chaque partie.

L'épreuve comprend trois parties :

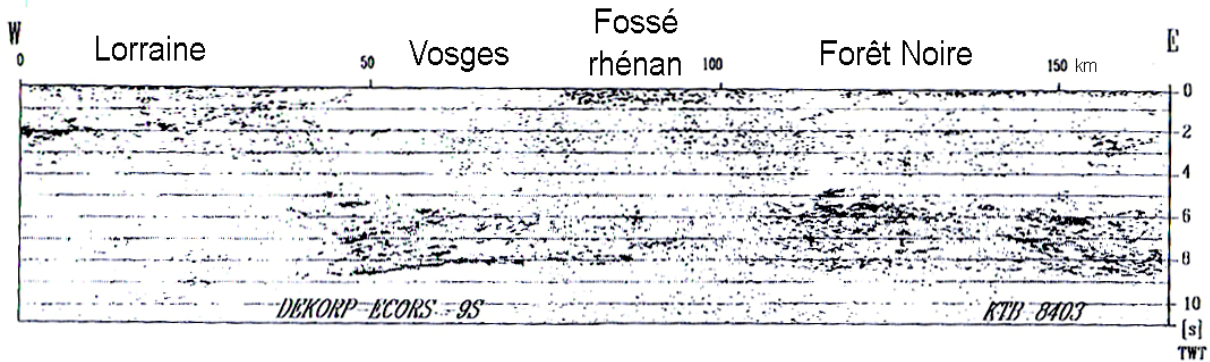
- **Partie I : Structure et histoire du Fossé rhénan** **pages 1 à 11**
barème : 12 /20
durée conseillée : 1h 15
- **Partie II : Pétrographie** **pages 12 à 14**
barème : 4 /20
durée conseillée : 25 minutes , dont 10 minutes, maximum, au poste d'observation
- **Partie III : Géothermie** **pages 15 à 20**
barème : 4 /20
durée conseillée : 20 minutes

**AVANT DE RENDRE VOTRE COPIE, VÉRIFIEZ QUE VOUS AVEZ BIEN INDIQUÉ VOS
NOM, PRÉNOM ET NUMÉRO DE SALLE EN TÊTE DE CHAQUE PAGE.**

Partie I : Structure et histoire du Fossé rhénan

I.A. Profil de sismique réflexion

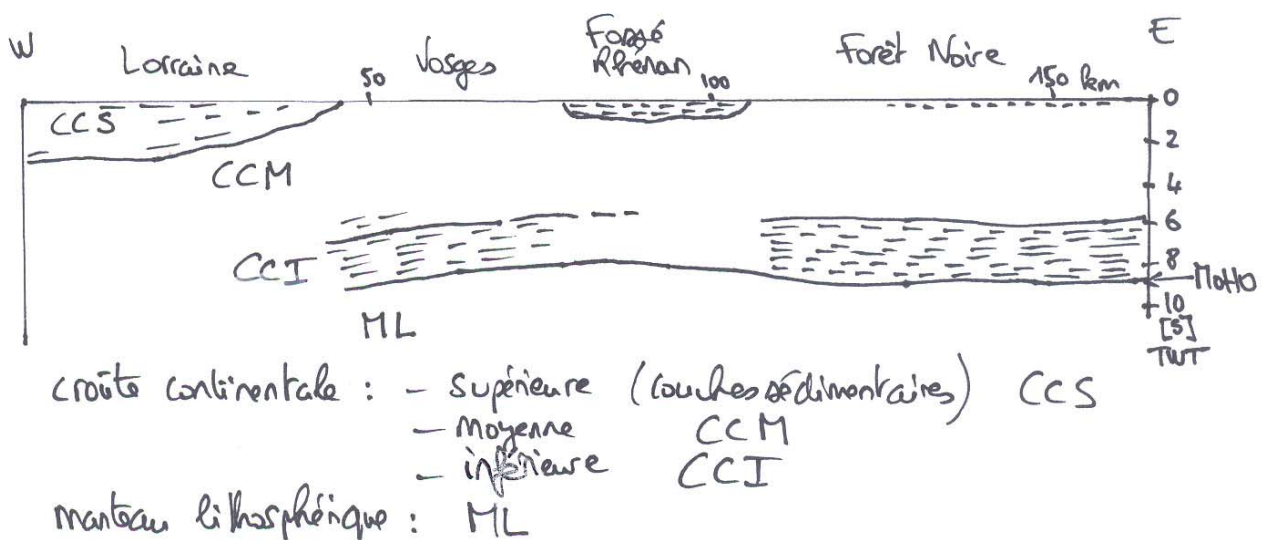
Le document 1 présente un montage obtenu à partir de deux profils de sismique réflexion réalisés selon le tracé indiqué sur la carte du document 2A (page 4) : DEKORP ECORS 9S, KTB 8403.



Document 1 : Montage réalisé à partir de deux profils de sismique réflexion
au niveau du Fossé rhénan (d'après Mayer, 1997)

Question I.A.1 : Proposez une interprétation de ce document sur le papier calque fourni que vous collerez dans le cadre ci-dessous.

Réponse(s) à la question I.A.1



TWT : temps double trajet

On attendait la reconnaissance des structures les plus apparentes. Il fallait éviter de chercher à présenter des connaissances livresques sur la structure du fossé.

Question I.A.2 : Indiquez deux caractéristiques du Fossé rhénan qui peuvent être dégagées de l'étude du document 1.

Réponse(s) à la question I.A.2

Il s'agissait de présenter les deux caractéristiques les plus apparentes du Fossé rhénan :

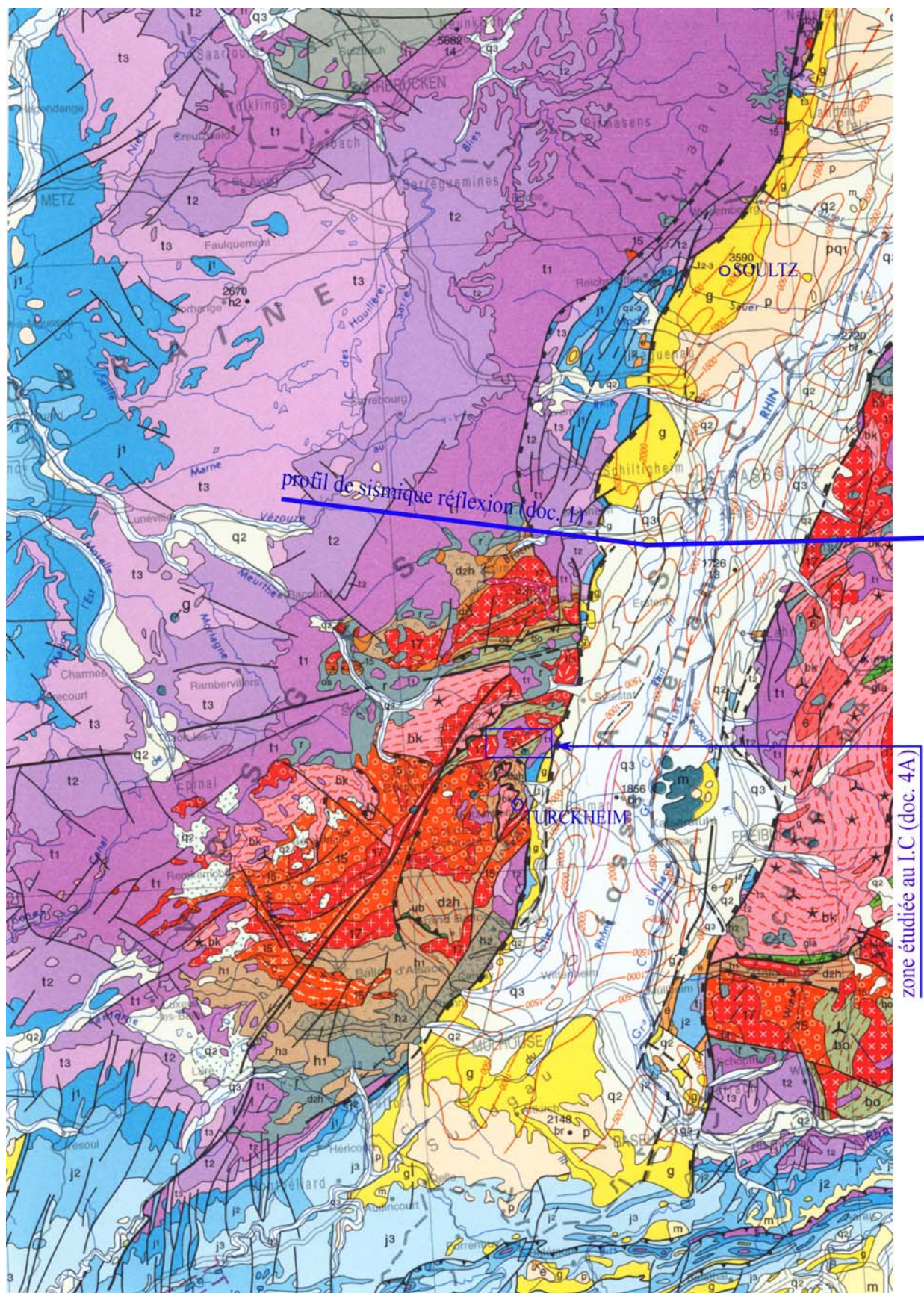
- un important empilement sédimentaire**
- une croûte continentale amincie ; une quantification de l'amincissement crustal pouvait être proposée ~12%**

I.B. Étude d'un extrait de la carte géologique de la France au millionième

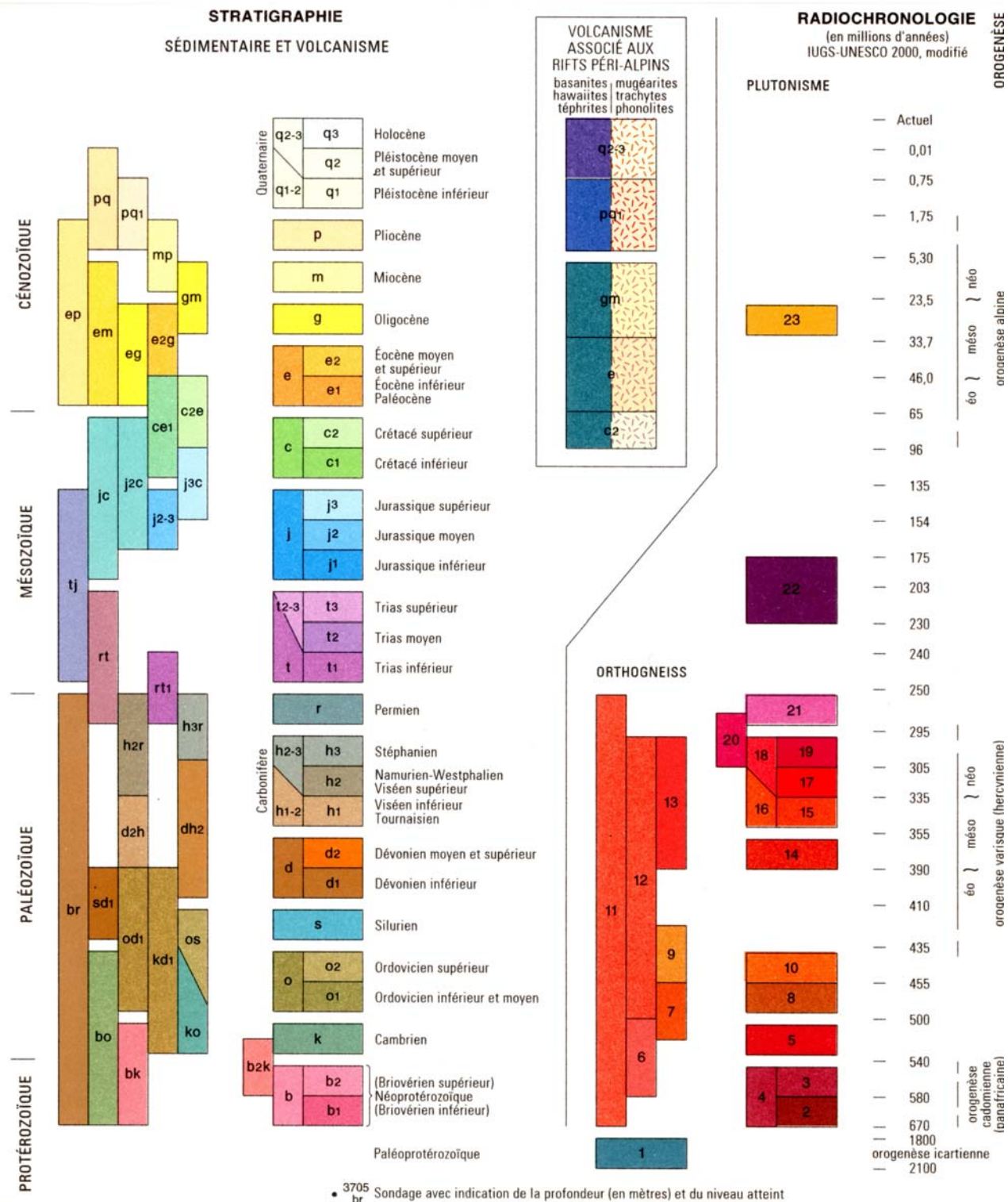
Cette partie était basée sur la lecture et l'exploitation d'un extrait de la carte géologique de la France au millionième, « document incontournable » d'après le programme de sciences de la Terre

Le document 2 (trois planches couleurs) est un extrait de la carte géologique de la France au millionième (document 2A) avec deux extraits de sa légende (documents 2B et 2C)

Question I.B : Réalisez un schéma structural correspondant à cet extrait sur le document 3, page 7.



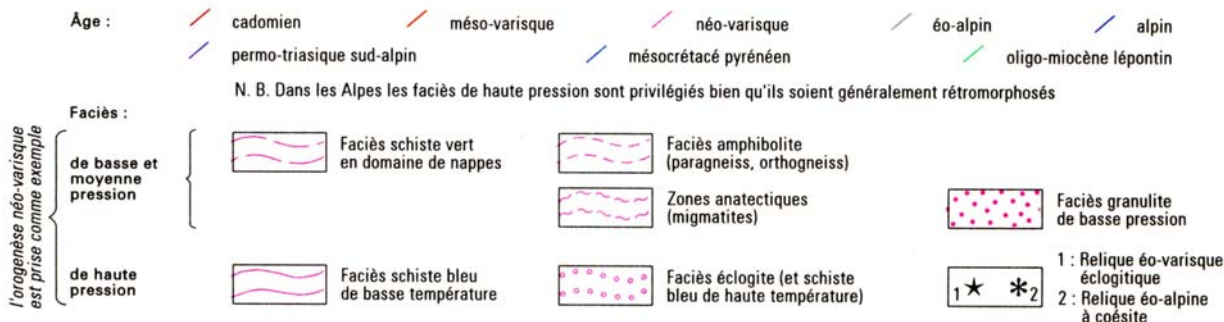
Document 2A : Extrait de la carte géologique de la France au millionième



Document 2B : Extrait de la légende de la carte géologique de la France au millionième

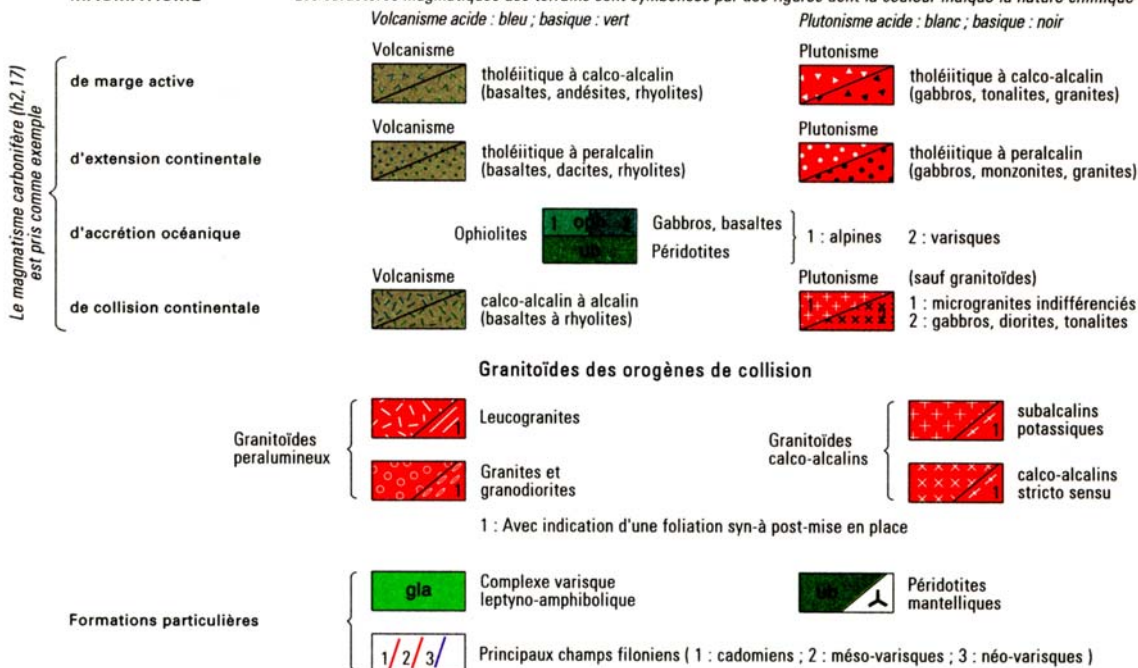
MÉTAMORPHISME

Les caractères métamorphiques des terrains sont symbolisés par des figurés dont la couleur indique l'âge de l'orogénèse, la forme indique le faciès du métamorphisme, et l'orientation correspond à la principale foliation régionale

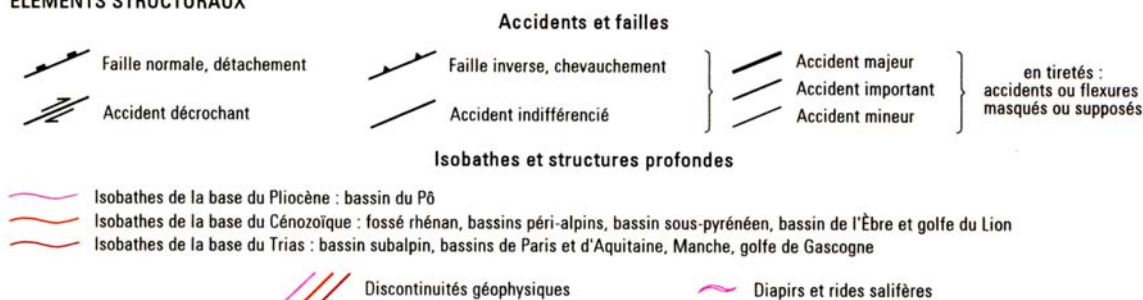


MAGMATISME

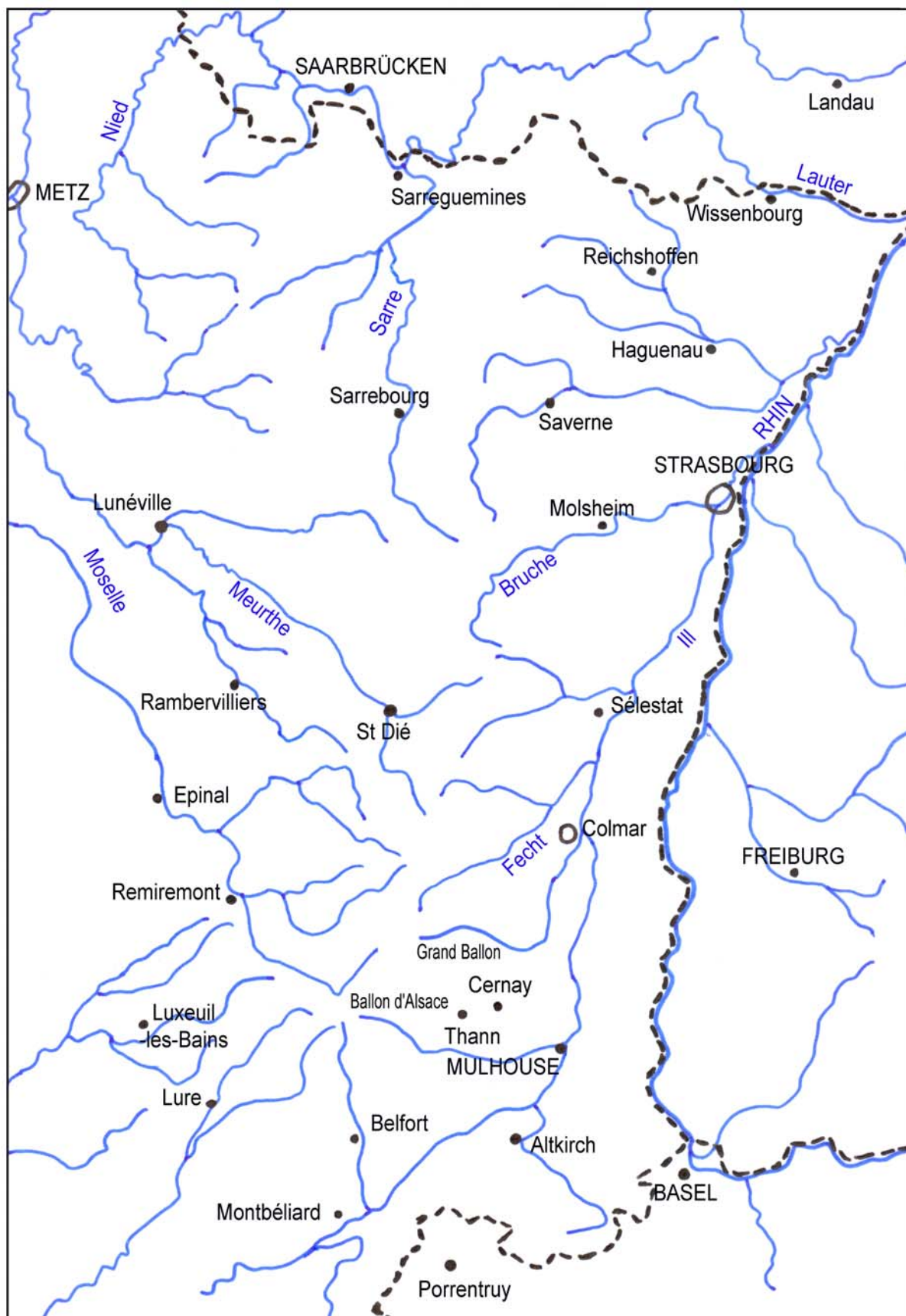
Les caractères magmatiques des terrains sont symbolisés par des figurés dont la couleur indique la nature chimique :



ÉLÉMENTS STRUCTURAUX



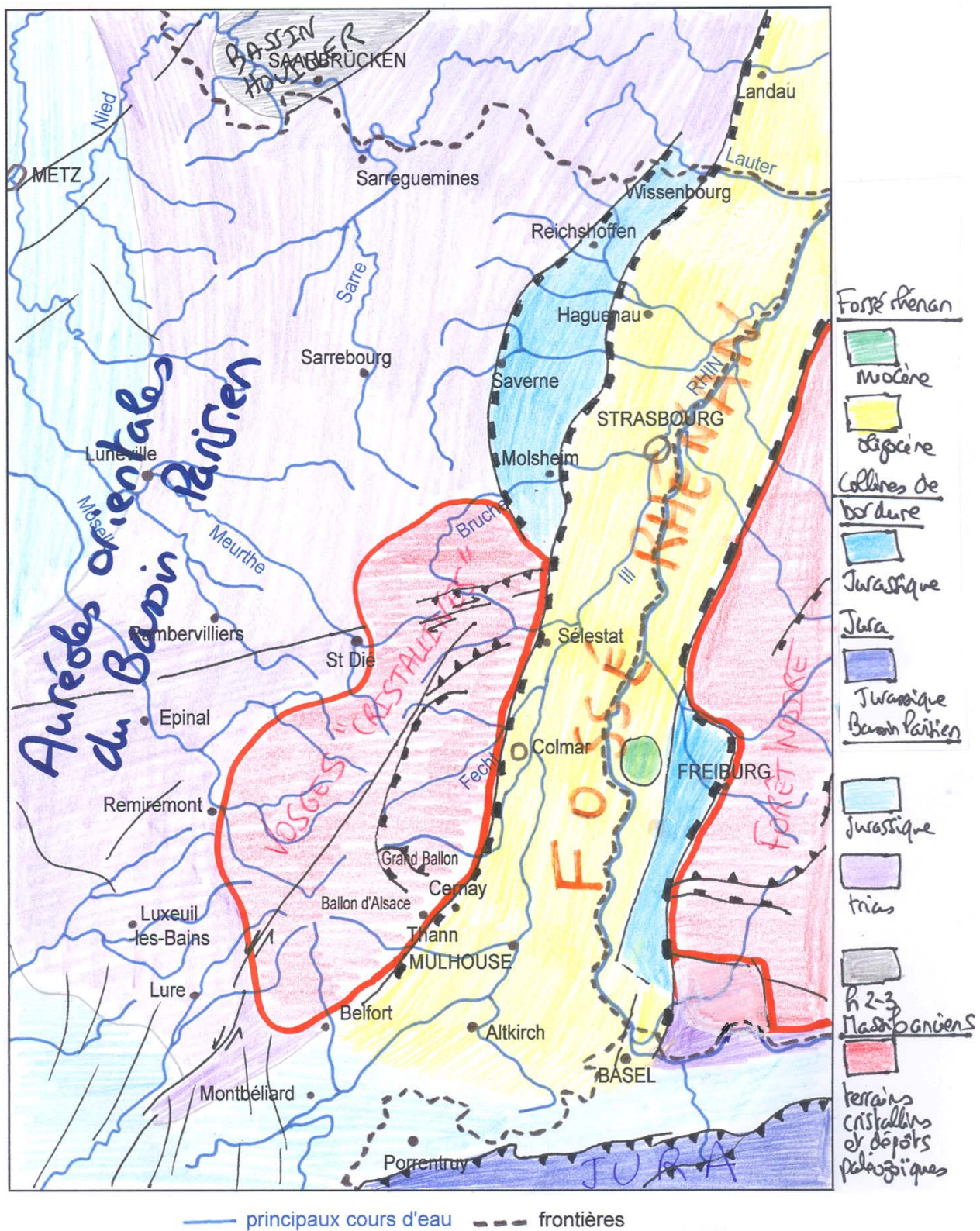
Document 2C : Extrait de la légende de la carte géologique de la France au millionième







— principaux cours d'eau - - - frontières

Document 3 (même échelle que le document 2A)

Le schéma structural devait faire apparaître les grands ensembles géologiques avec les formations géologiques représentatives et les traits structuraux majeurs.



Document 3 : Schéma structural de l'extrait de la carte géologique de la France au millionième

 faille normale
  faille inverse, chevauchement
  décrochement
  faille indifférenciée

I.C. Étude d'un extrait de la carte géologique de Colmar au 1/50 000

Le document 4B, page 9, est un extrait de la carte géologique de Colmar au 1/50 000, agrandi au 1/25 000. Un extrait de la légende de cette carte est fourni ci-dessous dans le document 4A.

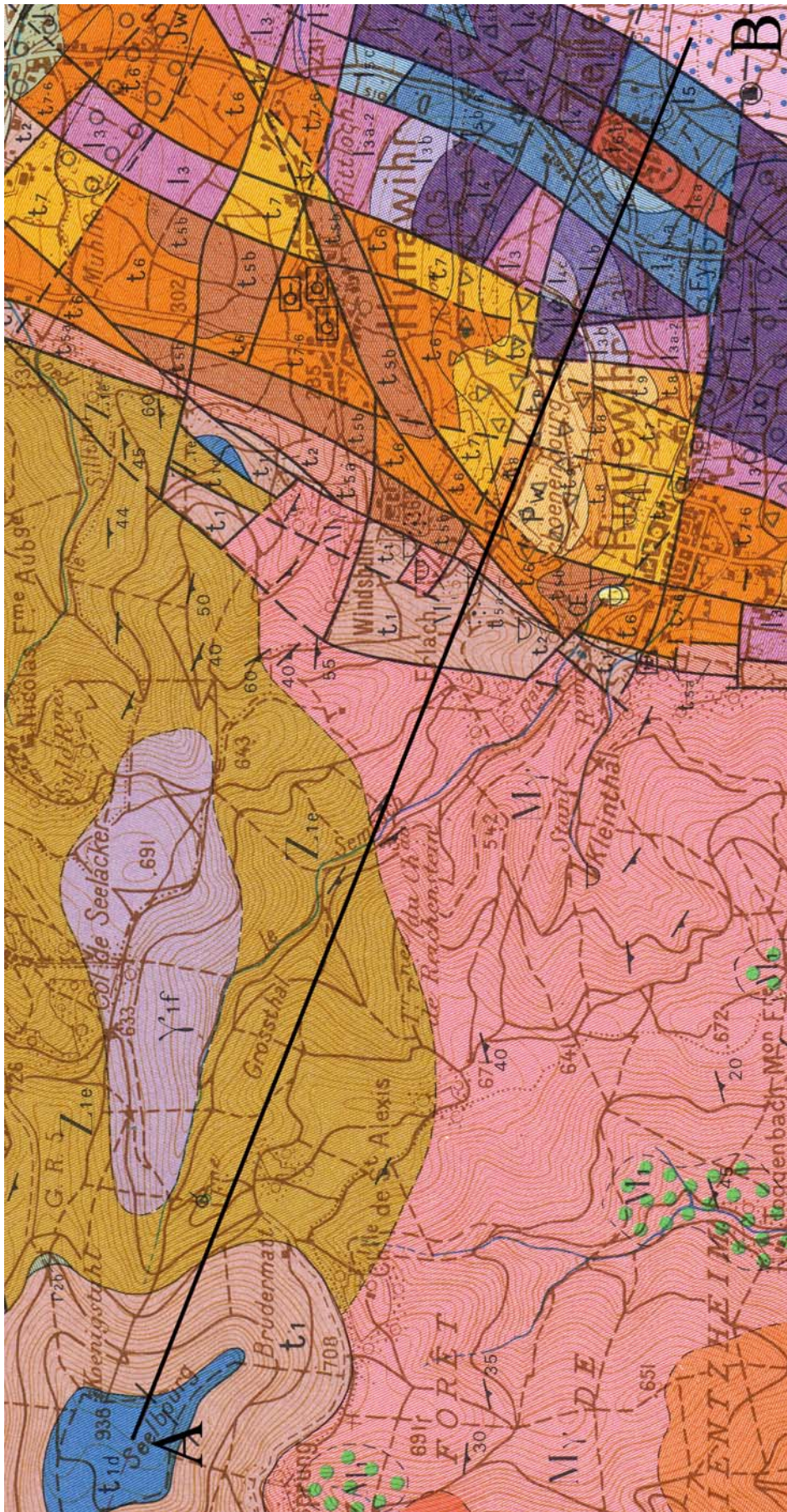
Le secteur présenté sur cet extrait de carte est localisé sur la bordure occidentale du Fossé rhénan et est indiqué sur la carte du document 2A, page 4.

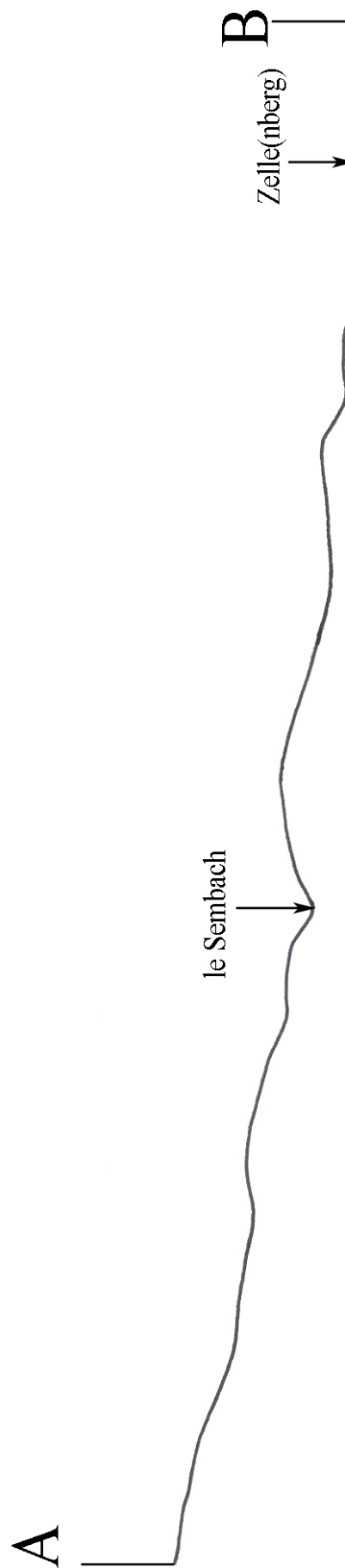
Question I.C : Réaliser, à partir du profil topographique fourni (document 4C, page 10) la coupe indiquée selon le tracé AB.

TERRAINS SÉDIMENTAIRES		TERRAINS CRISTALLINS	
TERTIAIRE		ROCHES CRISTALLOPHYLLIENNES ET ROCHES CRISTALLINES	
Lattorfien 1 Conglomérats et marnes interstratifiés (facès de bordure du bassin) 2 Zone salifère moyenne et supérieure (couches de Pechelbronn); facès du centre du bassin, essentiellement marneux	g ¹ g ²	Z ₁₈	Gneiss perlés à grenat et cordiérite
			Granite porphyroblastique hétérogène à enclaves basiques (migmatites de Kaysersberg)
			Granite porphyroblastique hétérogène
			Granite migmatitique de Kaysersberg
			Granite à deux micas, orienté ou non, de Turckheim
SECONDAIRE			
Lias	l ₁₆ l ₁₅ l ₁₄		
	l ₁₃ l ₁₂ l ₁₁		
Trias	t ₉		
	t ₈		
Keuper	t ₇ t ₆		
	t ₅ t ₄		
Muschelkalk	m ₃ m ₂ m ₁		
	m ₀		
Buntsandstein	b ₃ b ₂ b ₁		
	b ₀		
PRIMAIRE			
Saxonia	s ₃ s ₂ s ₁		
	s ₀		

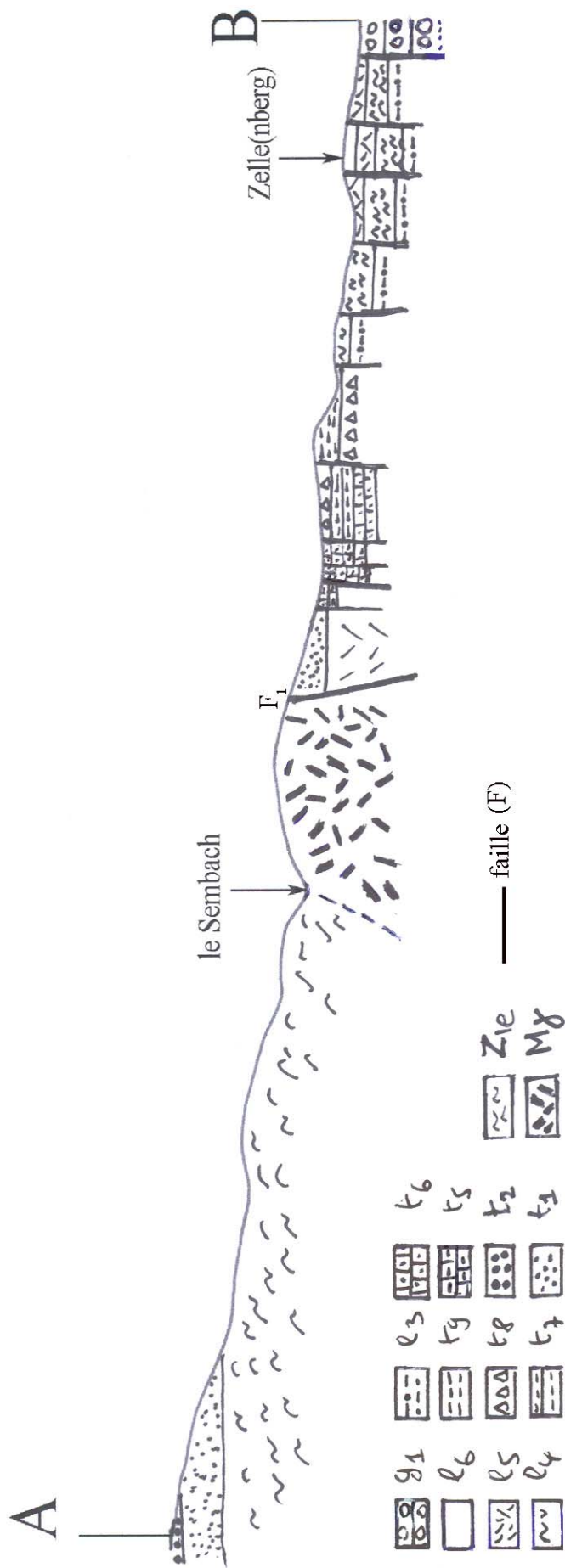
Les formations OE, Fy, Jx, Pw et Jw sont des formations superficielles quaternaires

Document 4A : Extrait de la légende de la carte géologique de Colmar au 1/50 000





Document 4C : Profil topographique réalisé suivant AB



Document 4C : Coupe géologique suivant AB

Les candidats devaient faire apparaître la disposition quasi horizontale des formations du Trias à l'ouest (point A), le caractère probablement horizontal des formations du Trias et Lias dans la zone faillée de la partie est ; la géométrie de la faille la plus occidentale (F₁) devait être correctement analysée : faille normale à pendage vers l'est ; pour les autres failles, l'analyse géométrique était plus délicate et différentes représentations ont été admises à condition qu'elles soient logiques dans le contexte ; en s'appuyant sur l'extrait de la carte de la France, on pouvait proposer une épaisseur importante de la formation g1 (cf. isobathes de la base du Cénozoïque)

I.D. Histoire géologique du Fossé rhénan

Question I.D : Complétez avec les seules indications tirées de l'analyse des documents 1 à 4 le tableau du document 5, en plaçant dans un ordre chronologique, qui sera daté, les principaux événements sédimentaires, magmatiques et tectoniques.

Chronologie	Évènements sédimentaires	Évènements magmatiques	Évènements tectoniques

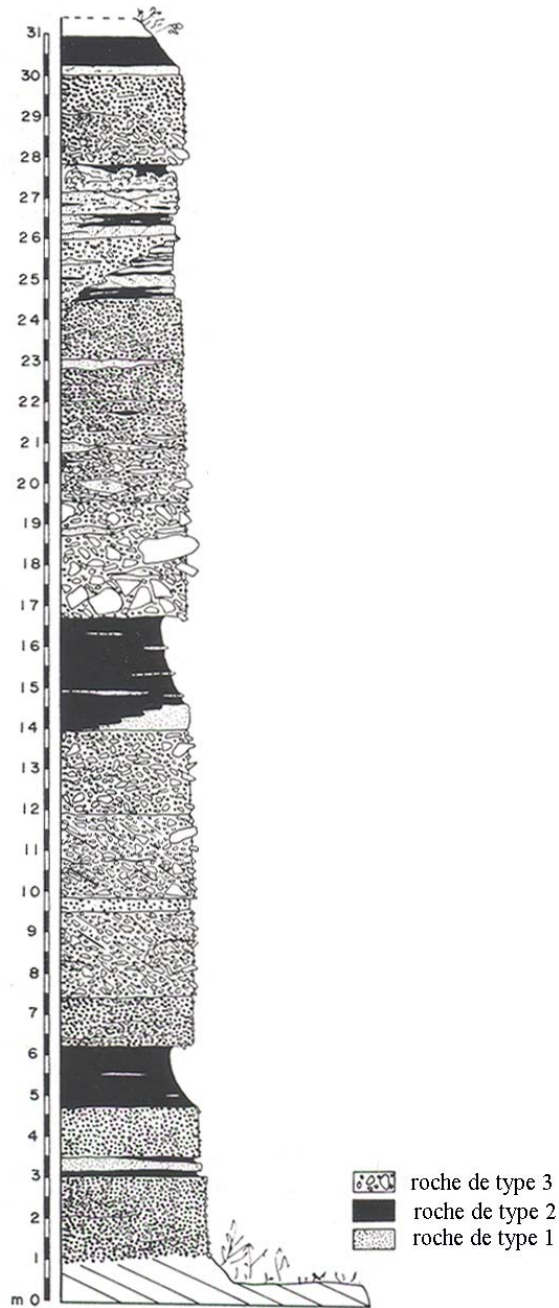
Document 5 : Chronologie des principaux événements sédimentaires, magmatiques et tectoniques

Chronologie	Évènements sédimentaires	Évènements magmatiques	Évènements tectoniques
Quaternaire	Dépôts alluvions fluviales		<u>Chevauchement du Jura</u> sur le sud du Fossé rhénan
Miocène		Volcanisme basique (Kaiserstuhl)	
Oligocène	Epais dépôts sédimentaires (jusqu'à 3000 m)		Amincissement crustal ; failles normales ;
Oligocène- Eocène <u>- 65 Ma</u>		Petits épanchements basaltiques (e/g)	<u>formation du Fossé rhénan</u>
Crétacé	? (pas de dépôt)		
Jurassique	Dépôts sédimentaires		
Trias	Dépôts sédimentaires		
Permien <u>- 295 Ma</u>	Dépôts sédimentaires localisés	Leucogranites (19)	<u>Orogenèse varisque :</u>
Carbonifère (h2-3)		Granites / granodiorites (17) dont certains calco- alcalins	Bassins post- épaississement Décrochements syn/ post 17
Carbonifère h1		Volcanisme calco-alcalin à alcalin	
Dévonien - 410 Ma		Volcanisme tholéitique à calco-alcalin de marge active	Subduction : reliques éclogitiques
<u>- 580-500 Ma</u>			<u>Orogenèse cadomienne</u>

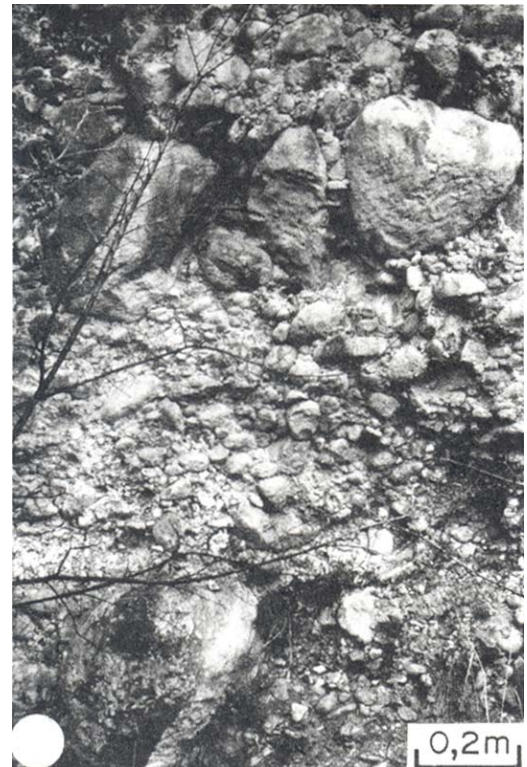
Document 5 : Chronologie des principaux évènements sédimentaires, magmatiques et tectoniques

Partie II : Pétrographie

Le document 6 présente une colonne stratigraphique d'âge oligocène (Lattorfien) qui a été levée dans une carrière située à proximité de Turckheim, localité située sur la bordure occidentale du Fossé rhénan au niveau de Colmar (la localisation de Turckheim est indiquée sur la carte du document 2A, page 4) : trois types principaux de roches, notés 1, 2 et 3, peuvent être repérés.



Document 6 : Colonne stratigraphique observée dans une carrière à Turckheim
(d'après Düringer, 1988)



Document 7 : Photo représentative de la roche de type 3
(d'après Düringer, 1988)

II.A. Les échantillons A et B fournis sont représentatifs respectivement des roches de type 1 et 2.

Le temps de passage au poste d'observation est de 10 minutes maximum.

Question II.A : Déterminez, en la justifiant, la nature de chaque roche.

Échantillon A : roche de type 1

Grès dont les éléments figurés de taille voisine du millimètre sont principalement du quartz avec quelques grains calcaires. Grains fortement cimentés : ciment calcaire

Échantillon B : roche de type 2

Grès très fin à grains de quartz et ciment calcaire. Roche relativement friable et coloration brunâtre : présence probable d'une fraction fine de nature argilo-marneuse

II.B. Le document 7 (page 12) présente une photo représentative de la roche de type 3.

Question II.B : Déterminez, en la justifiant, la nature de cette roche.

Roche de type 3

Conglomérat de type poudingue

Question II.C : À partir de vos réponses aux questions II.A et II.B, discutez les conditions de genèse de la formation présentée dans le document 6 (page 12).

Réponse(s) à la question II.C

Apports détritiques le plus souvent fins, mais avec des arrivées de matériel grossier

Présence de reliefs...proches...soumis à érosion mécanique

Un agent de transport susceptible de transporter et déposer de gros galets : torrents avec des épisodes de crue ? ...

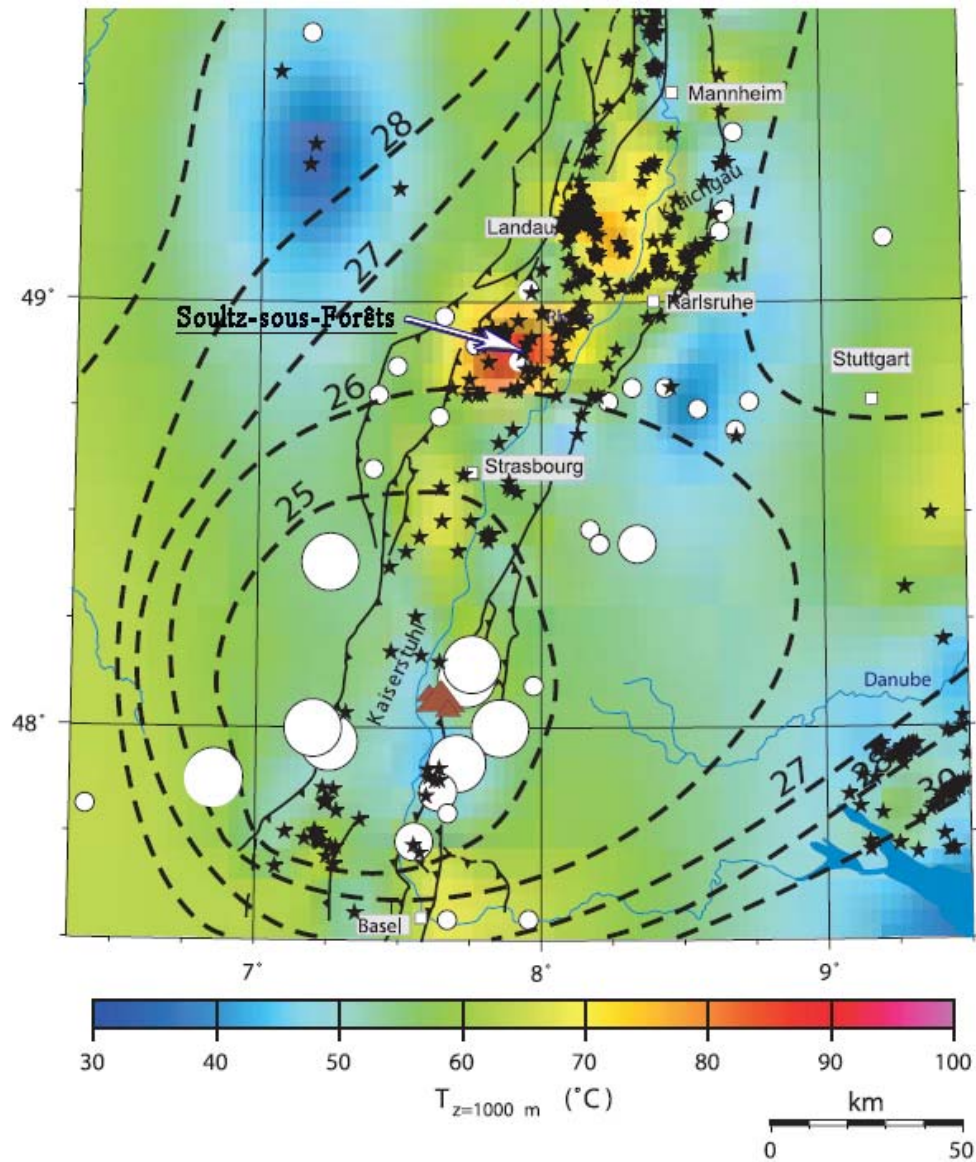
Dépôt au pied des reliefs : bordure d'un lac ? ou d'une mer ?

Attention à ne pas chercher à aller plus loin que ne le permettent les échantillons

Partie III : Géothermie

Le flux géothermique moyen pour le Fossé rhénan est de 80 mW.m^{-2} . On observe une forte anomalie de ce flux entre Strasbourg au sud et Landau au nord, centrée autour de Soultz-sous-Forêts. On s'intéresse dans cette partie à l'origine de cette anomalie et à son exploitation énergétique potentielle.

III.A. Le document 8 présente la température mesurée dans différents forages réalisés dans le Fossé rhénan et les zones voisines



(★) : forage - - - : profondeur du Moho en km ▲ : édifices volcaniques anciens (Kaiserstuhl)

○ : les cercles indiquent par leurs diamètres le pourcentage d'hélium d'origine mantellique dans les eaux ou gaz souterrains

Document 8 : Température mesurée à la profondeur de 1 000 m dans différents forages réalisés dans le Fossé rhénan et les zones voisines (d'après Clauser, 2002)

Question III.A : En vous fondant sur la structure du Fossé rhénan (partie I) et l'analyse du document 8 (page 15), formuler des hypothèses pour expliquer l'origine de l'anomalie géothermique observée à Soultz-sous-Forêts ?

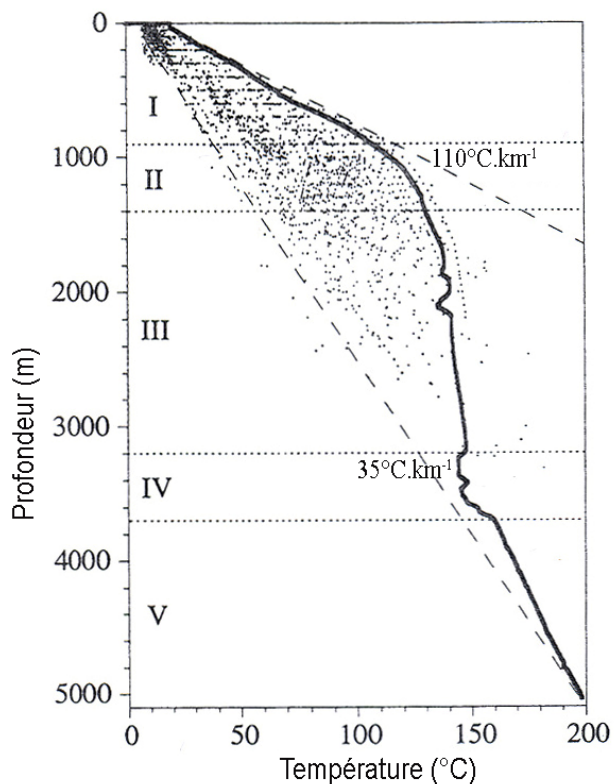
Réponse(s) à la question III.A

- première hypothèse

Fossé rhénan : zone à croûte continentale amincie ; donc manteau lithosphérique plus proche de la surface, d'où gradient géothermique plus fort

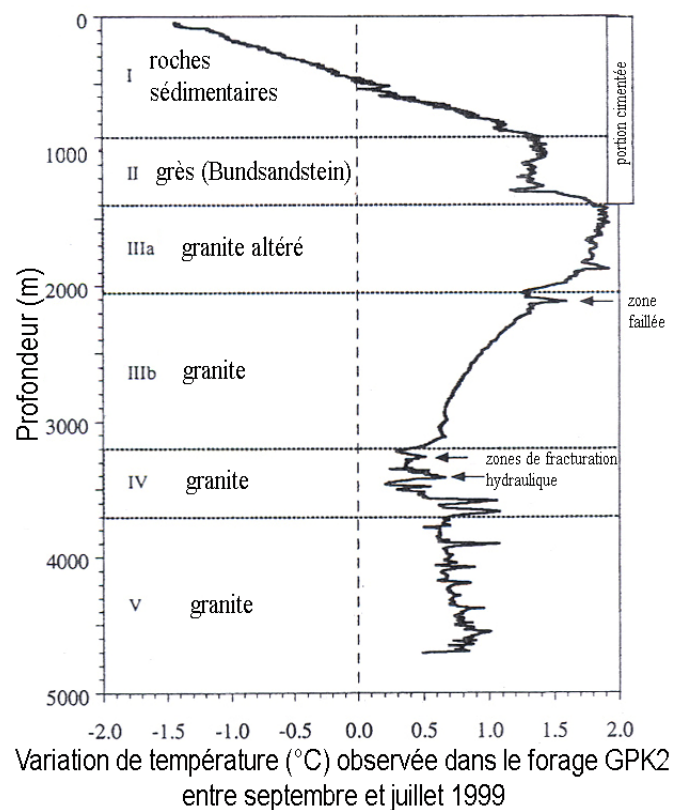
- seconde hypothèse : infiltrations d'eaux des précipitations sur les reliefs bordant le fossé, réchauffement en profondeur, remontées rapides le long des failles situées en bordure ou à proximité de la bordure du fossé

III.B. Les observations présentées dans le document 9 ont été réalisées au cours du forage d'exploration GPK2 de Soultz-sous-Forêts :



9a. Températures mesurées dans le forage GPK2 (trait continu)

Les points correspondent aux températures mesurées dans différents autres forages réalisés dans le Fossé rhénan.



9b. Variation de température observée dans le forage GPK2 entre juillet et septembre 1999

Les opérations finales de forage ont été réalisées entre février et mai 1999 : pendant cette période, des boues de forage de températures comprises entre 30° et 60°C ont circulé dans le puits.

Document 9 : Données thermiques collectées dans le forage GPK2 de Soultz-sous-Forêts
(d'après Pribnow , 2000)

Question III.B : Montrez en vous fondant sur le document 9 (page 17) que l'anomalie géothermique de Soultz-sous-Forêts pourrait être en partie liée à un transport de chaleur par des circulations d'eaux souterraines.

À l'appui de votre réponse, réalisez un schéma synthétique correspondant à une coupe verticale ouest-est à travers la zone d'anomalie thermique.

Réponse(s) à la question III.B

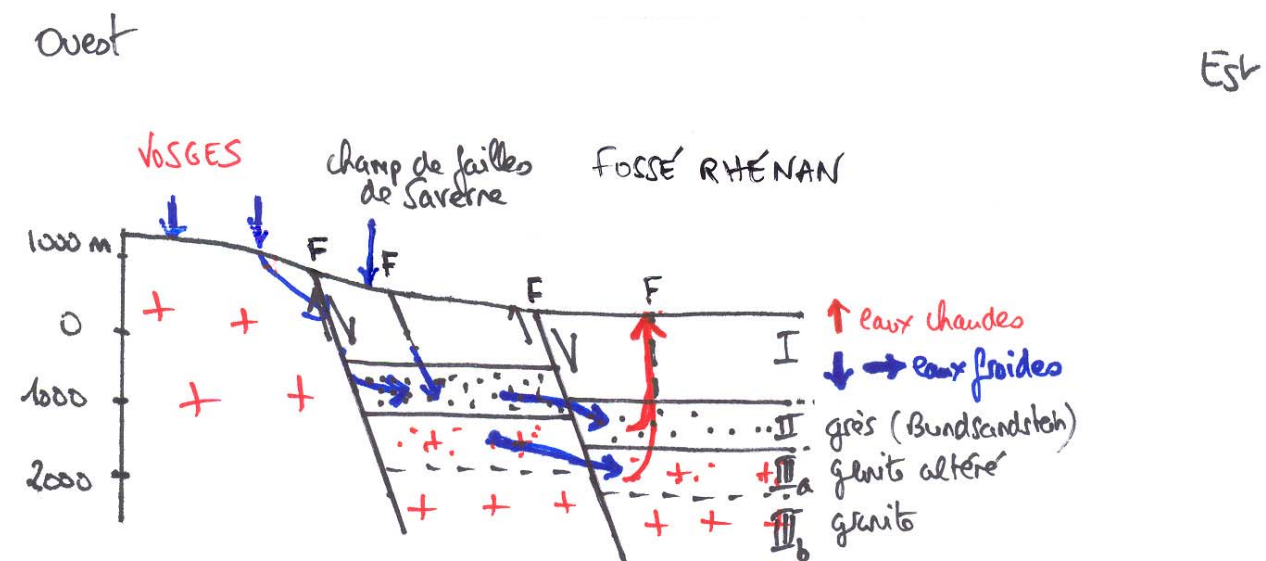
1^{ère} étape du raisonnement : exploitation du document 9.a

Gradient géothermique différent de la moyenne : fort dans le 1^{er} km → indication d'un transport de chaleur par conduction, faible de 1 à 4 km (niveaux II, III, IV) → indication d'un transport de chaleur par convection...ce qui nécessite dans la croûte un fluide porteur...ici...eaux...

2^{ème} étape du raisonnement : exploitation du document 9.b

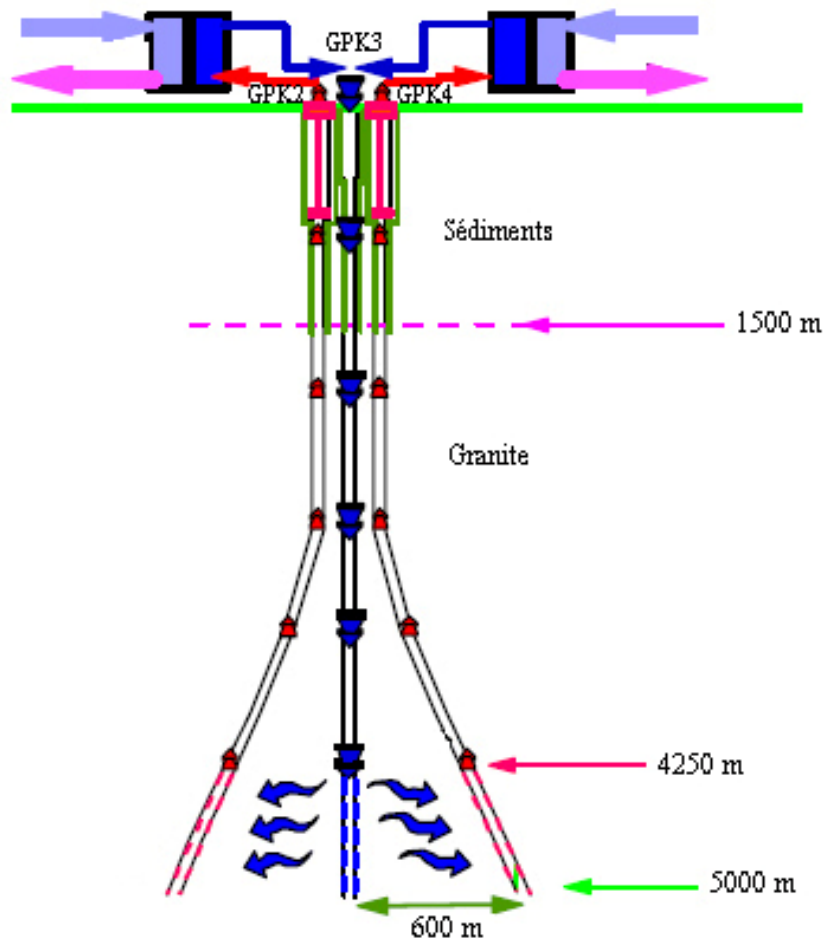
- les boues de forage ont réchauffé le milieu jusqu'à 500 m, l'ont refroidi aux profondeurs plus importantes
- le retour à l'équilibre se fait plus rapidement dans les niveaux II et III (moins dans II par rapport à III : effet de la cimentation des parois du forage ?), dans la zone faillée au sommet de IV...ainsi que dans les zones de IV fracturées artificiellement (fracturation hydraulique) → réchauffement par circulation de fluides plus efficace dans les roches perméables (grès II, granite altéré IIIa, zones fracturées naturellement : granite IIIb au sommet - zone faillée et artificiellement : granite IV)

Schéma synthétique :



III.C. Des explorations ont été réalisées depuis 1987 pour évaluer le potentiel énergétique de la zone d'anomalie thermique de Soultz-sous-Forêts.

Le document 10 présente un schéma d'un pilote géothermique en cours d'installation.



Document 10 : Schéma d'un pilote géothermique en cours d'installation à Soultz-sous-Forêts
(d'après Fritsch, 2007)

Question III.C.1 : Que représentent les puits GPK3 d'une part, GPK2 et GPK4 d'autre part ?

Réponse(s) à la question III.C.1

GPK3 : puits d'injection d'eau de surface = eau froide

GPK2 et 4 : puits de pompage des eaux réchauffées en profondeur

Question III.C.2 : En rappelant les définitions de ces expressions, expliquez si l'exploitation envisagée correspondrait à ce qu'on appelle communément de la « géothermie basse énergie » ou de la « géothermie haute énergie »

Réponse(s) à la question III.C.2

Exploitation d'eaux chaudes pompées en profondeur soit pour du chauffage (géothermie basse énergie), soit pour produire de l'électricité (géothermie haute énergie). La production d'électricité nécessite que les eaux soient suffisamment chaudes, c'est-à-dire à des températures supérieures à 150-180°C pour pouvoir produire de la vapeur faisant fonctionner les turbo-alternateurs, ce qui est le cas à Soultz pour les eaux situées à 4-5 km de profondeur

Question III.C.3 : Quels sont les principaux aspects qui doivent être testés pour évaluer le potentiel énergétique de la zone de Soultz-sous-Forêts ?

Réponse(s) à la question III.C.3

4 aspects devaient être abordés :

- stabilité au cours du temps de la circulation d'eau souterraine provoquée par l'injection (pas de colmatage des fissures) et de l'extraction de la chaleur, facteurs déterminant tous les deux la puissance disponible au cours de l'exploitation envisagée
- évolution au cours du temps des installations : puits, échangeurs thermiques (aspects mécaniques et chimiques : corrosion...)
- effets environnementaux : microséismes ?
- économie du projet : coût des installations (+ maintenance) vs revenus potentiels : prix de revient de la chaleur récupérée

6. Les oraux

Commentaires généraux

sur les épreuves orales

Nous ne saurions qu'encourager vivement les candidats et formateurs à lire très attentivement le rapport du jury, écrit, oral et TP. En effet, les remarques qui sont faites sont similaires à celles années précédentes... et il ne nous paraît pas inutile de les rappeler une fois de plus.

La première phase pour le candidat est la prise de connaissance du titre de la leçon. Il ne doit pas s'agir d'une simple lecture, mais d'une véritable analyse des termes, qui doit aboutir à l'énoncé d'une problématique scientifique. Cette étape est fondamentale, car la définition claire d'une problématique est indispensable à la construction d'une solide démarche raisonnée, au terme de laquelle la question énoncée sera résolue. C'est cette problématique qui doit servir à justifier l'idée directrice ou la méthode de travail dont découle le plan choisi. Le plan ne doit donc pas être construit artificiellement en fonction des titres des documents fournis par le jury ni en fonction de « recettes » apprises durant l'année de préparation au concours, mais découler d'un raisonnement logique et être au service de la démarche. Ainsi, l'exposé ne se limitera pas à une juxtaposition de connaissances relatives à un des termes du sujet, mais consistera en une progression logique et argumentée, aboutissant à la réponse à la problématique définie en introduction. Il est bien évident qu'une telle analyse du sujet ne peut pas être envisagée sans des connaissances solides et générales dans le secteur considéré.

C'est seulement une fois cette analyse réalisée que le candidat, s'étant approprié la leçon, aura recours aux ouvrages. Une fois de plus, nous rappelons que les ouvrages ne peuvent servir qu'à préciser les connaissances du candidat et/ou à les illustrer, mais en aucun cas à fournir l'essentiel de l'exposé. Trop d'exposés se limitent à une juxtaposition d'idées glanées de façon désordonnée dans les ouvrages, sans qu'aucun fil directeur n'apparaisse. Cela est d'autant plus regrettable lorsque l'entretien révèle que le candidat avait les connaissances nécessaires pour élaborer un exposé logique. Il est totalement illusoire de vouloir utiliser des informations issues d'ouvrages peu ou pas connus. De plus, aucun ouvrage de la liste du concours ne traite entièrement d'un sujet de leçon ; la stratégie consistant à recopier un chapitre d'ouvrage « généraliste » n'est donc pas adaptée à ce type d'épreuve, pas plus qu'à l'enseignement. Il est donc indispensable que les candidats connaissent le contenu des ouvrages de la liste et sachent les utiliser. . Il leur est recommandé de consulter régulièrement les ouvrages, revues et média proposés dans la liste du concours et de ne pas se limiter aux ouvrages « généralistes ».

Une démarche scientifique rigoureuse est, bien entendu, attendue sur tous les sujets, y compris ceux qui touchent de près les activités humaines ou les questions de société et peuvent être médiatisés, tels que la biodiversité, l'exploitation des ressources, les variations du climat, l'utilisation des cellules souches, les maladies humaines etc. A ce niveau de recrutement, les candidats ne peuvent pas se contenter d'interprétations journalistiques, mais doivent s'appuyer sur des faits scientifiques concrets, permettant de soutenir leur raisonnement. Comme tout professeur, un enseignant de SVT ne doit pas, dans le cadre de l'Ecole, prendre position, adopter des postures militantes et imposer ses propres choix (beaucoup de réponses commencent par « j'ai envie de dire » ou « je pense que »). Par contre, il doit donner à ses élèves les fondements scientifiques et les moyens de raisonner pour construire leur propre opinion de citoyen. A l'opposé, un enseignant de SVT ne saurait être un scientifique dans sa tour d'ivoire, qui ne connaît sa discipline qu'à travers ses lectures. Une ouverture sur le monde environnant est absolument indispensable. En particulier, il est attendu que les candidats aient des connaissances de base sur la géologie, la faune et la flore françaises. L'absence de réponse ou des réponses fantaisistes à des questions simples d'ordre naturaliste font douter le jury quant à l'aptitude des futurs professeurs à éveiller la curiosité de leurs élèves et à les intéresser au monde qui les entoure. Dans un même registre, le jury est très inquiet quant à la méconnaissance des bases de la biologie humaine et en particulier de la maîtrise de la reproduction (point 7 du programme).

Les candidats ont de plus trop souvent tendance à décrire leurs observations en fonction de leurs connaissances encyclopédiques (« le lombric est un hyponeurien donc sa chaîne nerveuse est en position ventrale » !). Outre le fait que ce type de raisonnement n'est pas propice à la construction d'une démarche raisonnée, des connaissances erronées ou incomplètes conduisent régulièrement les candidats à nier des évidences imposées par l'observation. Lors de certaines leçons, en particulier celles concernant le comportement animal ou l'écologie, les candidats ont tendance à adopter une point de vue et un vocabulaire très finalistes, voire anthropomorphiques en utilisant des modèles et hypothèses théoriques soutenus *a posteriori* par des faits évidemment *ad hoc*. Un modèle ne saurait se substituer à des données concrètes : une démarche expérimentale testant des hypothèses élaborées à partir d'observations doit être constamment privilégiée. Une éventuelle formalisation théorique ne saurait venir qu'ensuite.

Le jury souhaiterait souligner l'importance de la démarche expérimentale et inviter les candidats à réaliser des manipulations rigoureuses et soignées (dissections, coupes, EXAO, exploitation de cartes, calculs etc.) et notamment à ne pas hésiter à manipuler pendant la leçon, de façon à bien relier les notions exposées à des objets concrets.

Le jury est toujours aussi étonné par la difficulté, pour de nombreux candidats, à exploiter des principes physiques, chimiques et biochimiques de base, indispensables à la compréhension au premier ordre des phénomènes biologiques et géologiques abordés. Cette méconnaissance s'accompagne également de difficultés à manier les outils mathématiques les plus élémentaires. Par exemple, trop peu de candidats savent calculer une fréquence, une pression, formaliser un concept de base comme l'oxydo-réduction ou la sélection naturelle ou utiliser des lois élémentaires de la thermodynamique. Doit-on encore rappeler que, dans un système à deux allèles de fréquences p et q , $p^2 + 2pq + q^2$ est toujours égal à 1, que la population soit en équilibre ou pas (les identités remarquables sont au programme de mathématiques de 4^{ème}). De même, la rigueur ne peut être respectée que si les ordres de grandeurs des objets observés en Sciences de la Vie et de la Terre, ainsi que les unités de mesure sont maîtrisés. Le jury tient également à rappeler que des notions d'histoire des sciences font partie du programme et qu'elles sont indispensables à la maîtrise de la démarche scientifique. Le jury ne peut qu'encourager les candidats à s'intéresser aux « grands noms de la science » et à leurs travaux.

La dimension pédagogique de la leçon ne doit pas être minimisée : au-delà des qualités scientifiques du candidat, le jury cherche à savoir s'il est capable de les partager, et donc de d'être un orateur littéralement au service de son message. Le jury a apprécié l'attitude de la majorité des candidats et une maîtrise du temps en général correcte. A ce propos, le jury tient à souligner que le contenu scientifique attendu permet normalement d'utiliser la totalité du temps imparti ; en conséquence, il est totalement inutile de produire des introductions fleuves (jusqu'à 10 minutes !), ni des conclusions à rallonge (jusqu'à 8 minutes), pas plus que d'adopter un rythme d'une lenteur extrême pour arriver au bout de la durée de l'épreuve. Mieux vaut allouer ce temps au développement des notions qui permettent de traiter le sujet intégralement. Les candidats sont encouragés à faire preuve de plus d'aisance et notamment à se détacher de leurs notes, afin de rendre leur discours plus fluide et plus convaincant. Une fois de plus, le jury tient à rappeler qu'il prête une attention toute particulière à la tenue du tableau, la qualité des transparents produits par le candidat, l'utilisation et le bon réglage des appareils d'observation (mise au point, luminosité, grossissement etc.), la qualité des préparations et des dessins d'observation, la pertinence des termes employés, la précision des exemples, la richesse et la qualité de l'expression orale et écrite (orthographe). Comme tous les ans, l'abus de « tics de langage » nuit à la fluidité de l'exposé. Les « en fait » et les « donc euh » sont toujours à la mode. Une des nouveautés de l'année est l'usage de « entre guillemets » qui permet au candidat de se dédouaner d'un grand nombre d'imprécisions ou d'incertitudes.

L'approche pédagogique ne doit pas non plus être caricaturée. En particulier, la réalisation de tableaux ou schémas bilan n'est pas une fin en soi (ni un moyen de gagner du temps) et doit servir un objectif de synthèse des idées. Réécrire les mots du plan sous forme de tableau n'a par exemple aucun intérêt. De même, les candidats doivent être attentifs à exploiter vraiment le matériel sorti et ne pas se contenter de le présenter rapidement au cours de leur exposé.

Épreuve de spécialité

L'épreuve orale, dite de spécialité, est une épreuve exigeante, souvent redoutée. En effet, cette épreuve recouvre les thèmes de l'option choisie par le candidat. Les champs disciplinaires concernés sont donc ceux qui doivent au mieux permettre au candidat de montrer sa valeur scientifique, et ses aptitudes pédagogiques pour énoncer clairement des notions de haut niveau. A travers ces quelques lignes, le jury voudrait partager avec les futurs candidats quelques considérations pour les aider à se préparer le plus efficacement possible à cet exercice très particulier. Nous rappelons dans les commentaires généraux à quel point il est fondamental que la leçon s'enracine autour d'une problématique clairement énoncée par le candidat et se développe autour d'un raisonnement qui utilisera les connaissances du candidats, les données collectées dans les ouvrages et le matériel sorti comme des arguments -des outils- à son service et non pas comme un objectif en soi. Ceci est bien évidemment particulièrement important dans le cas de la leçon de spécialité.

La leçon se présente tout d'abord sous la forme d'un titre. Parfois, les titres sont très explicites et renvoient à des thèmes classiques connus de la majorité des candidats ; parfois également ils abordent des thèmes à priori plus délicats à cerner, et pour lesquels les candidats estiment leurs connaissances initiales plus limitées. Paradoxalement, les leçons à priori plus difficiles peuvent souvent être mieux traitées par les candidats que les leçons considérées comme classiques, car leurs connaissances initiales ne pouvant servir de refuge, ils sont forcés de rentrer dans une démarche de raisonnement pour construire une leçon qui leur permettra de présenter un exposé de 50 minutes. Ce constat nous oblige à répéter qu'il est indispensable de passer du temps, de prendre du recul pour construire sa leçon, pour qu'elle devienne un exposé personnel mettant en avant les qualités scientifiques et pédagogiques du candidat, et non pas ses seules capacités mnésiques.

Accompagnant le titre de la leçon, des documents imposés sont fournis par le jury en nombre restreint. Ils sont là, bien sûr, pour être exploités au cours de la leçon mais également pour aider le candidat à mieux cerner le sujet, ou à l'orienter vers quelques aspects spécifiques mais essentiels du sujet. Une analyse rigoureuse des documents devrait donc aider le candidat à orienter, au moins partiellement la problématique de sa leçon. En revanche, les documents ne couvrent en général pas tous les aspects du sujet. Il est donc impensable que l'intégralité de l'exposé soit construite autour des seuls thèmes que les documents permettent d'aborder. Il revient donc au candidat de compléter l'illustration de sa leçon par du matériel et/ou expérimentations complémentaires. Ces possibilités restent d'ailleurs beaucoup trop rarement utilisées. Cependant, le matériel demandé, doit être exploité avec la même rigueur que le matériel imposé, et ces étapes sont très clairement prises en compte dans l'évaluation de la leçon par le jury. Ainsi les candidats doivent essayer d'appuyer et illustrer leurs propos à partir d'observations argumentées sur du matériel biologique ou géologique. En secteur B, les observations sur du matériel frais sont souvent trop rares. Pour les observations microscopiques, il faut privilégier l'observation directe d'une coupe plutôt que sa présentation en diapo ou sur une photo ou encore sur un dessin d'ouvrage. Prendre l'initiative de sortir, de présenter et de manipuler du matériel est aussi une occasion

que trop peu de candidats saisissent pour montrer leur créativité, leur habileté à manipuler, leurs connaissances naturalistes et leur goût pour le réel et l'observation de terrain.

Au cours de la leçon, la démarche scientifique doit s'appuyer sur une analyse rigoureuse des objets et expériences proposés par le jury et apportés par le candidat. Cette démarche doit commencer par une description des objets, spécimens et faits expérimentaux. Il est rappelé que les titres et légendes des documents ne sont pas mentionnés dans un but décoratif mais doivent servir au candidat pour comprendre et étudier le document. L'incompréhension des documents ou les erreurs d'interprétation viennent très souvent d'une lecture incomplète des informations fournies. Il n'est pas non plus inutile de lire correctement les noms des organismes ou objets étudiés (la téosinte est devenue « téostine », *Antirrhinum* « aririnium » et le molybdène du « mobylène » !). Certains documents sont libellés sous forme d'exercices (calculs, utilisation d'un logiciel, questions etc), afin de guider le candidat dans son travail. Le fait de ne pas chercher à réaliser l'exercice conduit fatalement à une sous-exploitation du document. L'analyse, qui ne doit pas se limiter à une simple paraphrase, est ensuite suivie d'une interprétation raisonnée qui pourra soit conclure un paragraphe et donc répondre à une question, soit donner lieu à une nouvelle question, et servir alors de transition avec la suite de l'exposé. L'expression « le document qui m'a été imposé » témoigne du fait que les candidats subissent trop souvent les documents et ne se les approprient pas au travers d'un véritable travail au service de l'analyse. Dans quelques leçons, le jury a à peine le temps de voir le document que le candidat l'a déjà retiré du rétroprojecteur ! Trop souvent, le document est seulement un prétexte pour exposer des généralisations et des modèles théoriques recopiés dans des ouvrages, et donc écrit dans un autre contexte que celui de la leçon. Trop souvent aussi, la présentation de la théorie précède l'exploitation (en général sommaire) des documents, ce qui est tout à fait contraire à la démarche scientifique.

La conclusion doit mettre en valeur ces idées-clés et déboucher sur une généralisation et/ou une nouvelle question. Il n'est donc pas nécessaire de paraphraser (oralement et/ou sous forme de schéma ou tableau bilan) tout ce qui a été dit auparavant.

Le jury est tout à fait conscient que 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, pourquoi il délaissera volontairement certains aspects. C'est la rigueur de la démarche qui justifiera la validité de ses choix.

La leçon est ensuite suivie d'un entretien qui, dans un premier temps, a pour but de faire réfléchir le candidat sur l'exposé qu'il vient de produire, pour l'aider à découvrir d'éventuelles omissions, imprécisions ou erreurs, et l'inviter à les corriger. Il sert également à évaluer l'aptitude du candidat à raisonner et à exploiter ses connaissances en temps réel, ainsi qu'à démontrer ses connaissances naturalistes. L'interrogation est ensuite ouverte aux autres domaines de la spécialité, sous des formes très variables, qui visent à évaluer les connaissances du candidat dans le secteur de spécialité, sa

culture générale en rapport avec le domaine de spécialité ainsi que ses aptitudes à construire un raisonnement logique. Il est à noter que l'entretien peut porter sur des parties du programme spécifique. Or, trop souvent, ce programme n'est pas correctement maîtrisé par les candidats, voire par connu du tout, certains candidats n'ayant jamais entendu parler de certains termes même de ce programme.

Épreuve de contre-option

Le domaine du sujet de la leçon correspond au programme général du secteur C pour tous les candidats issus des secteurs A et B, et au programme général des secteurs A ou B pour tous les candidats issus du secteur C. À l'issue de la leçon, le jury interroge le candidat, dans un premier temps dans le domaine de la leçon, puis dans la deuxième contre-option.

Le jury déplore le nombre élevé de leçons souvent très théoriques et trop peu ou maladroitement illustrées (quarante minutes d'exposé de biologie végétale sans montrer un seul échantillon végétal ne paraît pas digne d'un futur professeur de SVT !). Quand les candidats choisissent d'illustrer leur leçon, c'est malheureusement trop souvent en multipliant les exemples plutôt qu'en en traitant un nombre limité de façon complète. La démarche de l'observation des faits (observations et/ou expériences) jusqu'à l'obtention d'un modèle ou d'une théorie n'est que trop rarement mise en avant. La présentation de la leçon doit prendre en compte le fait que le jury comprend 4 membres dont deux ne sont pas spécialistes du secteur. Le candidat doit veiller à ce que les grandes lignes développées soient accessibles aux non-spécialistes, même si des points précis sont approfondis.

Le choix de manipulations/expériences a aussi révélé une grande naïveté chez de nombreux candidats : toutes les expériences / manipulations, surtout les plus simplistes, ne sont pas démonstratives vis-à-vis des questions posées par l'intitulé de la leçon.

Enfin, le jury a noté la difficulté pour beaucoup de candidats à se remobiliser lors de la deuxième partie de l'entretien, qui concerne la deuxième contre-option. Le jury rappelle que cette deuxième partie débute toujours par une ou plusieurs questions simples, prenant autant que possible appui sur ce qui a été dit lors de l'exposé ou du premier entretien, qui doivent permettre au candidat de se re-concentrer dans un autre champ disciplinaire.

L'interrogation peut également s'appuyer sur un document (photographie, résultat expérimental, schéma fonctionnel...) que candidat est invité à exploiter. La discussion qui s'engage peut rester centrée sur le support proposé ou s'en écarter. Le jury rappelle aux candidats que c'est au cours de cet entretien que la question d'actualité peut être abordée. La session 2008 a révélé que les thèmes, définis au BO, sont généralement méconnus.

Quelques précisions sur les leçons de spécialité

L'esprit de la leçon de spécialité doit être clairement compris.

Les documents proposés sont destinés à mettre les candidats en situation de pratiquer un raisonnement scientifique rigoureux ; celui-ci peut être construit :

- soit à partir de données souvent proches de la recherche, fournies sous forme de transparents, nécessitant un authentique travail d'analyse et d'interprétation ;
- soit sur des objets dont l'utilisation est imposée et nécessitant de réaliser des observations précises ou des manipulations (organisme à disséquer, échantillon de roche, lame mince, montage à réaliser etc...

D'autre part, il s'agit d'une « leçon », pratiquée sur un mode magistral, ce qui implique que soient clairement présentés les concepts clés concernés par le sujet, dans une construction logique, structurée, largement argumentée de façon concrète. En règle générale, le jury ne fournit pas un certain nombre d'éléments évidents pour traiter correctement le sujet. Ces illustrations complémentaires, que le candidat doit apporter, nécessitent d'être analysées et exploitées avec la même rigueur que les documents fournis par le jury.

Le respect de ces règles n'impose pourtant pas une matrice unique. La richesse et la diversité des leçons en témoignent, en particulier lorsqu'on analyse la constitution des dossiers fournis par les examinateurs.

On peut en décrire plusieurs types d'où se dégagent deux extrêmes entre lesquels tous les intermédiaires sont possibles.

Certains sujets peuvent apparaître très précis, voire à première vue étroits. De façon évidente, ils recouvrent un domaine si restreint qu'il est inenvisageable, dans une préparation à l'agrégation, de développer la totalité du programme avec un degré de précision tel qu'il permettrait de les traiter toutes sans apport extérieur. Ils sont néanmoins gérables par un candidat bien préparé parce que l'ensemble de documents précis qui est proposé permet d'aborder les quelques concepts clés en s'appuyant sur des éléments souvent inaccessibles sous cette forme dans la bibliographie classique. Le candidat consacrerait un temps proportionnellement plus long à leur étude, même si leur nombre reste dans la fourchette annoncée (entre quatre et six). Ceci est compensé par le moindre nombre des informations et supports complémentaires que le candidat devra rechercher par lui-même.

À l'opposé, sur des sujets plus larges, les documents fournis conduisent à développer le raisonnement scientifique sur un nombre limité de points ou d'objets concernés par le sujet. Le candidat doit alors concevoir une leçon couvrant un champ beaucoup plus large que celui sur lequel le dossier attire l'attention, intégrer l'étude des documents dans un ou plusieurs paragraphes et par ailleurs introduire

d'autres supports à son initiative pour argumenter sur le reste de son exposé. Le choix des documents traduit dans ce cas le souhait de l'examineur de voir développer tel ou tel point sous une certaine forme permettant d'évaluer les qualités de raisonnement. Il ne faut surtout pas considérer que ce choix limite l'étendue du sujet. Sur un même sujet, plusieurs choix sont d'ailleurs possibles ce qui explique que, d'une année sur l'autre, le même intitulé peut être accompagné de dossiers différents et induire par là même des leçons « dosées » différemment quant à l'importance accordée aux différents contenus.

Dans tous les cas, c'est la logique qui doit guider l'action du candidat. En ceci les quinze minutes de réflexion sans ouvrage imposées en début de préparation apparaissent fondamentales, non seulement pour se mettre les idées au clair, mais aussi pour faire des choix stratégiques quant au déroulement de la préparation de sa leçon.

Ainsi, la position adoptée aujourd'hui sur la leçon de spécialité permet de concilier différents objectifs de ce concours de recrutement de professeurs de haut niveau. La diversité des leçons doit aussi, en amont, amener à éviter que la préparation de l'oral ne soit bachotée ou construite sur un modèle unique, selon des règles « universelles », avec un minutage du temps de préparation tout à fait nuisibles à l'initiative du candidat. Ce serait en contradiction complète avec l'esprit dans lequel le jury œuvre, et improductif face à la réalité de l'épreuve. Il s'agit bien de former de futurs professeurs adaptables, capables de réagir à des situations différentes, autonomes, libres de leur jugement et aptes à laisser s'exprimer leur bon sens.

Deux exemples de leçon du secteur B sont proposés pour illustrer ce propos.

« Les stratégies anti-prédatrices chez les animaux » (4 pages de documents)

L'ensemble documentaire situe la leçon du côté du premier type. Les documents proposés couvrent plusieurs aspects du sujet, abordés sous différents angles méthodologiques.

Le document 1, purement « naturaliste », présente un comportement de défense contre un prédateur ainsi que l'appareillage morpho-anatomique associé. Le document 2 reporte une corrélation entre la taille du prédateur et la structure du cri d'alarme qu'il provoque ainsi qu'une démarche expérimentale visant à tester la pertinence biologique de cette corrélation. Le document 3 traite des mimétismes et reporte les résultats d'une expérience visant à isoler les paramètres utilisés par une aeshne pour reconnaître une guêpe. Le document 4 est le plus détaillé : partant du répertoire comportemental d'un papillon face à l'approche d'une chauve-souris, il permet de lier comportement et processus neurophysiologiques sous-jacents.

Les documents invitent donc le candidat à appréhender les stratégies anti-prédatrices à différents niveaux d'analyse (comportements et mécanismes neurophysiologiques) en privilégiant le cadre d'une démarche expérimentale. Outre l'analyse précise des documents, on attend également que soient présentés les concepts généraux associés aux exemples (mimétisme batésien et mullérien par exemple pour le document 3).

En fonction de sa culture et de sa maîtrise des supports bibliographiques, le candidat doit aller encore plus loin, en comparant, par exemple, ces deux catégories de mimétisme avec précision (nombre d'espèces concernées dans chaque cas etc...).

On attend également du candidat qu'il élargisse la leçon aux conséquences des stratégies anti-prédatrices en terme de survie des individus afin d'envisager la question sous l'angle évolutif, non abordé dans les documents.

On peut donc évaluer à la fois la rigueur du raisonnement scientifique du candidat, sa maîtrise des concepts de base, l'étendue de ses connaissances et l'aptitude à les utiliser à bon escient, ainsi que sa réactivité. On évaluera bien sûr aussi son aptitude à traiter le sujet, c'est-à-dire à placer ses analyses dans la perspective des « stratégies anti-prédatrices ». Le fait que les documents s'adressent à un large domaine de la leçon n'exclut pas du tout le recours à l'initiative.

Les perturbations et le fonctionnement des écosystèmes (5 pages de documents)

Il s'agit là d'une leçon couvrant un domaine très étendu. Elle nécessite que le candidat envisage de façon très large les caractéristiques et la diversité des perturbations, leurs effets (destruction ou fragmentation des habitats, conséquences sur la biodiversité, modification des interactions,

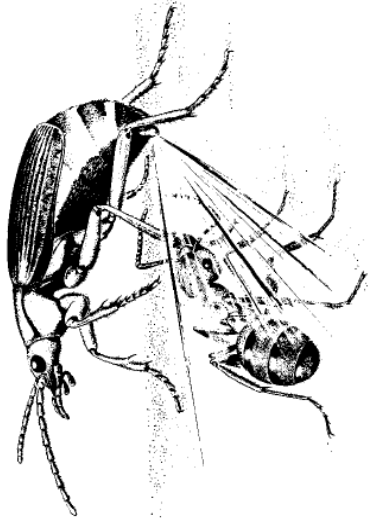
importance dans la régénération et la dynamique des peuplements etc.) et ceci à différentes échelles d'espace et de temps.

Le choix des documents impose ici une analyse précise de cas choisis tout en attirant l'attention du candidat sur quelques aspects du sujet. Mais le champ à couvrir reste très large et nécessite à la fois de la réflexion, de l'organisation et l'introduction d'autres exemples pour servir de support à l'exposé de nombreux points du sujet non couverts par le dossier.

Et pour les autres secteurs ?

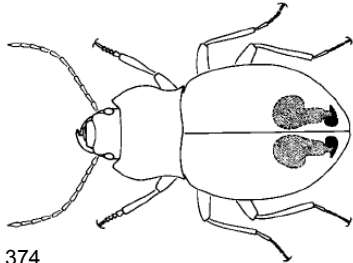
Les autres secteurs se prêtent à une analyse comparable. Dans le secteur A par exemple, une leçon portant sur les métabolismes secondaires peut ne proposer que des documents portant sur une seule catégorie de molécules. Les analyses précises concernant le métabolisme, les aspects évolutifs peuvent ainsi être traités avec précision sur des données ne nécessitant pas d'avoir été mémorisées. Par contre, la diversité des métabolismes secondaires et de leurs rôles impliquera une ouverture laissée à l'initiative du candidat. En sciences de la Terre, un dossier touchant aux planètes peut aborder différents aspects du domaine, alors que celui accompagnant un sujet plus général portant sur des grands phénomènes de la planète Terre est susceptible de ne comprendre que des données précises plus ciblées sur telle ou telle problématique.

A



374

C



(a)

B



A



B



C

A. Représentation schématique d'une rencontre entre une fourmi et un coléoptère bombardier *Stenaptinus insignis*. (Jacobs & Renner 1988)

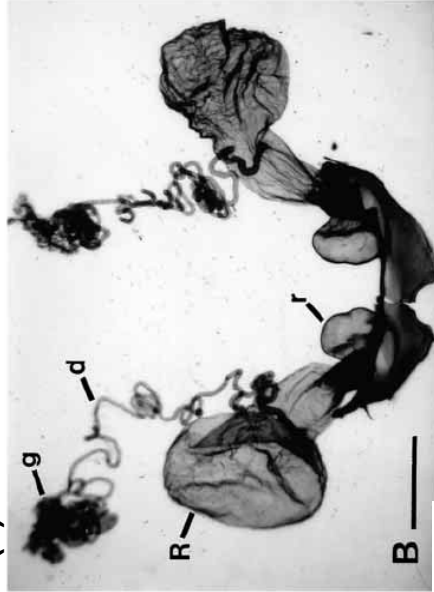
B. Directionnalité de l'émission du jet par le bombardier. On utilise une pince (visible sur les photographies) pour stimuler l'animal. (Eisner & Aneshansley 1999)

C. (a) Schéma de Bombardier montrant les glandes produisant le liquide défensif en place.

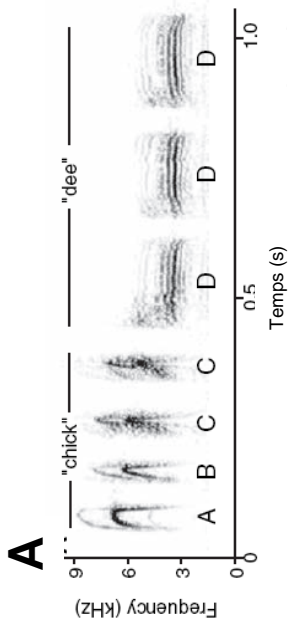
(b) détail de l'appareil glandulaire (g=glande, d=canal efférent,

R=réservoir, l=chambre de réaction chimique). (Eisner et al 2000)

(b)



B



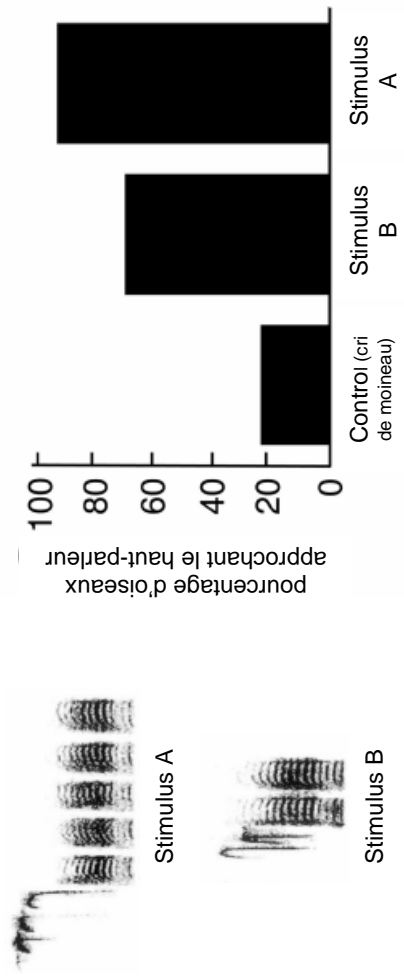
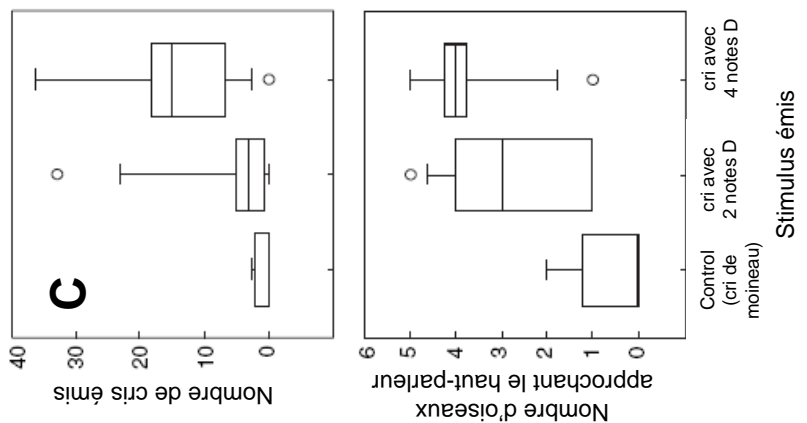
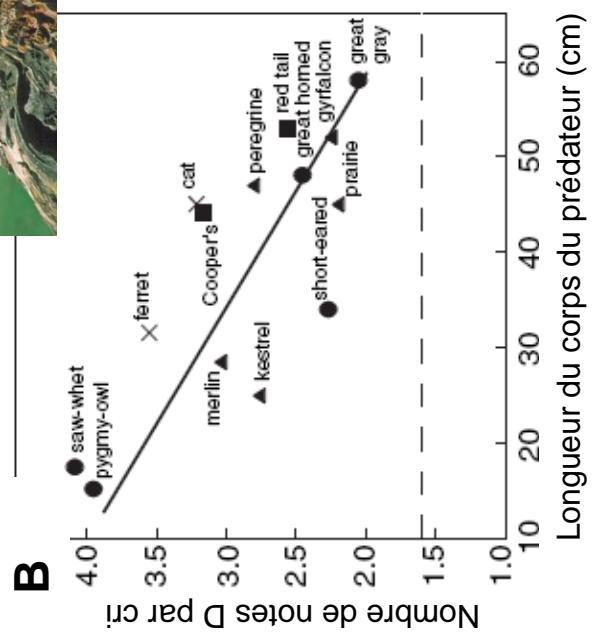
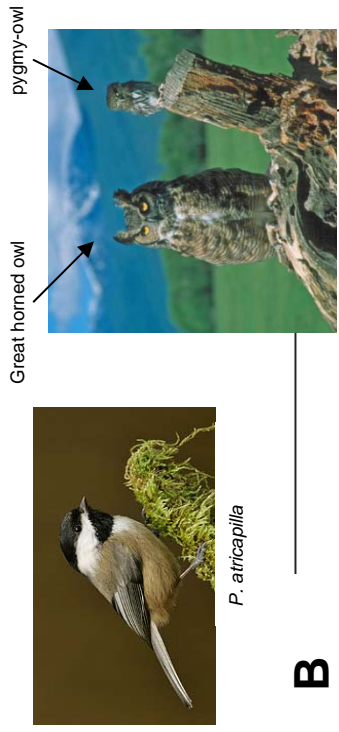
A. cri de harcèlement (le chick-dee) de la mésange à tête noire *Poecile atricapilla*. Ce cri, constitué d'une succession de notes (A,B,C,D), est émis en présence d'un prédateur potentiel. En abscisse : temps en secondes. En ordonnées : fréquence (=hauteur) du son en kiloHertz.

B. Corrélation entre le nombre de notes D du cri émis en présence d'un prédateur et la taille de ce dernier. Divers prédateurs ont été présentés aux oiseaux :

- Chouettes et hiboux
- autres rapaces
- ▲ faucons
- × mammifères

C. Réponse comportementale des mésanges à l'émission de cris de harcèlement présentant 2 ou 4 notes D.

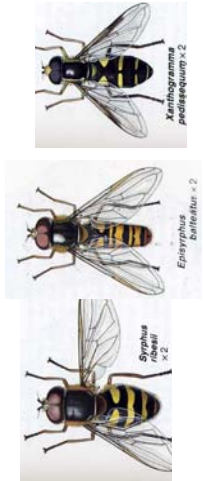
(Templeton et al., Science 2005)



D. Réponse comportementale de la Sittelle canadienne *Sitta canadensis* aux cris de harcèlement de la mésange à tête noire (stimuli A et B). La mésange à tête noire et la sittelle canadienne sont deux espèces sympatriques.

(Templeton et al., PNAS 2007)

A. (a) Différentes espèces de mouches (Diptères Syrphidae), (b) Différentes espèces de guêpes (Hyménoptères, Vespidae, *Dolichovespula* sp.). (tiré de Chinery 1986)



(a)

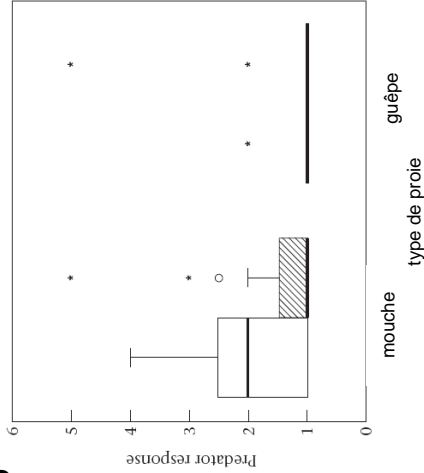


(b)



Aeschna grandis (Odonates, Anisoptères)

B

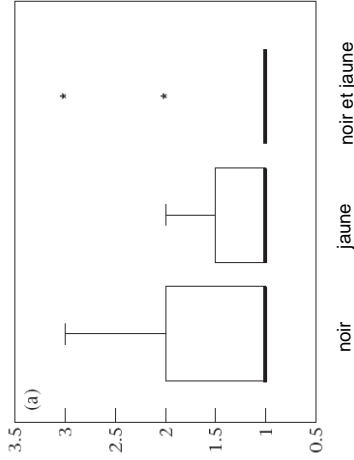


B. Comportement de la libellule *Aeschna grandis* face à des mouches et des guêpes peintes en noir ☐ ou en jaune et noir ☒. En ordonnées : échelle comportementale 1=ignore, 5=attaque et tue la proie.

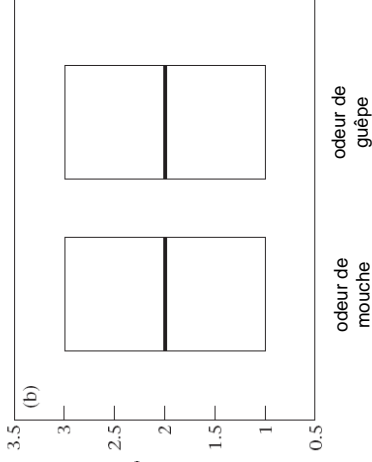
C. Réponse de la libellule (1=ignore, 2=touche, 3=attrape) à des proies artificielles présentant différentes (a) couleurs, (b) odeurs et (c) formes.

(Kauppinen & Mappes 2003)

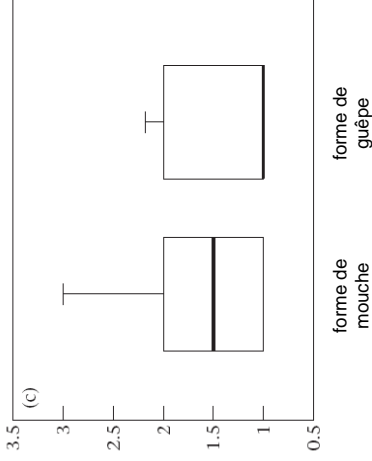
C



(a)



(b)

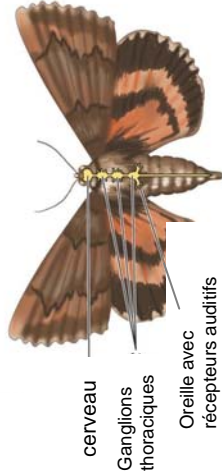


(c)

Caractéristique de la proie artificielle

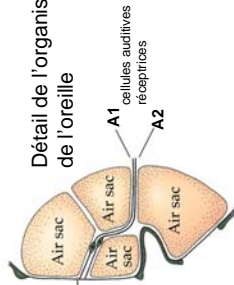
Réponse d'un papillon à une attaque de chauve-souris

B

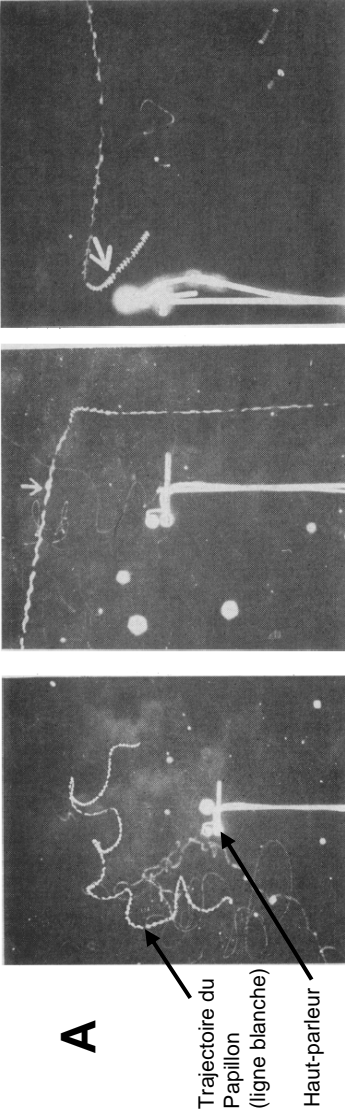
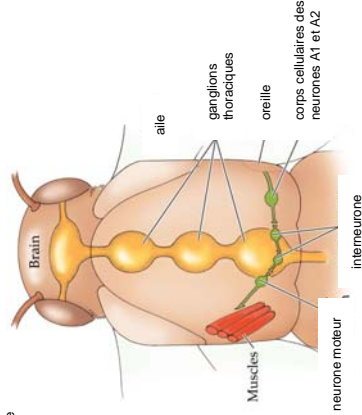


377

Détail de l'organisation de l'oreille



Air sac = sac aérien
Brain = cerveau



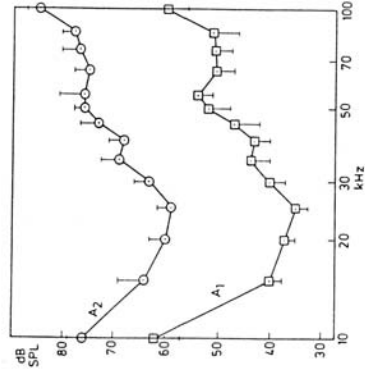
A. Trajectoires d'un papillon (famille des Noctuidés) en réponse à une stimulation auditive : 1- réponse témoin (aucun son n'est émis pendant toute la durée de l'enregistrement trajectométrique), 2- réponse après audition de cris de chauve-souris émis à forte intensité, 3- réponse après audition de cris de chauve-souris émis à faible intensité. La flèche blanche sur les photos 2 et 3 indique le moment à partir duquel le son est émis par le haut-parleur. (Roeder 1966)

B. Anatomie d'un papillon Noctuidé.

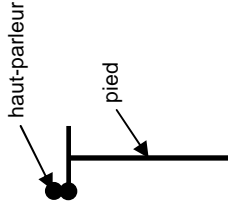
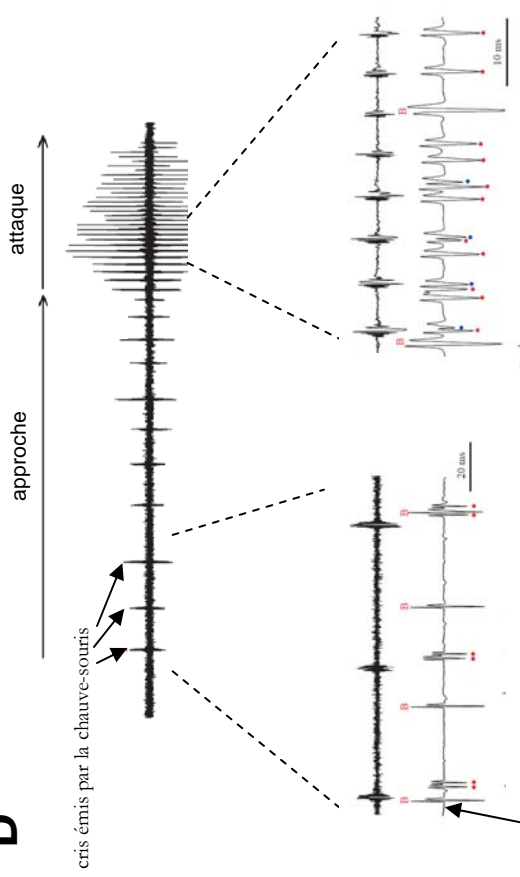
C. Courbes de sensibilité auditive des neurones auditifs A1 et A2. En abscisse : fréquence (= hauteur) du son en kilohertz. En ordonnées : niveau sonore (en décibels) induisant une réponse électrophysiologique du neurone.

D. Réponse électrophysiologique des neurones A1 et A2 aux cris d'une chauve-souris. Les cellules B ne sont pas des neurones auditifs. (Fullard et al 2003)

C



D



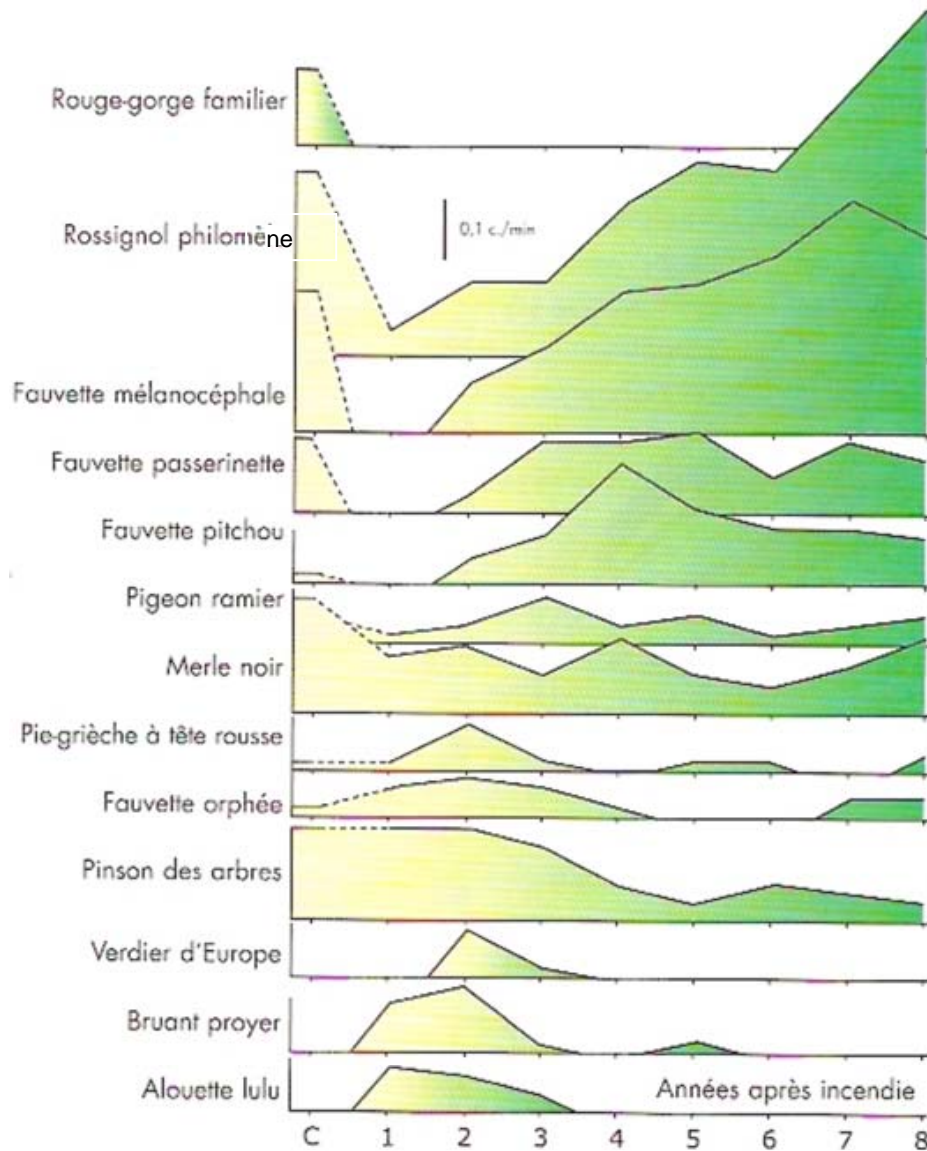
3

2

1

La trajectoire du papillon est suivie par stroboscopie

Doc. 1



Recensement des principales espèces d'oiseaux dans la suberaie de La Juquera (Espagne, altitude: 200m), après un incendie en 1978 et dans une suberaie voisine, qui n'a pas subi d'incendie (C).

En abscisse : nombre d'années après incendie

En ordonnée: nombre d'individus repérés par minute, sur un trajet linéaire de 2,3km parcouru pendant 50 minutes. La barre verticale correspond à 0,1 individu/min.

(d'après Prodon, 2004)

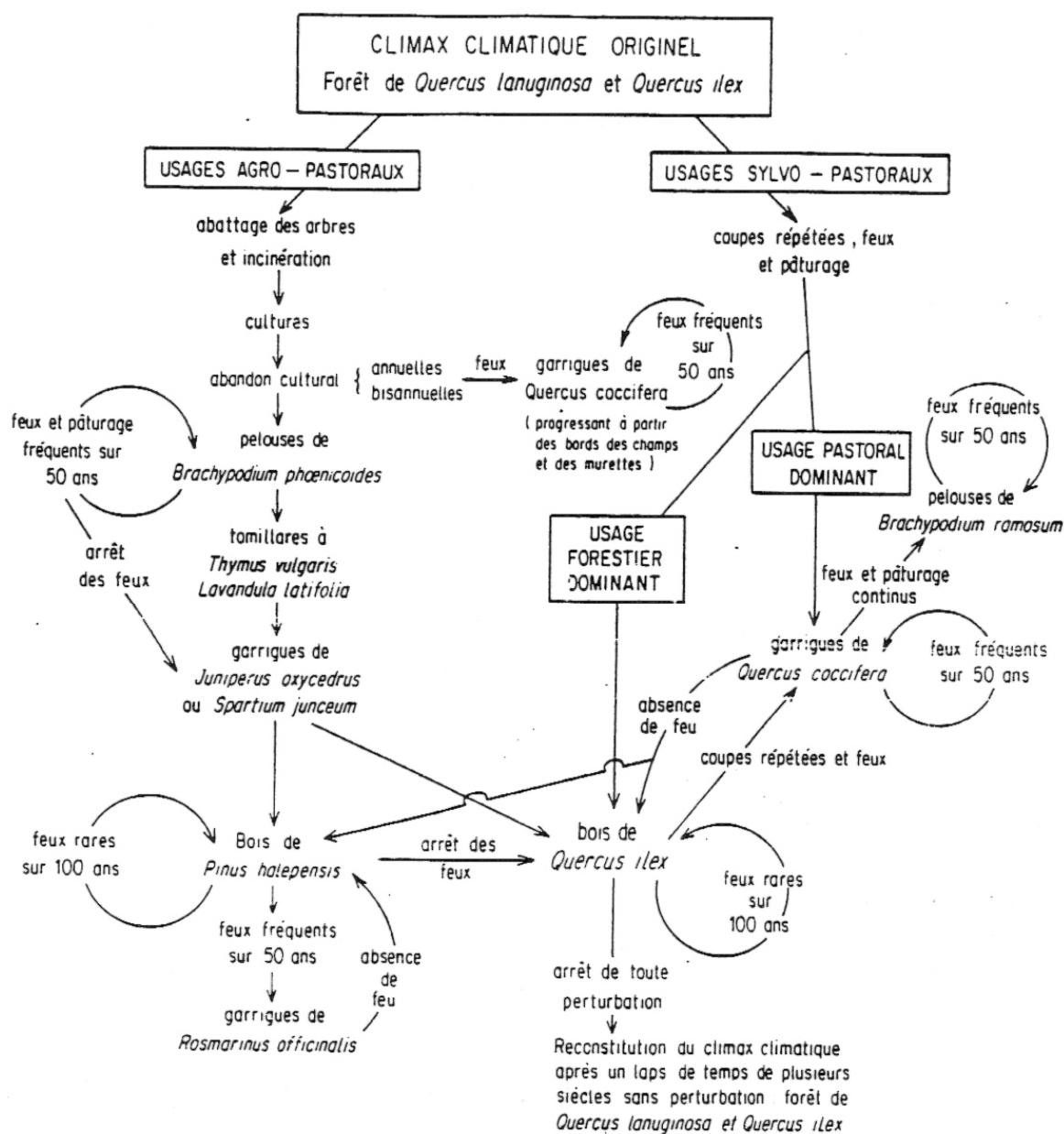
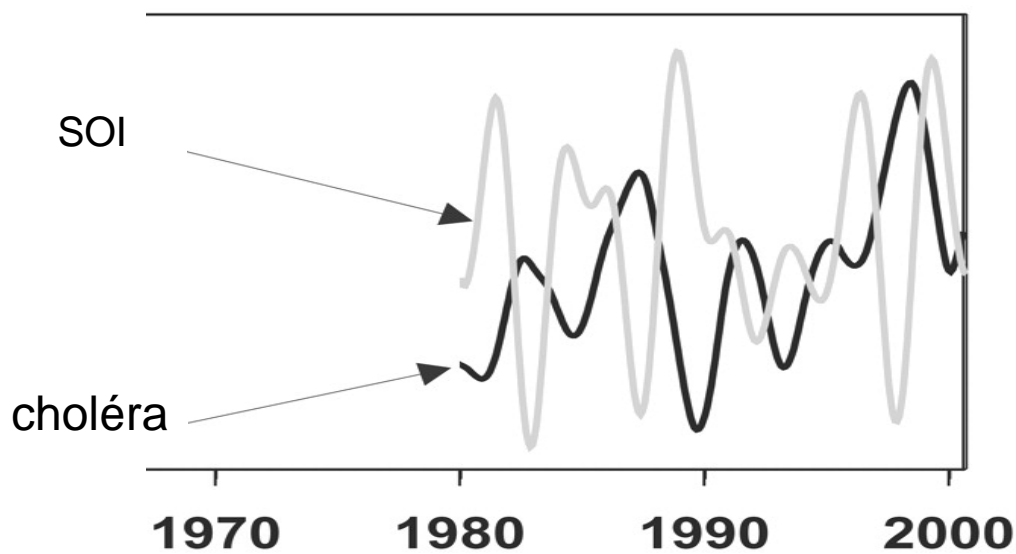
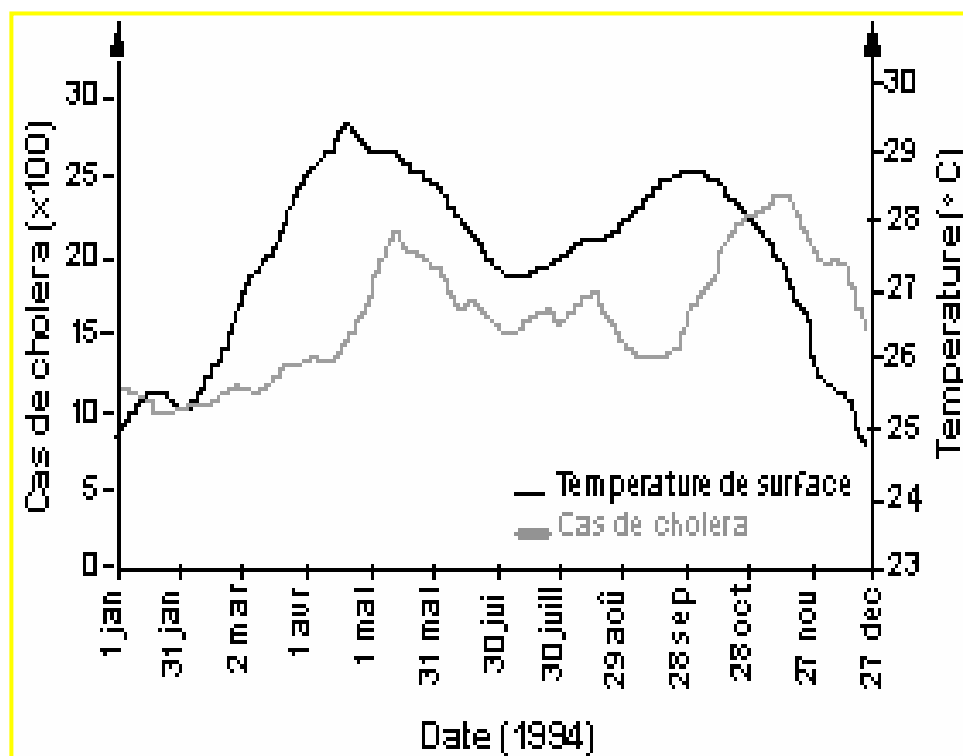


Schéma d'interprétation de la dynamique de la végétation dans le Bas-Languedoc (d'après Trabaud, 1980)



(a)
Index d'oscillation australe (SOI, courbe grise) et fréquence de cas humains de choléra (courbe noire) à Dacca, au Bangladesh. Echelles arbitraires.



(b) Température de surface de l'eau (courbe noire) et nombre de cas de choléra (courbe grise) à Dacca (Bangladesh) en 1994.

(d'après De Magny et coll., ss presse)

Le renard insulaire est une espèce endémique des îles de Californie (Channel islands), constituée de 6 sous-espèces, réparties sur 6 îles différentes. Alors qu'ils sont stables sur 3 de ces îles, les effectifs de renard insulaire connaissent, depuis les années 1990 une très forte décroissance sur les 3 îles situées le plus au Nord. Il ne subsiste plus que quelques individus maintenus en captivité sur deux de ces îles et l'effectif s'est considérablement réduit sur la 3ème île (Santa Cruz; fig. 1).

Cet archipel abrite également des populations de moufettes, en effectifs très réduits sur les îles sur lesquelles le renard est abondant, ce qui est interprété comme une meilleure compétitivité du renard, notamment pour l'accès aux ressources alimentaires (le renard a un régime alimentaire -rongeurs, insectes, fruits- beaucoup plus diversifié que celui de la moufette, qui est strictement carnivore) . La situation sur l'île de Santa Cruz est résumée sur la figure 1.

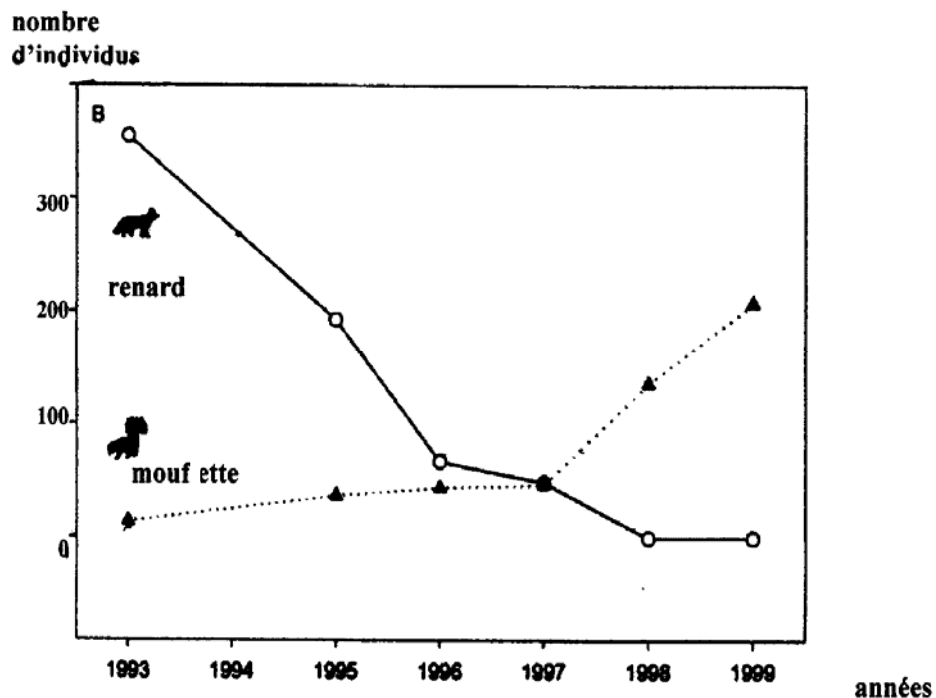


Fig. 1 Variations de l'abondance de renards (ligne continue) et moufettes (pointillés) au cours du temps

L'aigle royal (prédateur d'oiseaux et de mammifères) était considéré, jusqu'en 1993, comme visiteur occasionnel sur l'île de Santa Cruz. Depuis 1994, cet oiseau est devenu résident sur cette île. Entre 1994 et 1999, le nombre d'aigles (résidents ou visiteurs) observés a significativement augmenté. Une étude du régime alimentaire de l'aigle royal a révélé que celui-ci est approximativement composé de 51 % de renards, 15% de mouffettes et 34 % de porcelets. Le cochon a été récemment introduit sur les îles du Nord de l'archipel.

Une modélisation des interactions entre espèces, a permis d'obtenir les courbes d'abondance des populations présentées sur la figure b.

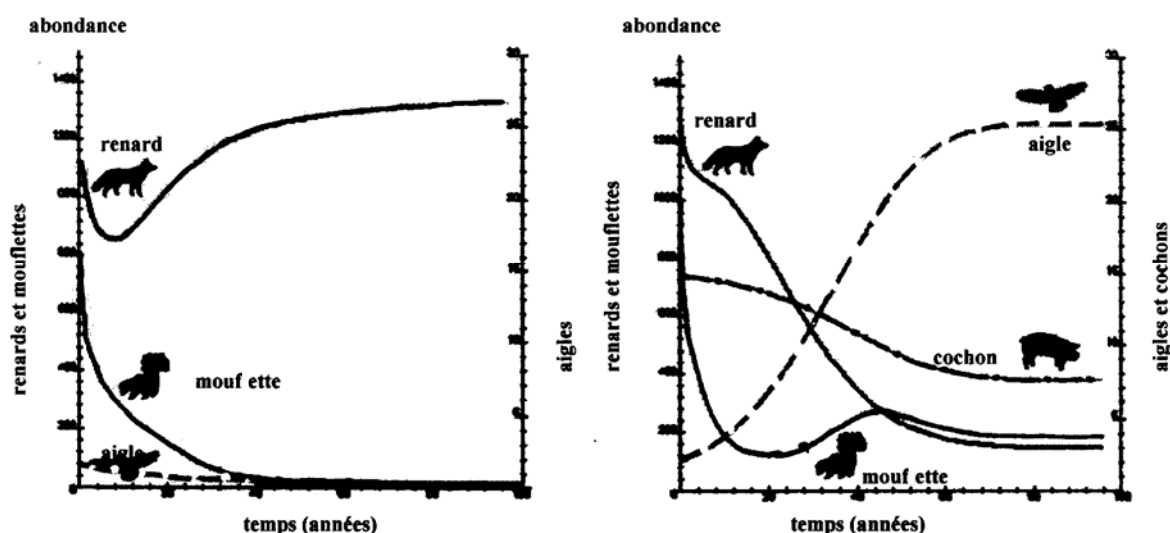


Fig. 2: Résultats des modélisations sur les variations au cours du temps de l'abondance de renards, aigles et mouffettes en absence (graphe de gauche) et en présence (graphe de droite) de cochons.

(d'après Courchamp et coll., 2003)

7. CONCLUSIONS

La session de l'année 2008 de l'Agrégation de Sciences de la vie – sciences de la Terre et de l'univers a été caractérisée par une réduction importante du nombre de postes mis au concours (87 au lieu de 105 postes en 2007, soit plus de 17%). Une réduction importante du nombre d'inscrits (2300 au lieu de 2704 en 2007) se répercute sur le nombre de présents aux trois épreuves (1240) en proportion tout à fait identique à celle de l'année dernière (à peu près 45% d'abandons). La proportion des candidats des secteurs A et B baisse légèrement (- 1,3% et - 0,5%) au profit essentiellement du secteur C (+ 1,8%).

Lors de la délibération d'admissibilité, comme pour la session 2006, le jury a décidé de convoquer un maximum de candidat(e)s aux épreuves d'admission. 217 candidat(e)s ont donc été convoqué(e)s à Paris le 13 juin.

Pour les épreuves écrites, une normalisation *intra-secteur* a été effectuée, mais aucune normalisation *inter-secteur* n'a été nécessaire car les moyennes des notes de chacun des trois secteurs, pour l'ensemble des candidat(e)s ayant composé, ne sont pas significativement différentes.


Une normalisation a été effectuée pour les épreuves de Travaux Pratiques (distributions statistiques différentes), mais aucune normalisation n'a été effectuée pour les épreuves orales (impossibilité technique d'application).

Les résultats d'admission montrent une forte augmentation des agrégé(e)s des secteurs A et C (34 A, 34 B et 19 C). Il est évident (voir chapitre 2) que les meilleurs candidat(e)s choisissent préférentiellement le secteur A. Le durcissement du concours, vu la réduction du nombre de postes, montre une fois de plus que le gros du bataillon des agrégé(e)s est fourni par les préparations universitaires susceptibles d'apporter aux candidat(e)s une synthèse actualisée des connaissances, des méthodes de travail efficaces et une préparation homogène dans les trois secteurs du concours. La répartition des admis(e)s par académie (voir chapitre 2) montre quelques pertes non négligeables entre l'admissibilité et l'admission.

Fait à Paris, le 7 juillet 2008

André SCHAAF

Professeur des Universités

A handwritten signature in black ink, reading 'André SchAAF', with a stylized flourish at the end.