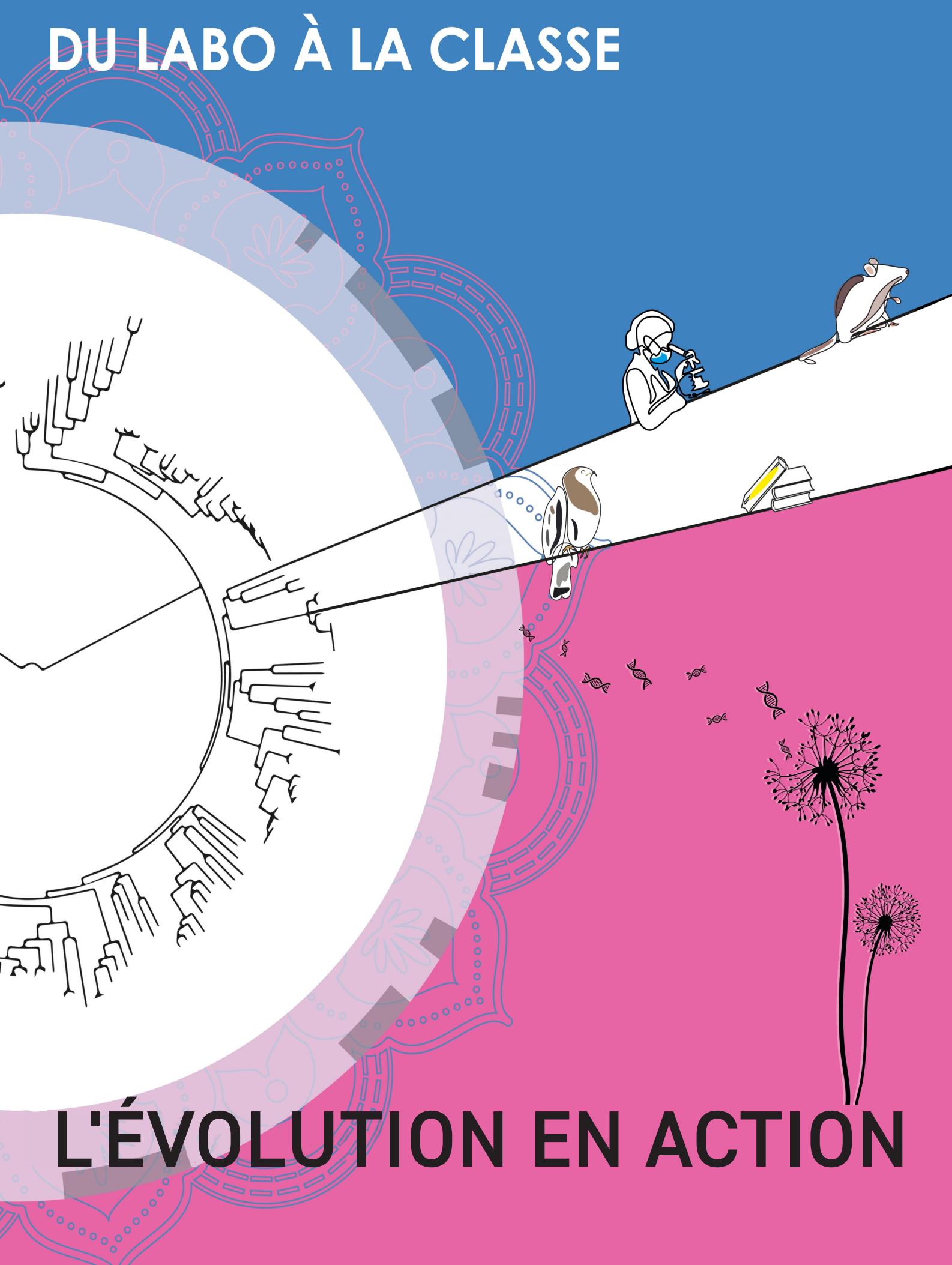


DU LABO À LA CLASSE



L'ÉVOLUTION EN ACTION

LES ACTEURS

Pilotage de la formation 2018-2020

Nicolas CAUDRON, IA IPR SVT Académie de Grenoble
 Ludovic DELORME, Chargé de mission SVT Académie de Montpellier
 Florence GODARD, IA IPR SVT Académie de la Martinique

Coordination de la rédaction de l'ouvrage

Patrice FABRE, IA IPR SVT Académie de Montpellier
 Nicolas CAUDRON, IA IPR SVT Académie de Grenoble
 David BOUDEAU, Professeur de SVT Académie de Nantes, Président de l'APBG

Institut de recherche en enseignements des Sciences (IRES) de Montpellier

Philippe MUNCH, PR Géosciences Montpellier (Université de Montpellier, CNRS)
 Fanny GARREL, MCF Géosciences Montpellier (Université de Montpellier, CNRS)

Mathieu SICARD, Professeur des universités à l'Université de Montpellier
 Mircea SOFONEA Maître de conférence à l'Université de Montpellier

Marion RILHAC, IA IPR SVT Académie de Montpellier
 Mathieu SICARD, Professeur des universités à l'Université de Montpellier

Des enseignants-chercheurs et chercheurs

Samuel ALIZON, DR CNRS, MIVEGEC (Université de Montpellier, CNRS, IRD)
 François BONHOMME, DR CNRS, ISEM (Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE)
 Mathilde DUFAY, PR UM, CEFÉ (Université de Montpellier, CNRS, Université Montpellier 3, IRD, EPHE, SupAgro, INRAE)
 Alison DUNCAN, CR CNRS, ISEM (Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE)
 Bernard GODELLE, PR UM, ISEM (Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE)
 Sylvie HURTREZ, PR UM, MIVEGEC (Université de Montpellier, CNRS, IRD)

Sandrine MAURICE, MCF UM, ISEM (Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE)
 Pierrick LABBÉ, PR UM, ISEM (Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE)
 Benoit NABHOLZ, MCF UM, ISEM (Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE)
 Michel RAYMOND, DR CNRS, ISEM (Université de Montpellier, CNRS, IRD)
 Mathieu SICARD, PR UM, ISEM (Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE)
 Mircea SOFONEA, MCF UM, MIVEGEC (Université de Montpellier, CNRS, IRD)

Des enseignants de collège

GUIRAUD Fabien - clg Feuchères 30 Nîmes
 PREMIER Stéphane - clg Feuchères 30 Nîmes
 CILIA WATRIN Valérie - clg La Gardonnenque 30 Brignon
 GOEMAN Thomas - clg Voltaire 30 Remoulins
 GALTIER Marjorie - clg Alphonse Daudet 30 Alès
 MARTIN Fabien - clg du Mont Duplan 30 Nîmes
 ROCA Pascale, clg la Côte Radieuse 66 Canet-en-Roussillon

VOLLE Stéphanie - clg Les Aiguergelles 34 Montpellier
 LE GALL Claudia - clg Les Garrigues 34 Montpellier
 HEINTZ Julien - clg Camille Claudel 34 Montpellier
 VEROT Frédéric - clg Pic Saint Loup 34 Saint Clément de Rivière
 PECO Anne Sophie - clg Paul Valéry 34 Sète
 GAUBE Nicolas - clg René Cassin 34 Agde

Des enseignants de lycée

SANDRAGNE Serge - lyc Jules Fil 11 Carcassonne
 BARRERRA Joëlle - lyc Jules Fil 11 Carcassonne
 BOSC Eric - lyc Jules Fil 11 Carcassonne
 ULRY Patricia - lyc Jules Fil 11 Carcassonne
 REMOND TEISSIER - Elodie lyc Paul Sabatier 11 Carcassonne
 DUCELIER Eric - lyc Albert Camus 30 Nîmes
 LOPEZ Alfonso - lyc Albert Camus 30 Nîmes
 DELHON Patricia - lyc Albert Camus 30 Nîmes
 MARTYN Emmanuel - lyc Anthoñioz De Gaulle 30 Milhaud
 DELHON Patricia - lyc Camus 30 Nîmes
 GROUSSAC Maryline - lyc Philippe Lamour 30 Nîmes
 SOULIER Fabienne - lyc Albert Einstein 30 Bagnols sur Cèze
 GINER Jérôme - lyc JB Dumas 30 Alès
 SPINAZZE Jean Michel - lyc JB Dumas 30 Alès
 MICHAUD Marion - lyc Jean Vilar 30 Villeneuve les Avignon
 GIRIER Floriane - lyc Jean Vilar 30 Villeneuve les Avignon
 ROBASTON Gaetan - lyc Jean Vilar 30 Villeneuve les Avignon
 LOHEZIC Sylvie - lyc Jean Vilar 30 Villeneuve les Avignon
 FABRE Patrice - lyc Jean Monnet 34 Montpellier
 VUILLAUME Florence Maria - lyc Joffre 34 Montpellier
 RAYNAUD Gwenaëlle - cité scolaire St Louis de Gonzagues 66 Perpignan
 MALARDIER Laurence - lyc Rabelais 34 Montpellier
 MICHELIER Anne - lyc Jean Jaurès 34 Saint Clément de Rivièr

GOELO Jean-Paul - lyc La Merci 34 Montpellier
 PORRAS Ludovic - lyc Littoral La Merci 34 La Grande Motte
 CAZES Patrice - lyc Joseph Vallot 34 Lodève
 TARTIERE Marc - lyc Paul Valéry 34 Sète
 DANJOU Laurence - lyc Paul Valéry 34 Sète
 COURTY Amandine - lyc Jean Moulin 34 Pézenas
 LAPIERRE Catherine - lyc Jean Moulin 34 Pézenas
 CONYNCK Jérémy - lyc Marc Bloch 34 Sérignan
 LANET Claire - lyc Marc Bloch 34 Sérignan
 TELLIER Agnès - cité scolaire Françoise Combe 34 Montpellier
 GAVANON Marina - lyc Mermoz 34 Montpellier
 KALFOUN Florence - lyc Mermoz 34 Montpellier
 GASTE Bénédicte - lyc Mermoz 34 Montpellier
 PASQUALE Aurore - lyc Mermoz 34 Montpellier
 JACQUET Alain - lyc Emile Peytavin 48 Mende
 MEGEVAND Stéphanie - lyc Christian Bourquin 66 Argelès sur Mer
 MEGEVAND Olivier - lyc Déodat de Séverac 66 Céret
 GAYRAUD Alain - cité scolaire St Louis de Gonzagues 66 Perpignan
 LAZO Anne - lyc Arago 66 Perpignan
 MENARDO Julien - lyc Aristide Maillol 66 Perpignan
 ROUSSEL Matthieu - lyc Aristide Maillol 66 Perpignan
 M'BEGUIE Corinne - lycée Jean Mermoz 34 Montpellier
 BARDES Audrey - cité scolaire St Louis de Gonzagues 66 Perpignan

AVANT PROPOS

La ville de Montpellier a accueilli, du 19 au 22 août 2018, pour la première fois en Europe le deuxième **congrès international de biologie évolutive**. Il a réuni les quatre plus grandes sociétés académiques du monde dans ce domaine : *the European Society for Evolutionary Biology, the American Society of Naturalists, the Society for the Study of Evolution, the Society of Systematic Biologists* : ce sont plus de 2600 chercheurs qui se sont retrouvés ainsi à Montpellier.

Une VOLONTÉ de longue date : mettre en place une collaboration durable entre les chercheurs et les enseignants pour intégrer dans les séquences pédagogiques des ressources issues d'articles scientifiques authentiques. Ceci nécessite une adaptation qui préserve la rigueur scientifique et conduit à un support compréhensible et exploitable par les élèves. **Ce travail de didactisation doit être le fruit d'une réflexion conjointe entre le monde de la recherche et celui de l'éducation.**

Ces journées de formation ont été préparées en amont par une visioconférence qui a permis la présentation des chercheurs, des articles scientifiques choisi et les objectifs du travail. L'ambition était double : établir une banque de supports didactiques originaux pour aborder la sélection naturelle et permettre aux participants d'acquérir, par le travail en groupe, la méthodologie nécessaire à l'appropriation d'articles de recherche spécialisée qui représentent une source inépuisable de renouvellement disciplinaire.

Dans le prolongement de cette présentation en plénière, un travail collaboratif s'est mis en place à l'aide de la plate-forme **M@gistère**. Il a impliqué une soixantaine de professeurs de SVT qui ont formé des équipes avec 13 chercheurs montpelliérains (13 équipes ont été constituées : un chercheur avec 4 à 5 enseignants de collège et de lycée se focalisant sur un l'article scientifique choisi par le chercheur sur le thème de la sélection naturelle). Ainsi, 13 exemples portant sur 11 taxons différents, permettront dorénavant aux enseignant de SVT de construire et d'illustrer le concept de sélection avec leurs élèves à partir d'exemples plus variés.

Entre 2018 et 2020, trois journées de travail inscrites au plan académique de formation de l'académie de Montpellier ont permis d'instaurer un travail collaboratif durable. Des présentations respectives entre les groupes et une réflexion sur la méthodologie de la démarche de didactisation ont pu également être réalisées.

**UN CONTEXTE
EXCEPTIONNEL !
UNE COLLABORATION
CHERCHEURS -
ENSEIGNANTS DE SVT AU
SERVICE DE
L'APPRENTISSAGE.**

**TROIS JOURNÉES DE
FORMATION
COLLABORATIVE.**

De l'avis général, cette formation a été largement appréciée par ses acteurs, aussi bien dans ses objectifs, ses réalisations que dans son organisation. Tous les groupes ont travaillé de manière intensive sur leurs articles respectifs, et, confrontés à la technicité que ces publications représentent, n'ont pas hésité à chercher d'autres ressources voire à en concevoir de nouvelles, afin de mieux se les approprier. Au-delà des nouveaux exemples qui viendront enrichir **les possibilités d'illustration de la sélection naturelle dans vos classes du secondaires**, la formation a aussi été l'occasion de se familiariser avec les méthodologies de recherche actuelle (protocoles expérimentaux, génomique, analyse statistique, modélisation), l'anglais scientifique et les outils de conception de posters. Pour les enseignants-chercheurs et chercheurs, cette formation a en retour permis de **mieux cerner les compétences travaillées dans le secondaire, de discuter et d'étoffer leurs propres approches pédagogiques**. Globalement, cette expérience a contribué à renforcer l'importante liaison entre le secondaire et le supérieur et ouvre d'enthousiastes perspectives pour de futures formations analogues dans notre discipline.

Suite à ces deux années d'échanges et de formation, les productions de chacune des équipes nous sont apparues de qualité suffisante pour les compiler dans un ouvrage à destination de tous les enseignants de SVT du secondaire de France. Pour cela, nous souhaitions : réaliser une relecture éclairée et une mise en forme commune pour toutes les productions ; envoyer un exemplaire de cet ouvrage dans tous les établissements du secondaire de l'éducation nationale en France où se déroulent des enseignements de SVT et rendre cet ouvrage consultable sur un site indépendant. Pour atteindre ces objectifs, nous avons sollicité : le projet i-Site « **Montpellier Université d'Excellence-MUSE** » financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) afin qu'il sponsorise cet ouvrage ; **l'Association des Professeurs de Biologie et de Géologie (APBG)** pour un soutien sur la mise en forme éclairée, la réalisation de la publication, sa mise en ligne et pour le lien que l'on connaît entre l'APBG, le monde de la recherche et les enseignants de SVT dans tout le territoire Français. **Ces deux partenaires ont répondu présent et ont permis à cet ouvrage d'arriver jusqu'à vous !**

Nous espérons que vous apprécierez cet ouvrage et que vous vous en emparez pour adapter les propositions d'activités qu'il contient dans vos classes, avec vos élèves, pour améliorer leur compréhension de la sélection naturelle dans ses nombreuses facettes à partir d'exemples variés.

*Mathieu SICARD, Professeur des universités
à l'Université de Montpellier*

⚠ Pour chaque exemple, il est possible de télécharger le poster ainsi que tous les documents associés aux activités.

SOMMAIRE

Évolution rapide de la période de floraison d'une plante annuelle, *Brassica rapa* en réponse aux fluctuations climatiques

	Poster et didactisation	7
	Exemple d'activités	12



Évolution rapide de la dispersion des fruits en milieu urbain chez *Crepis sancta*

	Poster et didactisation	23
	Exemple d'activités	25



Les orchidées trompeuses, l'exemple de *Dactylorhiza sambuca*

	Poster et didactisation	33
	Exemple d'activités	35



Sélection & conservation : évolution comportementale du busard cendré, *Circus pygargus*

	Poster et didactisation	45
	Exemple d'activités	48



Évolution rapide d'une population de lézards, *Podarcis sicula* associée à un changement de régime alimentaire

	Poster et didactisation	53
	Exemple d'activités	55



Sélection naturelle et coloration du pelage chez la souris des plages, *Peromyscus polionotus*

	Poster et didactisation	67
	Exemple d'activités	70



Relations entre évolution d'un "rongeur géant", *Amblyrhiza inundata* et dynamique de la subduction antillaise

	Poster et didactisation	75
	Exemple d'activités	76



Récente expansion du symbiose "protecteur", *Spiroplasma* chez une drosophile

	Poster et didactisation	89
	Exemple d'activités	93



L'évolution en direct de la résistance aux antibiotiques chez *Escherichia coli*

	Poster et didactisation	99
	Exemple d'activités	102



Virulence du VIH : quel rôle pour la sélection naturelle ?

	Poster et didactisation	111
	Exemple d'activités	114



Hémoglobinopathies et paludisme : un exemple d'effet épistatique négatif

	Poster et didactisation	121
	Exemple d'activités	123



Les difficultés liées à la vie en haute altitude... et l'origine génétique de l'adaptation des Tibétains

	Poster et didactisation	131
	Exemple d'activités	133



Homme-Vache : Un exemple de coévolution gène-culture

	Poster et didactisation	141
	Exemple d'activités	144





ÉVOLUTION RAPIDE DE LA PÉRIODE DE FLORAISON D'UNE PLANTE ANNUELLE, *BRASSICA RAPA* EN RÉPONSE AUX FLUCTUATIONS CLIMATIQUES

Germination

Repiquage

Traitement

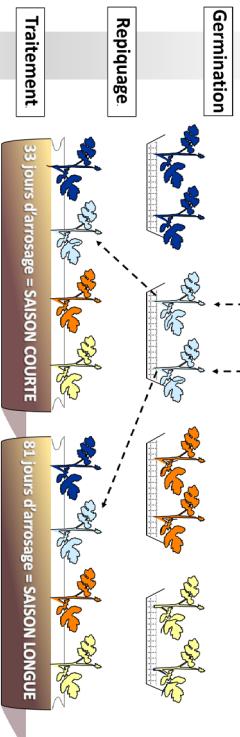
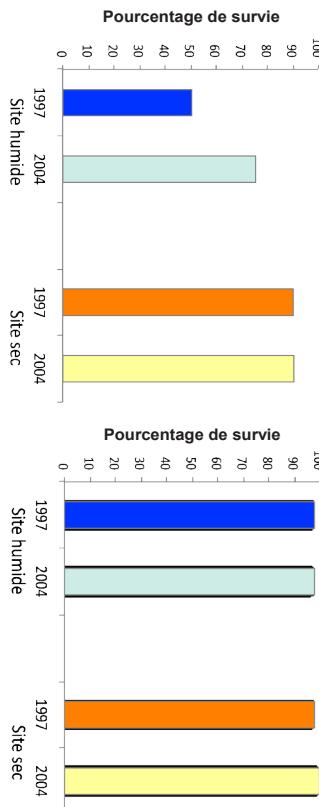


Figure 4. Taux de survie des individus en fonction de l'origine des graines et de la durée d'arrosage

Saison courte



Saison longue

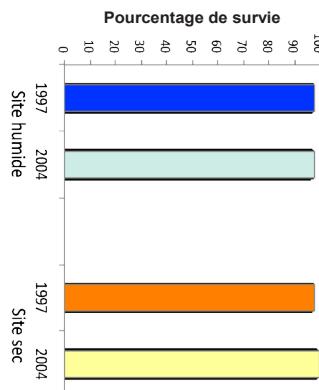


Figure 5. Age à la floraison des individus selon leur origine et la durée d'arrosage

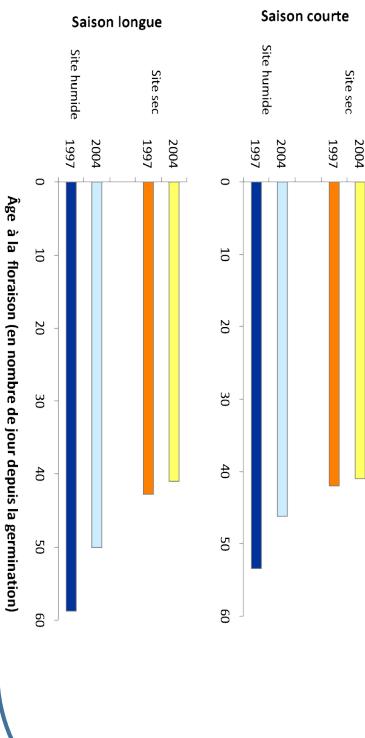
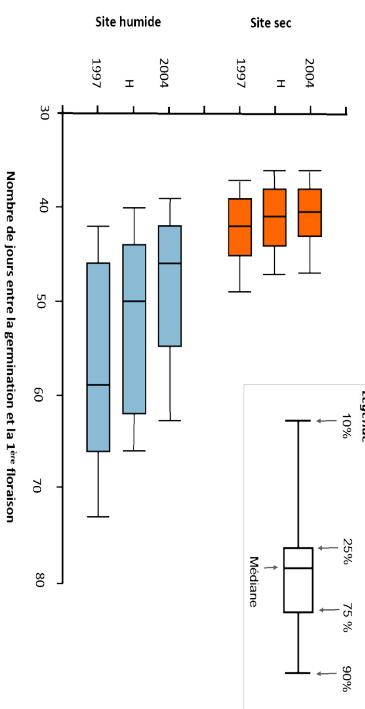


Figure 5. Age à la floraison des individus selon leur origine, la durée d'arrosage et leur statut génétique (1997 = F1 1997x1997; H = F1 1997x2004; 2004 = F1 2004x2004)



Conclusion

Les précipitations ont clairement diminué au cours des 5 années qui précédent la collecte des graines en 2004 (Figures 2). En conditions environnementales contrôlées (Figures 3), les navettes issus des graines de 2004 venant du site qualifié d'« humide » survivent mieux (Figures 4) et fleurissent plus tôt (Figures 5) lors d'une saison des pluies courte que celles issues des graines collectées dans le même site en 1997. Cela suggère une adaptation des populations de ce site à des pluies moins fréquentes. Les hybrides entre des individus de 1997 et de 2004 montrent des phénotypes intermédiaires ce qui suggère une base génétique aux différences observées (Figures 4 et 5).

Des graines de *Brassica rapa* ont été prélevées en 1997 et 2004 dans deux sites californiens différent par la disponibilité en eau du sol. On les qualifie de site "humide" et de site "sec". Des croisements ont été réalisés dans la serre de l'Université d'Irvine (Californie) pour atténuer les effets des conditions de production des graines et du temps de stockage. Pour chacun des deux sites d'origine, on produit des plantes F1 de trois types : 1997 x 1997, 1997 x 2004 et 2004 x 2004.

Après germination, on rassemble dans un même pot une plantule de chaque F1. Cette opération est répétée 200 fois. Les conditions de culture sont identiques pour l'ensemble des pots à l'exception de la durée d'arrosage :

- 100 pots ont été arrosés pendant 33 jours (saison courte),
- 100 pots ont été arrosés pendant 81 jours (saison longue).

On note l'âge à la floraison de chaque plante et on calcule le taux de survie en fin d'expérience.

Évolution rapide de la période de floraison d'une plante annuelle en réponse aux fluctuations climatiques

D'après l'article Franks et al., *Rapid evolution of flowering time by an annual plant in response to a climate fluctuation* Proc. Natl. Acad. Sci. 104: 1278-1282 (2007)

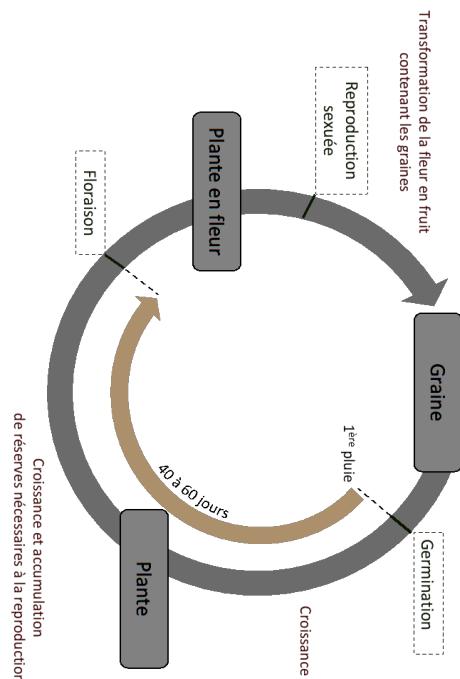
S. Maurice¹, P. Fabre², C. Le Gall³, L. Malardier⁴, S. Volle⁵, F. Vuillaume⁶

1. Institut des sciences de l'évolution, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE 2. Lycée Jean Monnet, Montpellier 3. Collège Les Garrigues
4. Lycée Rabelais, Montpellier 5. Collège Les Aiguergelles, Montpellier 6. Lycée Joffre, Montpellier

Introduction



Figure 1 . Cycle de vie de *Brassica rapa* var.*campestris* (L.)

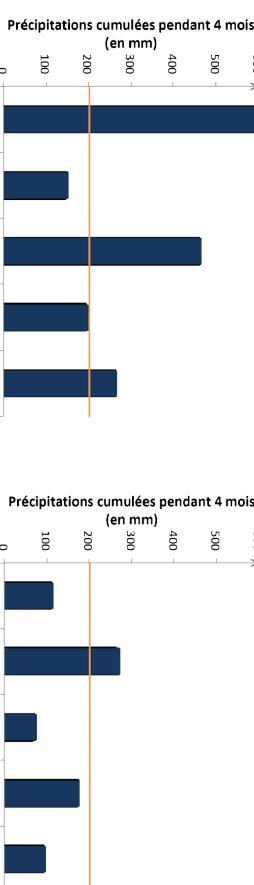


Brassica rapa (ou navette) appartient à la même famille que le chou, le navet, le colza et la moutarde (famille des Brassicacées).

Elle pousse à l'état sauvage préférentiellement en milieu humide sur la côte californienne. Sa germination commence aux premières pluies et la floraison a lieu de 40 à 60 jours après ces pluies (Figure 1).

Ressources collège

Figure 2. Cumul des précipitations après la première pluie (Données collectées à Irvine, Californie, à moins de 3 km des sites de prélèvement)



Source: NOAA's National Centers for Environmental Information

Ressources lycée

Figure 2. Écart à la moyenne* des précipitations cumulées pendant 100 jours suivant la première pluie sur les 5 années précédant chaque récolte de graines. (Données collectées au Irvine Ranch Water District, Californie). *La moyenne (= 0) est calculé sur les 10 années représentées.

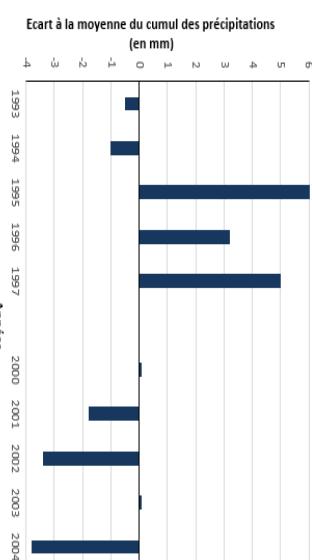


Figure 3. Protocole expérimental



Figure 3. Protocole expérimental

DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Retour sur l'article

Cet article présente plusieurs points d'intérêt. Il montre une évolution biologique très rapide (7 ans de 1997 à 2004).

Les études ont pu être menées avec les génotypes « ancestraux » (graines conservées en dormance), actuels et hybrides au même moment, dans un même lieu. Les résultats peuvent donc être interprétés soit, comme étant dus à une modification génétique, soit à la plasticité phénotypique.

Les critères de la sélection naturelle sont facilement repérables :

- changement de phénotype par avancement de la date de première floraison ;
- origine génétique montrée par les différences de résultats entre génotypes ancestraux, actuels et hybrides ;
- acquisition d'un avantage car avec une sécheresse, la saison de croissance est plus courte. Une période de floraison non avancée conduirait à une faible maturation des graines et donc à une faible descendance.

Le travail de didactisation

- Les données météorologiques : retour aux sources.
- Le protocole : du texte au schéma.
- Présentations des résultats : un mode de communication uniifié.
- Conclusion : les principes de base pour rendre accessible un travail de recherche.

La navette est le nom commun francisé de *Brassica rapa* subsp. *oleifera* (*Brassica rapa* Groupe *Turnip rape*), une sous-espèce de *Brassica rapa*, espèce de plantes de la famille des Brassicaceae, originaire d'Europe et du Moyen-Orient.



Le travail de didactisation

L'article s'adressant à des spécialistes, aucune information sur l'espèce et son cycle de vie n'était présente. La figure 1 du poster a donc été créée. Le cycle a été construit en reprenant les connaissances de cycle 3 et en ajoutant les spécificités de *Brassica rapa* en lien avec l'article : synchronisme du cycle de vie avec les précipitations.

Les autres documents présents sur le poster ont été différenciés entre collège et lycée. L'ordre des documents n'est pas lié à une utilisation pédagogique mais concerne d'une part les ressources nécessaires à la compréhension des expériences décrites dans l'article et d'autre part les expériences et leurs résultats.

Par rapport à l'article de départ, les expérimentations concernant les hybrides ont été conservées en lien

avec les programmes du lycée et supprimées, au niveau collège car trop complexes et hors programme.

De la même façon, les informations telles que l'effet environnemental (lié à l'année de récolte), les effets maternels (qualités transmises par la mère) et les précautions prises pour éliminer ces effets (plantations en conditions identiques des graines prélevées sur le terrain, donc en conditions différentes et fabrication d'une nouvelle génération pour chaque type de graine avant les expérimentations) n'ont pas été prises en compte lors de la didactisation.

L'impact potentiel lié aux différences d'âge des graines aurait pu être compris par les élèves mais il nous a semblé que cela apporterait une complexité inutile pour des élèves qui découvrent ces notions.

Les données météorologiques : retour aux sources

La figure 1 de l'article (reproduite ci-dessous) présente un graphique (diagramme bâtons) de données de pluviométrie construit à partir d'écart à la moyenne dont la valeur n'est pas précisée.

Pour le collège, cette présentation des déviations autour d'une moyenne est difficile de lecture. Nous avons recherché les données brutes à partir du site indiqué dans l'article (*National Climate Data Center*) et reconstruit un histogramme plus classique en intégrant une moyenne sur la période (figure 2 du poster).

Cette nouvelle représentation graphique permet une mise en évidence de la différence des conditions hydriques plus adaptée pour une ressource niveau collège.

La figure 2 réalisée pour les élèves de niveau lycée conserve une présentation à partir de l'écart à la moyenne. Les notions mathématiques des élèves et leur niveau d'abstraction permettent aussi de rapprocher le document didactisé de celui de l'article, montrant ainsi la possibilité aux élèves d'accès à l'article (au moins à ses figures).

La simplification de la figure de l'article a été faite en réalisant la somme des deux périodes intermédiaires prises en compte (jours 1 à 50 et 51 à 100) dont l'interprétation nécessitait d'entrer dans plus de détails qui détournaient de l'objectif initial d'évolution à court terme sous pression environnementale.

Nous nous sommes longtemps interrogés sur l'intégration des années 1998 et 1999 non présentes

dans l'article (2 périodes choisies 1993-1997 et 2000-2004) et dont la pluiosité est aussi importante, ce qui nous a fait finalement rester dans la lignée de l'article. Des recherches complémentaires nous ont permis de voir que les semences de Brassicacées gardent leur faculté germinative pendant 4 à 5 ans ce qui justifie qu'une graine de 1997 soit au maximum issue de plantes mères de 1993 (idem pour les graines de 2004 issus de plantes vieilles au maximum de 2000).

L'autre difficulté a été de faire un choix sur les dates des « pluies ». Il était indispensable d'avoir une correspondance avec les informations biologiques de germination et les données météorologiques. Cependant, l'article ne précisant aucune date de début des précipitations, il a fallu choisir :

- le premier mois de précipitations significatives (> à 20 mm) après la période de sécheresse estivale (ce mois est selon les années compris entre novembre et janvier) ;
- de faire le calcul sur 4 mois (période totale de 120 jours).

Pour rester dans la fourchette des 100 jours de l'article, les calculs de cumul ont été aussi effectués sur 3 mois mais les résultats étaient moins significatifs pour les élèves...

Nous sommes conscients de la limite scientifique de ce choix (sélection de données) mais nous avons privilégié la compréhension des documents par les élèves.

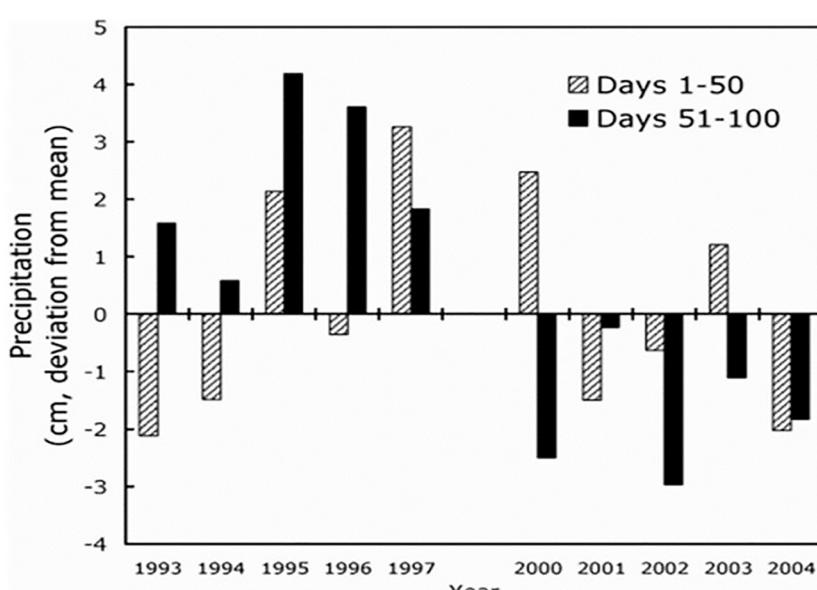
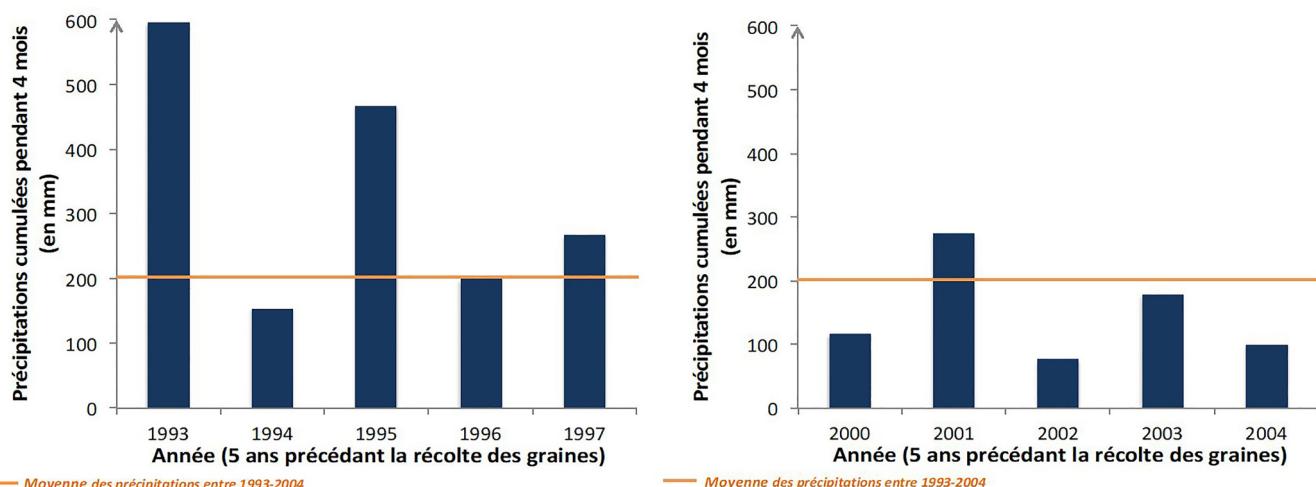


Fig. 1. Early and late winter precipitation at the Irvine Ranch Water District (3 km from the study sites) from the National Climate Data Center.

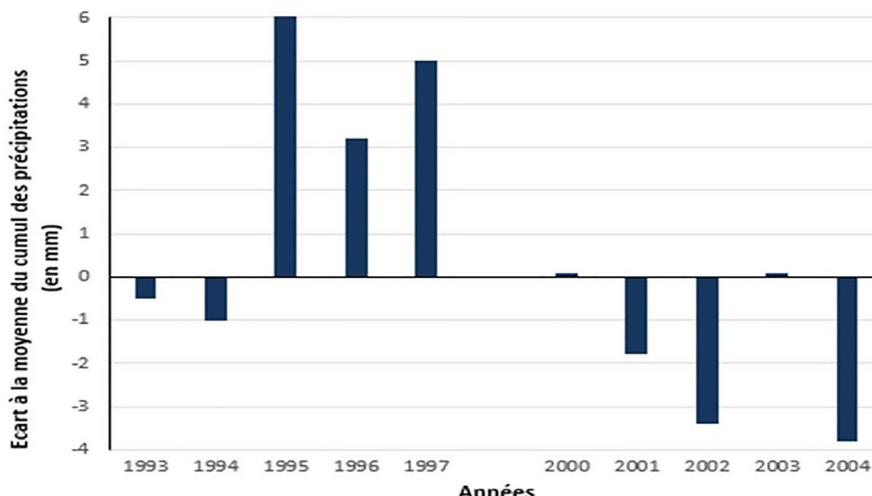
We calculated cumulative precipitation during the growing season (100 days after the first 72-h period with rainfall ≥ 1 cm).

Mean cumulative precipitation for days 1–50 and days 51–100 for each of the five growing seasons leading up to 1997 and 2004 were calculated, and values are plotted as deviation from this mean.

Shaded bars indicate cumulative precipitation during the first 50 days after rainfall. Black bars show cumulative precipitation in the subsequent 50 days.



2 **Figure 2 (collège).** Cumul des précipitations après la première pluie (Données collectées à Irvine, Californie, à moins de 3 km des sites de prélèvement) - NOAA's National Centers for environmental Information



2 **Figure 2 (lycée).** Écart à la moyenne* des précipitations cumulées pendant 100 jours suivant la première pluie sur les 5 années précédant chaque récolte de graines. (Données collectées au *Irvine Ranch Water District, Californie*).

* La moyenne (= 0) est calculée sur les 10 années représentées.

Le protocole : du texte au schéma

L e protocole (figure 3 du poster), long et détaillé dans l'article a été synthétisé sous forme d'un schéma en collège afin d'éviter des erreurs d'interprétation d'un texte incluant des subtilités par les élèves et de permettre un travail de lecture du schéma. On peut par exemple demander à un élève à partir d'une plante et de retracer le cheminement expérimental. Les couleurs ont été choisies pour identifier les différentes plantes ; ce code couleur est conservé pour les résultats. Dans le schéma du protocole sont indiqués les éléments qui sont mesurés pour initier le lien avec les résultats.

Nous avons été confrontés à de nombreuses difficultés pour établir ce schéma :

- simplifier la complexité du protocole sans perdre la rigueur de l'expérimentation ;

- permettre une compréhension du schéma par tous ;
- assurer une lisibilité du protocole dans la forme retenue.

Plusieurs relecteurs ne connaissant pas le document d'origine ont été sollicités. Les discussions ont été nombreuses, comme les versions du même schéma permettant de définir, la place des légendes à inclure ou non dans le schéma, la définition des codes couleurs, la représentation des bacs de germination, la place de la flèche principale, la formulation des résultats ou l'indication d'un suivi du devenir d'une graine comme exemple... Le texte a en revanche été privilégié en lycée, là encore afin de rester dans une présentation proche de l'article (figure 3).

Présentations des résultats : un seul mode de communication

Dans l'article source, les résultats, figures 2 et 3, sont présentés sous forme de graphiques. Nous avons hésité à mettre l'un de ceux-ci en tableau afin de varier la typologie des documents puis avons préféré restreindre les capacités utilisées à la lecture de schémas et de graphiques, profitant ainsi du code couleur mis en place dans le protocole.

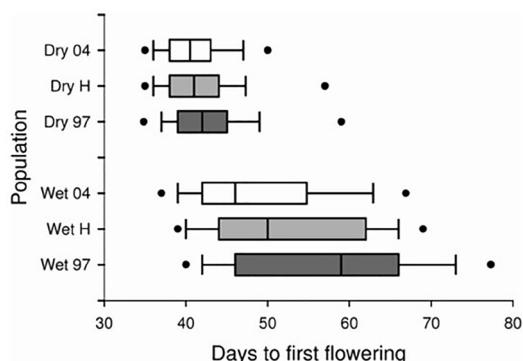


Fig. 2. Box plots of the evolution of time to first flowering. Shown are box plots of FT for *B. rapa* plants from the Wet Site (Wet) and Dry Site (Dry) populations from the ancestral 1997 (97), descendant 2004 (04), and hybrid (H) crosses in the long season treatment. Days to first flowering is the number of days between germination (first emergence of cotyledons) and first flowering (first full opening of first flower). The center bar is the median, and the boxes, lines, and dots represent the 25th to 75th, 10th to 90th, and 5th to 95th percentiles, respectively. Descendants flowered earlier than ancestors in both populations and across all treatments.

Les résultats pour les populations hybrides (présentées dans le seul protocole lycée) sont réintroduites pour ce public (lien avec les mécanismes de diversification des génomes).

La lisibilité de la figure 2, en collège, sous forme de bâtons verticaux était difficile. Le choix de l'horizontalité (diagramme en barres) augmente la lisibilité et fait, de plus appel aux références culturelles de

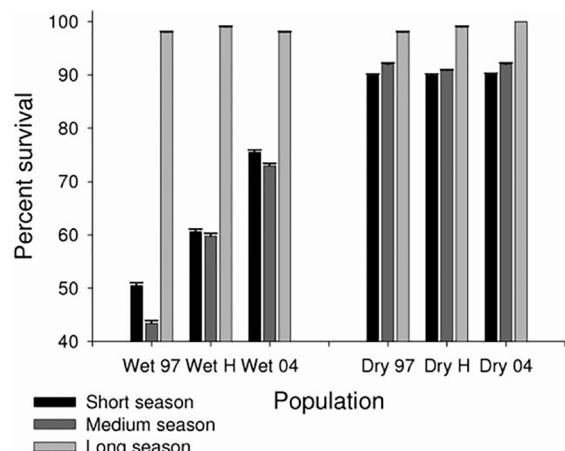


Fig. 3. Local adaptation across space and time. Shown is the percentage (mean SE) of *B. rapa* plants surviving from Wet Site (Wet) and Dry Site (Dry) populations from ancestral 1997 (97), descendant 2004 (04), and hybrid (H) crosses in the short (black bars), medium (dark gray bars), and long (light gray bars) season treatments. Higher survival of postdrought (2004) than predrought (1997) genotypes under short season conditions in the Wet Site shows adaptation to recent conditions. Higher survival of Dry Site than Wet Site genotypes under the short season treatment shows adaptation to local conditions. Survival was analyzed with a categorical model using a linear response function.

« durées » dont la lecture horizontale est plus accessible. Pour le lycée et en lien avec les enseignements de mathématiques (dès les programmes de seconde) la représentation de l'article en boîte à moustaches a été conservée, une légende graphique a été créée en remplacement d'un texte explicatif afin que le temps d'appropriation par les élèves soit réduit, il s'agit de réinvestir des connaissances d'une autre discipline dans un contexte nouveau mais en fournissant des rappels. La simplification a aussi consisté à supprimer les valeurs « extrêmes » des centiles 5 à 10 et 90 à 95.

Conclusion

Voici les principes généraux qui pour nous devraient permettre la didactisation d'un article scientifique pour une utilisation avec des élèves :

- la différenciation des documents entre collège et lycée en essayant de se rapprocher pour les lycéens des types de documents de l'article ;
- favoriser la lisibilité des informations en simplifiant les documents initiaux, en créant des codes

couleurs, en éliminant des détails qui détournent de l'objectif essentiel que permet de poursuivre l'article ;

- limiter le nombre de savoir-faire utilisés en collège en se recentrant sur un ou deux permettant ainsi un travail méthodologique éventuel ;
- retourner aux valeurs sources auxquelles l'article fait référence.

EXEMPLE D'ACTIVITÉ LYCÉE - SECONDE

EXEMPLE DE LA SÉLECTION NATURELLE CHEZ *Brassica rapa*, LA NAVETTE

Mise en situation

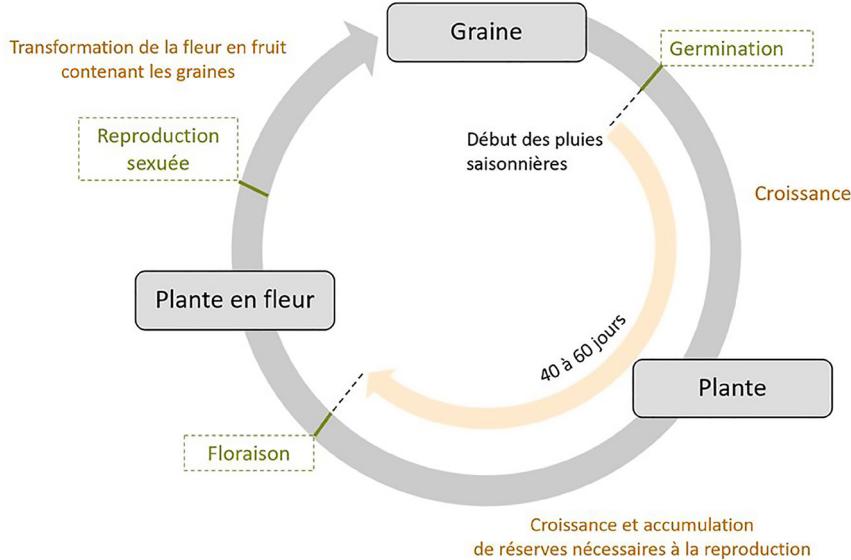
La Californie est une zone de la côte ouest des États-Unis où la sécheresse sévit régulièrement. Dans le contexte de changement climatique actuel, des chercheurs se demandent si des plantes à cycle de vie court peuvent être impactées et développer des adaptations à ces changements. Ils s'intéressent à la navette, *Brassica rapa*, dont ils possèdent des graines en collection depuis de nombreuses années.

Brassica rapa est une plante à fleur de la même famille que le chou, le navet, le colza et la

moutarde (famille des Brassicacées). Elle pousse à l'état sauvage préférentiellement en milieu humide.



Document de référence - Cycle de vie de *Brassica rapa* subs. *oleifera* (L.)



Objectif notionnel

- La biodiversité change au cours du temps : cette évolution est observable sur de courtes échelles de temps, tant au niveau génétique que spécifique.
- L'évolution de la biodiversité au cours du temps s'explique par des forces évolutives s'exerçant au niveau des populations : la sélection naturelle résulte de la pression du milieu et des interactions entre les organismes. Elle conduit au fait que certains individus auront une descendance plus nombreuse que d'autres dans certaines conditions.

Objectif méthodologique

- Pratiquer des démarches scientifiques : savoir distinguer, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux.
- Communiquer : communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant.

Prérequis

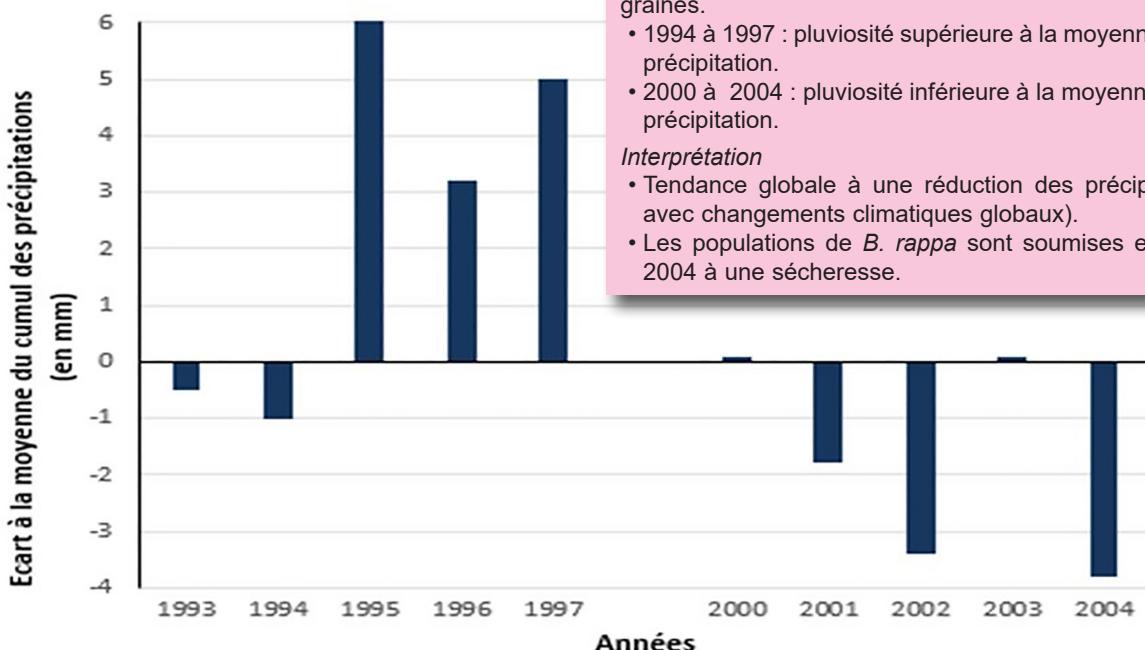
- Notionnels : différence météo-climat (C4) ; sélection naturelle, mécanisme de l'évolution (C4) ; besoins nutritifs des végétaux (C4) ; caractéristiques des sols et production de biomasse (seconde).
- Méthodologiques : lecture et analyse de graphique de plusieurs types ; mise en relation d'informations extraites de divers documents.



À l'aide des résultats obtenus par ces chercheurs, déterminer d'éventuels impacts évolutifs sur le développement de *Brassica rapa* en lien avec des modifications environnementales.

1

Écart à la moyenne* des précipitations cumulées pendant 100 jours suivant la première pluie sur les 5 années précédant chaque récolte de graines



Exploitation attendue

Analyse

Deux périodes d'études : de 1994 à 1997 et de 2000 à 2004. Les années 1997 et 2004 étant les dates de récolte des graines.

- 1994 à 1997 : pluviosité supérieure à la moyenne = excès de précipitation.
- 2000 à 2004 : pluviosité inférieure à la moyenne = déficit de précipitation.

Interprétation

- Tendance globale à une réduction des précipitations (lien avec changements climatiques globaux).
- Les populations de *B. rapa* sont soumises entre 2000 et 2004 à une sécheresse.

Données collectées au Irvine Ranch Water District, Californie.

*La moyenne, ramenée à zéro sur le graphique, est calculée sur les 10 années prises en compte.

2

Protocole expérimental

Pour l'expérimentation, quatre lots de graines de *Brassica rapa* ont été utilisés :

- deux lots collectés en 1997 et conservés dans une banque de graines de l'Université d'Irvine (Californie) ;
- deux lots collectés sur le terrain pour l'étude en question en 2004.

Les deux lots de chacune des années de collecte se distinguent par leur lieu de prélèvement caractérisé par la disponibilité en eau :

- un lieu que l'on qualifie de "site humide" où la disponibilité en eau est forte ;
- un lieu que l'on qualifie de "site sec" où la disponibilité en eau est faible.

Des croisements ont été réalisés dans la même serre de l'Université d'Irvine. Pour chacun des deux sites d'origine, on produit des plantes F1 (1^{ère} génération) de trois types en croisant des plantes issues des graines prélevées.

- La F1 nommée « 1997 » correspond au croisement de plantes issues de graines prélevées la même année en 1997 (1997 x 1997) ;
- La F1 nommée « H » correspond au croisement de plantes issues de graines prélevées en 1997 avec celles de 2004 (1997 x 2004) ;
- La F1 nommée « 2004 » correspond au croisement de plantes issues de graines prélevées en 2004 (2004 x 2004).

Après germination, une plantule de chaque F1 a été repiquée dans un même pot, rassemblant ainsi les différentes F1. Cette opération a été répétée 200 fois. Les conditions de culture ont été identiques pour l'ensemble des pots à l'exception de la durée d'arrosage :

- 100 pots ont été arrosés pendant 33 jours = "saison courte" afin de reproduire une saison avec une faible durée de précipitation ;
- 100 pots ont été arrosés pendant 81 jours = "saison longue" afin de reproduire une saison avec forte durée de précipitation.

Pour chaque plante obtenue, l'âge de la floraison et le taux de survie ont été relevés.

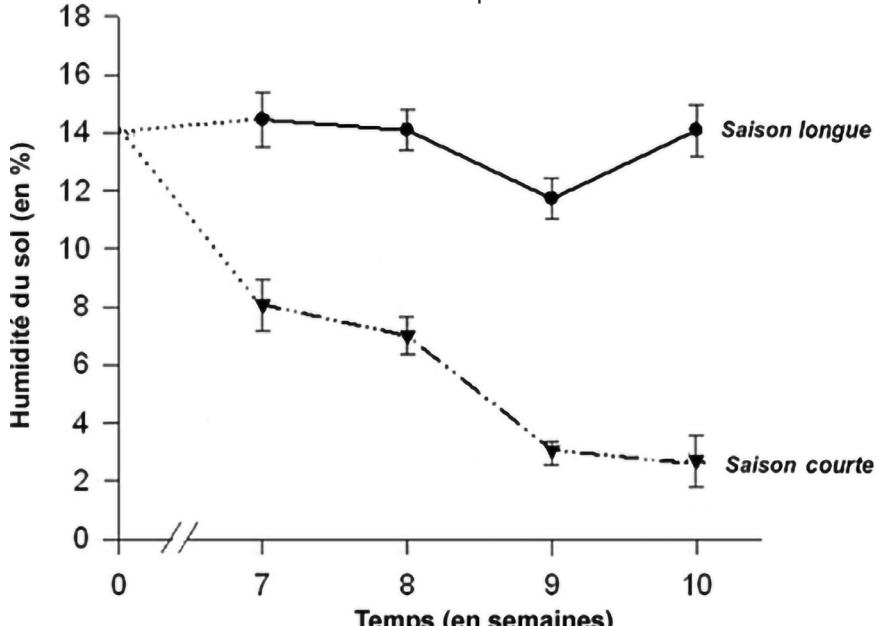
Exploitation attendue / Interprétation

Lien entre le document 3 et le protocole (document 2)

- L'expérience qui module une durée d'arrosage va permettre d'avoir une disponibilité en eau variable dans le substrat des pots. Elle permet de reproduire les conditions climatiques des deux périodes : « saison longue » = humide (entre 1994 et 2000) ; « saison courte » = sèche (entre 2000 et 2004).

3 Évolution de l'humidité du sol en fonction de la durée d'arrosage.

Les mesures ont été effectuées à une profondeur de 12 cm dans le sol.



Exploitation attendue

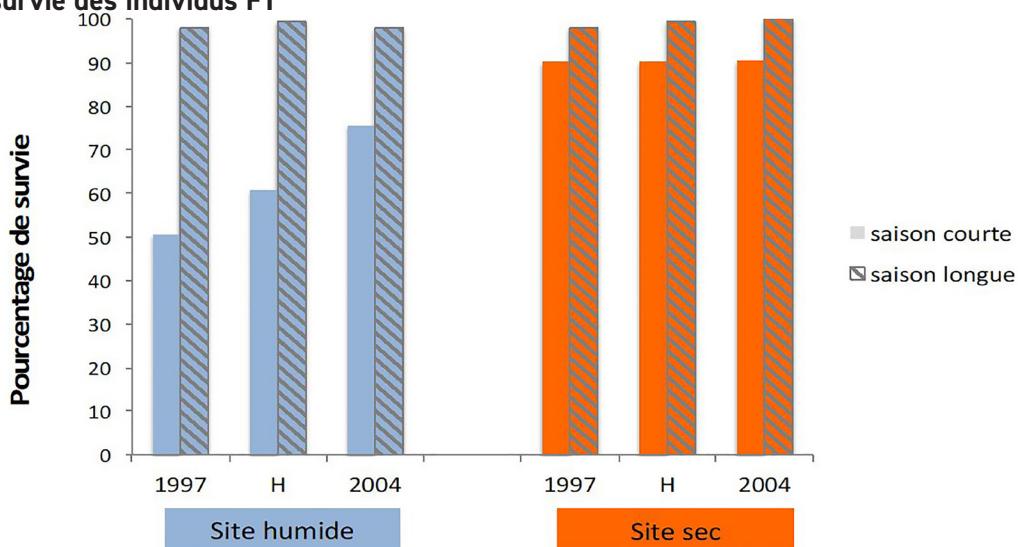
Analyse

- En saison longue, le sol retient plus l'eau : 12 à 14% d'humidité dans le sol durant 10 semaines.
- En saison courte, le sol retient moins l'eau : après 7 semaines, l'humidité a diminué de moitié passant de 14 à 7% puis continue de diminuer de façon importante pour atteindre environ 2% au bout de 10 semaines.

Interprétation

- En saison longue, les végétaux disposeront de suffisamment d'eau.
- En saison courte, il y aura une insuffisance en eau.

4 Taux de survie des individus F1



Exploitation attendue

Comparaisons à effectuer :

- au sein de chaque site entre saison courte et saison longue ;
- au sein de chaque site entre F1-1997 et F1-2004 ;
- entre les sites.

Un exemple d'analyse possible pour les plantes issues de graines du site humide

- Taux de survie de 100% en saison longue et entre 50 et 75 % en saison courte.
- Taux de survie de 50 % pour les F1-1997 et taux de survie de 75% pour les F1-2004, en saison courte.
- Comparaison avec le site sec : meilleurs taux de survie généraux en saison courte pour les graines issues du site sec.

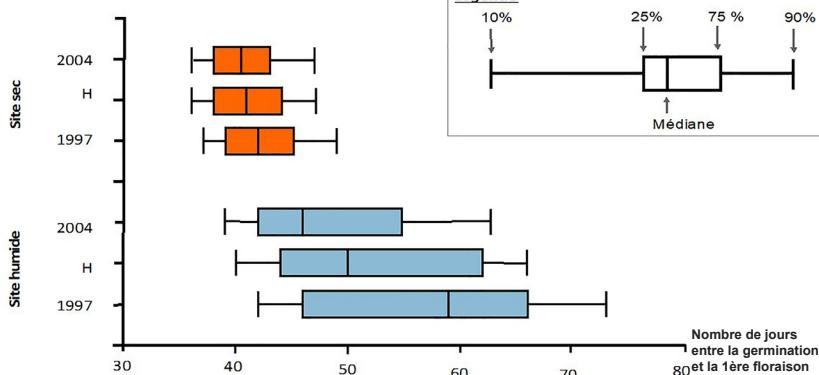
Interprétations à identifier :

- capacité des plantes à survivre en fonction de la disponibilité en eau ;
- modifications du taux de survie = adaptation ;
- adaptation initiale des plantes au milieu de vie d'origine.

Interprétations pour les plantes issues de graines du site humide

- Ces plantes soumises à une saison courte ont une moins bonne survie car elles proviennent d'un milieu de départ où l'eau est plus disponible.
- Meilleur taux de survie des F1 - 2004 = sélection de plantes résistantes au déficit hydrique qui sont donc plus adaptées à ces nouvelles conditions.
- Dans chaque milieu, les plantes sélectionnées sont celles qui présentent dès le départ une capacité de résistance à une faible disponibilité en eau.

5 Âge à la floraison des individus F1



Exploitation attendue

Comparaisons à effectuer :

- au sein de chaque site entre F1-1997 et F1-2004 ;
- entre les sites.

Interprétations à identifier :

- variations de l'âge de la floraison en fonction de la disponibilité en eau = adaptation ;
- adaptation au milieu de vie d'origine.

Comparaisons à effectuer

- Site sec : pas de différence significative sur la période de floraison entre F1-1997 et F1-2004 (légèrement plus précoce).
- Site humide : avancée de la floraison, traduite par la position de la médiane à 46 jours pour F1-2004 contre 58 pour F1-1997 ; raccourcissement de la période de floraison pour les graines de 2004 par rapport à celle de 1997, indiquée par l'étendue de la boîte à moustaches, de 26 jours pour F1-2004 et 32 jours pour F1-1997.
- Comparaison entre individus issus de graines du site sec et du site humide : la période de floraison pour les plantes du site humide est et reste plus tardive.

Interprétations à identifier

- La période de floraison des plantes issues de graines du site sec a été peu modifiée car les plantes présentent dès le départ une capacité de résistance à une faible disponibilité en eau.
- En revanche, les plantes issues de graines venant du site humide qui ont été sélectionnées au cours de la période de sécheresse sont celles qui fleurissent plus tôt. Le cycle de vie est raccourci, augmentant ainsi leur chance de reproduction.
- Les plantes issues de graines du site humide ont initialement une moins bonne capacité de résistance au manque d'eau.

Synthèse : mise en relation des informations

Les plantes issues du milieu sec sont adaptées à leur environnement, donc à la sécheresse. Leur taux de survie est toujours élevé (entre 90 et 100%) quelle que soit la durée d'arrosage et donc la disponibilité du sol en eau (documents 3 et 4) ; leur floraison est précoce (document 5).

Les plantes issues des graines collectées en 2004 sur le site humide sont plus adaptées à la sécheresse que celles issues des graines de 1997 de ce même site : leur taux de survie atteint 75% contre 50% en 1997 (document 4) ; en saison courte et elles fleurissent plus tôt, 50 % des F1-2004 ont fleuri au bout de 46 jours contre 58 jours pour les F1-1997 (document 5). L'avancée de la date de floraison est une adaptation à la sécheresse. En fleurissant rapidement, cela raccourcit le cycle de vie (document de référence) et donc permet la production de graines tant que la disponibilité en eau est suffisante.

Les années de sécheresse ont sélectionné, au sein des populations, des plantes capables de résister et se reproduire malgré la faible disponibilité en eau. Les changements climatiques ont donc eu un impact sur l'évolution des populations de *Brassica rapa* par sélection naturelle.

Évaluation des compétences travaillées

Niveau de maîtrise	Qualité des informations	Mise en relation des informations	Qualité de la démarche
Très bonne maîtrise	Les informations issues des documents sont riches et pertinentes.	Mise en relation pertinente. Usage adapté des connecteurs logiques	L'explication proposée permet au lecteur de comprendre l'essentiel du processus expliqué.
Maîtrise satisfaisante	Les informations les plus importantes sont présentes.	Mise en relation maladroite. Peu de mots de liaison et/ou peu de connecteurs logiques.	L'explication proposée permet au lecteur de comprendre partiellement le processus expliqué.
Maîtrise fragile	Les informations ont été trouvées en nombre insuffisant, certaines sont pertinentes.	Juxtaposition des informations majoritaire. Les connecteurs utilisés ne le sont pas toujours à bon escient.	L'explication proposée permet au lecteur de comprendre partiellement le processus expliqué.
Maîtrise insuffisante	Seules des informations évidentes ont été trouvées, elles ne sont pas en nombre suffisant et sont rarement pertinentes.	Usage des connecteurs logiques erroné.	L'explication proposée ne permet pas au lecteur de comprendre le processus expliqué.

EXEMPLE D'ACTIVITÉ

COLLÈGE - CYCLE 4

REMobilisation - Réinvestissement

Situation initiale

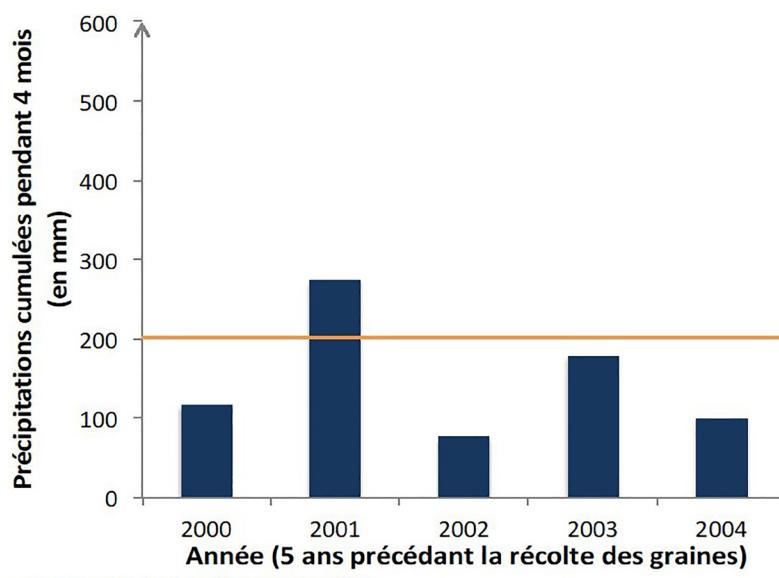
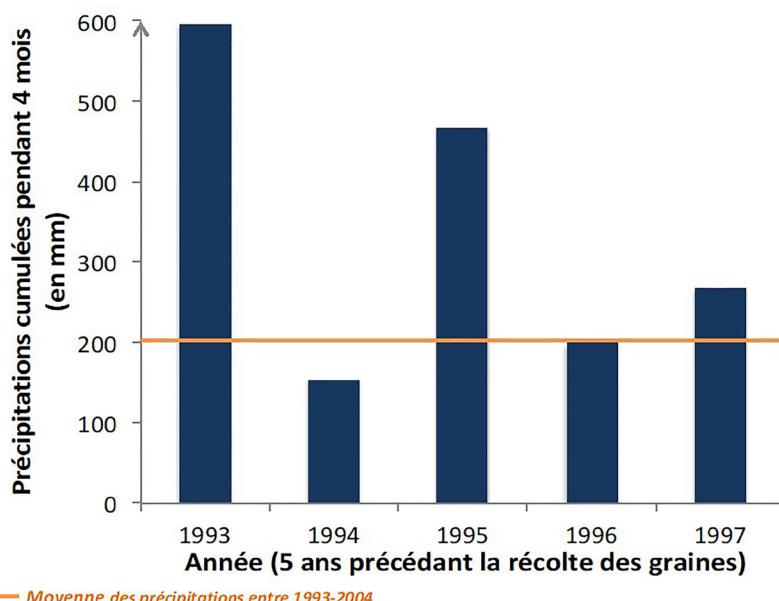
1

Localisation géographique d'Irvine



2

Données pluviométriques pendant les saisons des pluies



Objectif général

- Attendu de fin de cycle : mettre en relation différents faits et établir des relations de causalité pour expliquer l'évolution des êtres vivants.

Objectif notionnel

- Mettre en évidence des faits d'évolution des espèces et donner des arguments en faveur de quelques mécanismes de l'évolution : maintien des formes aptes à se reproduire, hasard, sélection naturelle.

Objectif méthodologique

- Pratiquer des langages : lire et exploiter des données présentées sous différentes formes.
- Pratiquer des démarches scientifiques : communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant.

Prérequis

- Notionnels : cycles de vies des végétaux (décrire comment les êtres vivants se développent et deviennent aptes à se reproduire – Cycle 3) ; différence météo-climat, précipitations, ensoleillement – Cycle 4) ; variations de la biodiversité actuelle (Cycle 4) ;
- Méthodologiques : étapes de la démarche expérimentale ; lecture d'un graphique (fiches d'aides).



Justifier, à l'aide de ces deux graphiques, que la période de 2000-2004 a été plus sèche que celle de 1993-1997.

Exploitation attendue

Analyse des diagrammes en bâtons :

- relever des valeurs qui permettent de montrer que, malgré l'hétérogénéité interannuelle, les précipitations lors des saisons des pluies 1^{ère} période > 2^{ème} période ;
- rapport à la moyenne = tendance à avoir des années plus sèches à partir de 2000.

ÉVOLUTION RAPIDE DE LA PÉRIODE DE FLORAISON D'UNE PLANTE ANNUELLE EN RÉPONSE AUX FLUCTUATIONS CLIMATIQUES

Mise en situation

Des chercheurs se sont demandé si l'assèchement constaté à Irvine a eu des conséquences sur le cycle de vie des plantes à fleurs. Pour explorer cette idée, ils ont prélevé des graines de Navette d'été (*Brassica rapa*) en 1997 et en 2004, dans deux lieux distincts :

- un lieu dont le sol ne retient pas l'eau, appelé "**site sec**" ;
- un lieu dont le sol retient l'eau, appelé "**site humide**".

Ces graines ont ensuite été mises en culture dans



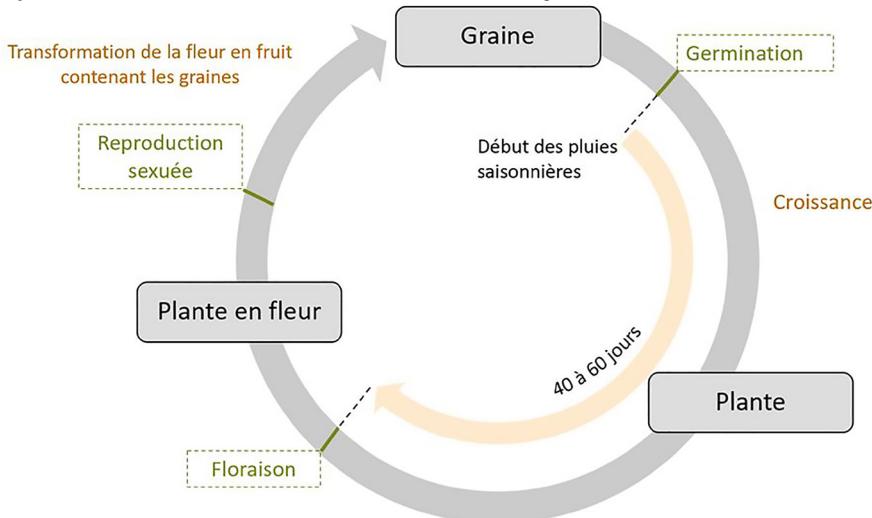
En exploitant les documents, aider les chercheurs à déterminer les conséquences éventuelles de l'assèchement sur le cycle de vie de la moutarde sauvage. Intégrer à la réponse une analyse précise des diagrammes en bâtons.

des conditions identiques à l'exception de la durée d'arrosage :

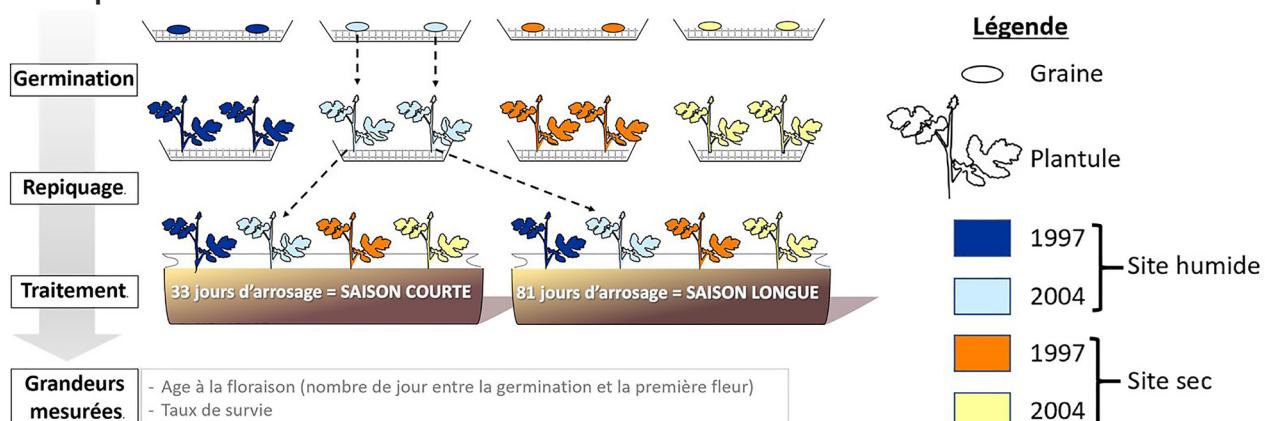
- une durée d'arrosage de 33 jours, mimant une saison des pluies "**courte**", donc des précipitations cumulées faibles ;
- une durée d'arrosage de 81 jours, mimant une saison des pluies "**longue**", donc des précipitations cumulées importantes.

Sur les plantes issues de ces graines, on a mesuré **l'âge de floraison** ainsi que **le taux de survie**.

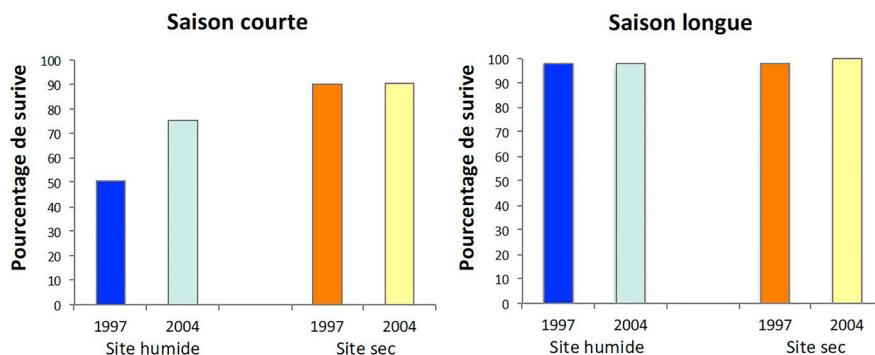
1 Cycle de vie de la Navette d'été (*Brassica rapa*)



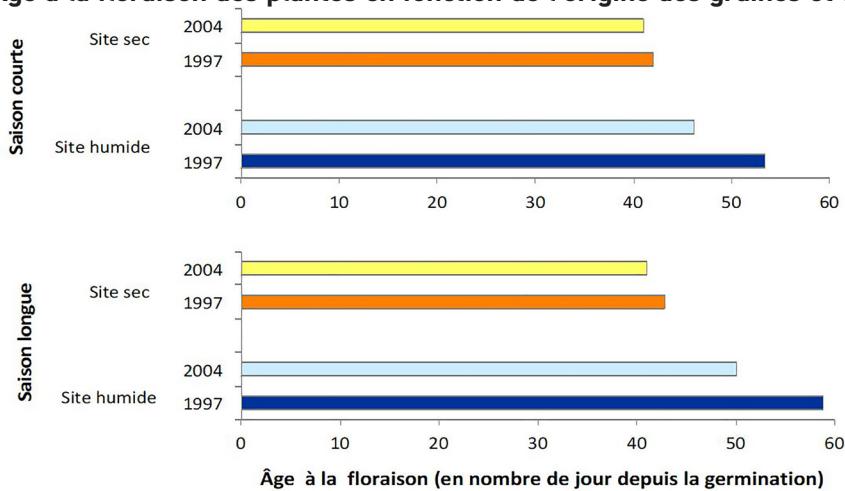
2 Protocole expérimental



3 Taux de survie des plantes en fonction de l'origine des graines et de la durée d'arrosage



4 Âge à la floraison des plantes en fonction de l'origine des graines et de la durée d'arrosage



Fiche d'aide niveau 1

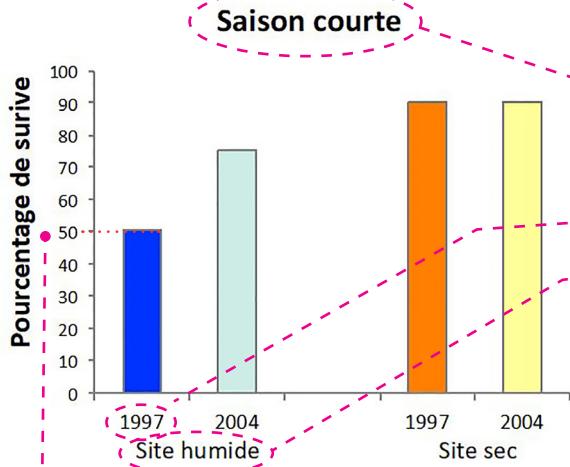
- Repérer les titres des axes avec leur unité.
- Repérer et noter pour chaque bâton les conditions qui lui correspondent (origine de la graine, année, durée d'arrosage).
- Repérer la grandeur mesurée et donner la valeur correspondante pour chaque bâton.
- Comparer ces valeurs 2 par 2.
- Établir un lien entre cette comparaison et les conditions correspondantes.

Fiche d'aide niveau 2

« Sur le graphique on peut voir qu'en 1997, sur le site humide, en saison courte, il y a 50% de survie des plantes. »

- Retrouver cette valeur sur le diagramme en bâton.
- Faire de même pour les autres bâtons.

Fiche d'aide niveau 3



Exemple si on considère le bâton bleu foncé

Conditions :

- les graines ont été mises en culture en « saison courte », c'est-à-dire arrosées pendant seulement 33 jours ;
- elles ont été prélevées en 1997 sur le site humide.

Grandeur mesurée :

- la hauteur du bâton correspond au pourcentage de survie de ces graines, soit 50%.

Éléments de correction

Pour l'interprétation, il faut croiser les résultats avec les données de pluviométrie et faire le lien avec le protocole expérimental.

Site	Année	Taux de survie (%)		Comparaison 2 à 2 (saison courte/saison longue)			
		Saison courte	Saison longue				
Humide	1997	50	98	Les plantes issues d'un site humide ont un taux de survie moins bon lors d'une saison des pluies courte que d'une saison longue. La différence de survie est la plus forte pour les plantes de 1997.	INTERPRÉTATION La durée d'arrosage courte affecte la survie des plantes de façon négative. La durée d'arrosage longue est suffisante pour permettre la survie de toutes les plantes, quelle que soit leur origine.		
	2004	75	98				
Sec	1997	90	98	Les plantes issues d'un milieu sec ont un taux de survie important aussi bien en saison courte que longue.	CONCLUSION Les plantes qui souffrent le plus d'une saison d'arrosage courte sont celles de 1997 issues du site humide puis celles de 2004. Les années de sécheresse ont favorisé la sélection de caractères permettant aux plantes de mieux supporter la sécheresse.		
	2004	90	98				
Comparaison 2 à 2 (site humide / site sec)		<ul style="list-style-type: none"> (1) En saison courte, les plantes issues de graines provenant du site sec ont une survie supérieure à celles du site humide. (2) Graines du "site sec" : les plantes survivent autant, que les graines aient été prélevées en 1997 ou 2004. (3) Graines du "site humide" : les plantes issues de graines prélevées en 2004 survivent plus que celles issues de graines de 1997. 					
Interprétation		Pour la saison de pluies courte : <ul style="list-style-type: none"> (1)+(2) les plantes issues du site sec supportent mieux une courte durée d'arrosage que celles issues du site humide ; (3) les plantes issues du site humide récoltées en 2004 supportent mieux une courte durée d'arrosage que celles récoltées en 1997. 					
Site	Année	Age de la floraison		Comparaison 2 à 2 (saison courte/saison longue)			
		Saison courte	Saison longue				
Humide	1997	53	67	Les plantes issues du site humide fleurissent plus tard en saison longue qu'en saison courte.	INTERPRÉTATION Les plantes de 2004 ayant subi une période de sécheresse (pluviométrie faible) semblent avoir amorcé une adaptation à ce manque d'eau.		
	2004	46	51				
Sec	1997	42	43	Pas de différence significative dans l'âge à la floraison.	CONCLUSION L'avancée de la date de floraison est une adaptation à la sécheresse : elle permet aux plantes de fleurir et donc de produire des descendants avant de mourir.		
	2004	41	41				
Comparaison 2 à 2 (site humide / site sec)		<ul style="list-style-type: none"> (1) Les plantes issues du site humide fleurissent toujours plus tard que les plantes issues du site sec. (2) Pas de différence de floraison entre les plantes de 1997 et de 2004 issues des graines du site sec. (3) La floraison est plus rapide pour les plantes de 2004 issues des graines du site humide. 					
Interprétation		Pour la saison courte : <ul style="list-style-type: none"> (1)+(2) Les plantes issues du site sec montrent une adaptation au manque d'eau. (3) Les plantes issues du site humide montrent une adaptation au manque d'eau. Les périodes de sécheresses précédentes ont permis aux plantes issues du milieu humide d'avoir déjà amorcé une adaptation à ce manque d'eau. 					

Synthèse mise en relation des informations

Les plantes issues du site sec sont déjà adaptées à la sécheresse :

- elles survivent bien même en saison courte (plus de 90%) ;
- elles fleurissent tôt (40 à 43 jours après la germination).

Les plantes issues du site humide en 2004 sont plus adaptées à la sécheresse que celles issues du site humide en 1997 :

- elles survivent mieux en saison courte (75% contre 50%) ;
- elles fleurissent plus tôt (50 jours après la germination contre 58 en 1997).

Les plantes du site humide ont donc évolué entre 1997 et 2004. Les années de sécheresse ont sélectionné, au sein des populations de ces plantes, les individus dont les caractères permettent de mieux supporter la sécheresse. L'avancée de la date de floraison (caractère "date de floraison précoce") est aussi une adaptation à la sécheresse puisqu'elle permet aux plantes de fleurir et donc de produire des descendants avant de mourir. La sélection naturelle a eu pour conséquence une évolution adaptative en quelques générations des populations de *Brassica rapa* du site humide à Irvine.

Évaluation des compétences travaillées

Compétences travaillées	Niveau de maîtrise des compétences			
	Très bonne maîtrise	Maîtrise satisfaisante	Maîtrise fragile	Maîtrise insuffisante
D1. Pratiquer des langages : lire et exploiter des données.	Les données chiffrées sont extraites de tous les graphiques et comparées judicieusement.	Les données chiffrées sont extraites de tous les graphiques et comparées aléatoirement ou partiellement.	Les données chiffrées sont partiellement extraites des graphiques et rarement ou ne sont pas comparées.	Les données chiffrées sont peu ou partiellement extraites de tous les graphiques et non comparées.
D4. Pratiquer des démarches scientifiques : communiquer sur ses démarches, ses choix en argumentant.	Les informations des différents documents sont mises en relations en utilisant des mots de liaison et justifiées (comparaison de valeurs chiffrées).	Les informations des différents documents sont partiellement mises en relation et/ou justifiées.	Les informations des différents documents ne sont pas mises en relation ou non justifiées.	Les informations des différents documents ne sont pas mises en relation et non justifiées.

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/navette/POSTER_navette.pdf



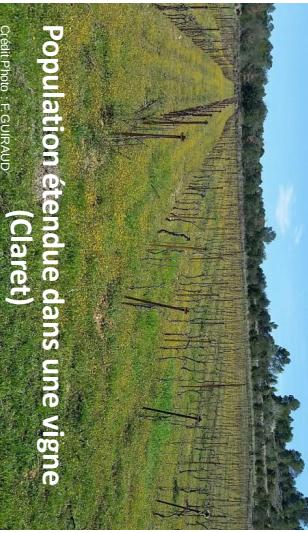
Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/navette/docs_navette.zip





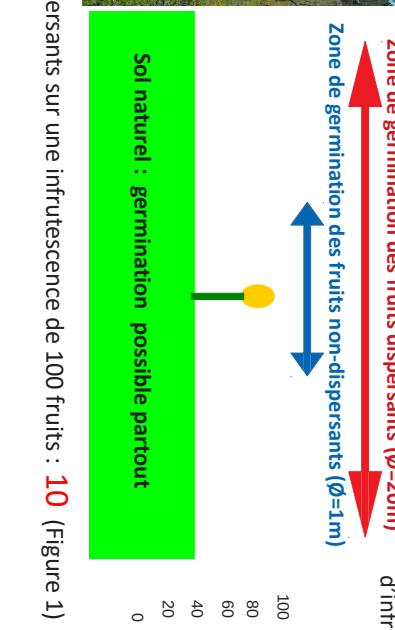
ÉVOLUTION RAPIDE DE LA DISPERSION DES FRUITS EN MILIEU URBAIN CHEZ *CREPIS SANCTA*



**Population étendue dans une Vigne
(Claret)**

Credit photo : F. GUIRAUD

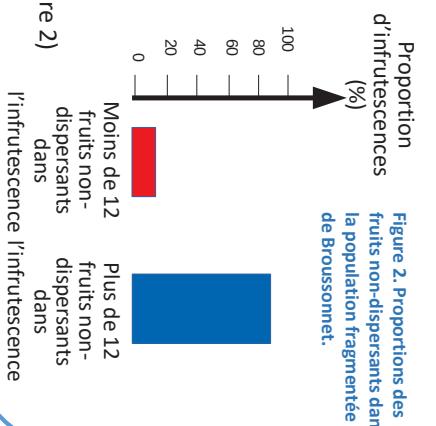
Nombre moyen de fruits non-dispersants sur une infrutescence de 100 fruits : **10** (Figure 1)



**Population urbaine : rue A.
Broussonnet (Montpellier)**

Credit photo : Google

Nombre moyen de fruits non-dispersants sur une infrutescence de 100 fruits : **15** (Figure 2)



Evolution du pourcentage de fruits non-dispersants sur 70 ans

Lien entre urbanisation et isolement des populations

Figure 3. Variations de la fréquence des fruits non-dispersants dans deux populations (la population fragmentée de « Broussonet » et la population étendue et non fragmentée de Claret) sur 70 ans.

Pourcentage de fruits non-dispersants dans l'infrutescence
1987, aménagement des trottoirs de la rue Broussonnet



Fort coût à la dispersion
→ contre-sélection des formes dispersantes
baisse de leur fréquence ?

Action de l'Homme : Habitats fragmentés

Réponse très rapide
(quelques dizaines d'années-Figure 3)

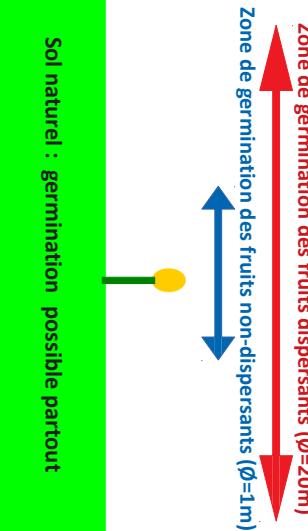
Isolement des populations
Car moins de dispersion

Les fruits dispersants ont beaucoup moins de chance de tomber sur une parcelle verte permettant leur germination que les fruits non-dispersants.

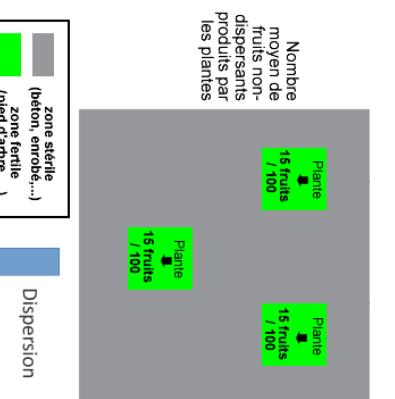
→ contre-sélection des fruits dispersants en habitat fragmenté = baisse de leur fréquence ?

B. Population fragmentée

Sol naturel : germination possible partout



Nombre moyen de fruits non-dispersants produits par les plantes



Dispersion

Évolution rapide de la dispersion des fruits en milieu urbain chez *Crepis sancta*

D'après l'article de Cheptou et al. « Rapid evolution of seed dispersal in an urban environment in the weed *Crepis sancta* », Proc. Natl. Acad. Sci. 105: 3796-3799 (2008).

S. Huret-Boussès¹, P. Delhont², E. Ducoffre³, F. Guiraud³, A. Lopez², S. Prieur³

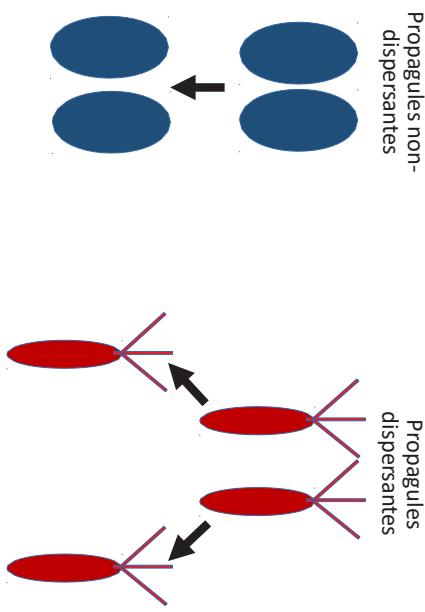
1. Mivegec, Univ Montpellier, CNRS, IRD, Montpellier, France

2. Lycée A. Camus, Nîmes

3. Collège Feuchères, Nîmes

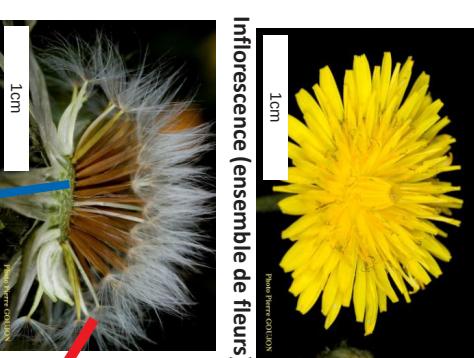
La dispersion : un trait ubiquitaire des organismes vivants

Modèle biologique : *Crepis sancta* ou Crépide de Nîmes

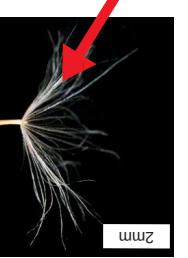


La sélection naturelle peut s'exercer sur les stratégies de dispersion (propagules dispersantes versus non dispersantes) si :

- la dispersion représente un coût ;
- il y a de la diversité : formes dispersantes vs non-dispersantes ;
- les traits de dispersion sont héritables.



Inflorescence (ensemble de fleurs)



Fruit dispersant



Crepis sancta

Compte tenu du risque de perte associé, la dispersion peut être coûteuse dans certains environnements

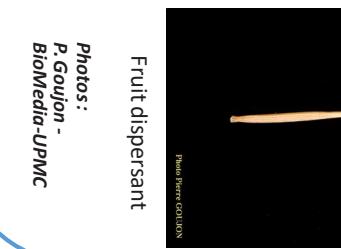
Moins de fruits dispersants dans une population urbaine fragmentée

A. Population non-fragmentée

Fruits non-dispersants



Inflorescence (avec fruits)



Photos: P. Gouyon - BioMedia-UPMC

Milieu urbain = fort coût à la dispersion
Parcelles artificielles sur lesquelles sont placées les Crédides.

Proportion

Figure 1. Proportions des

Habitats fractionnés

DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Lecture de l'article.
- Interactions avec l'enseignante-chercheuse.
- Adaptation de l'article au contexte de la classe.

Lecture de l'article par les professeurs

Plusieurs obstacles sont apparus à la lecture de l'article :

- un vocabulaire scientifique précis à traduire (langue anglaise) ;

- des notions scientifiques récentes ou « pointues » parfois à revoir (statistiques) ;
- une bonne compréhension de la démarche adoptée par les auteurs.

Interactions avec l'enseignante-chercheuse

Des interactions ont été nécessaires avec S. Hurtrez-Boussès afin d'avoir :

- une explication de la démarche suivie. Cela a abouti à corriger des erreurs de compréhension ;

- une explication de notions et calculs utilisés par les auteurs ;
- un recadrage des productions si des erreurs de vocabulaire ou de raisonnement sont commis.

Adaptation de l'article au contexte de la classe

Le principal travail d'adaptation réalisé a été de transformer les informations contenues dans l'article en supports visuels accessibles par les élèves. Pour cela, nous avons :

- ajouté des informations visuelles sur le modèle végétal utilisé (photos des inflorescences, des fruits, etc.) ;
- simplifié les indications géographiques avec deux localisations seulement, sur les 12 mentionnées ;
- illustré chacune d'entre elle par des photos prises *in situ* ;
- réalisé un schéma du montage expérimental réalisé par les chercheurs (il est seulement décrit dans l'article) ;

Action de l'Homme : urbanisation



Réponse très rapide (quelques dizaines d'années-Figure 3)

Isolement des populations Car moins de dispersion

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/crepis/POSTER_crepis.pdf



Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/crepis/docs_crepis.zip



ÉVOLUTION RAPIDE DE LA DISPERSION DES FRUITS EN MILIEU URBAIN CHEZ *CREPIS SANCTA*

Déroulement de la séquence

La séquence s'appuie sur une sortie en milieu extra-urbain agricole, puis urbain, durant la saison de floraison de la crémide (avril-mai). Les activités qui en découlent se déroulent sur deux séances.

Cette sortie est l'occasion de produire un relevé d'observations sur les deux milieux et de prélever des individus afin de les étudier en classe. La construction des trottoirs en ville est remarquée et notée sur le livret de sortie.

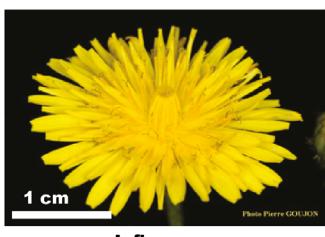
Document préparatoire

Même si compléter directement le fichier crepide.xlsx est possible, on peut également donner un lien vers un tableur collaboratif de type *framacalc* préparé à l'avance et faisant apparaître les pourcentages en fonction des nombres entrés par les groupes d'élèves. A cet effet, le fichier crepide.xlsx est disponible dans les documents téléchargeables.

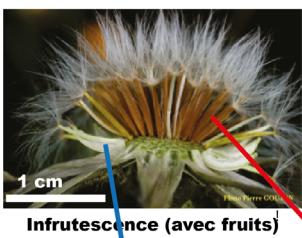
Activité 1

Quel impact l'action humaine peut-elle avoir sur une population de fleurs ?

1 Fiche descriptive des fleurs de la crémide



Inflorescence



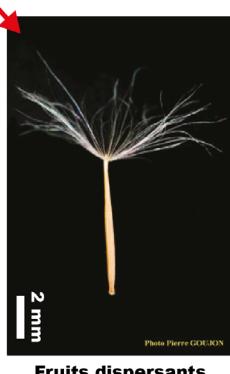
Infrutescence (avec fruits)



10 cm



Fruits non-dispersants



Fruits dispersants

Programme

- Expliquer comment une activité humaine peut modifier l'organisation et le fonctionnement des écosystèmes en lien avec quelques questions environnementales globales. Argumenter les impacts générés par le rythme, la nature (bénéfices/nuisances), l'importance et la variabilité des actions de l'être humain sur l'environnement.
- Relier des éléments de biologie de la reproduction sexuée et asexuée des êtres vivants et l'influence du milieu sur la survie des individus, à la dynamique des populations. Mettre en évidence des faits d'évolution des espèces et donner des arguments en faveur de quelques mécanismes de l'évolution.

Prérequis

- Reproduction des plantes à fleurs, étudiée sur l'exemple de la crémide.



Compter pour chaque fleur le nombre de fruits dispersants et le nombre de fruits non-dispersants. Compléter le tableau commun à l'aide de ces nombres.

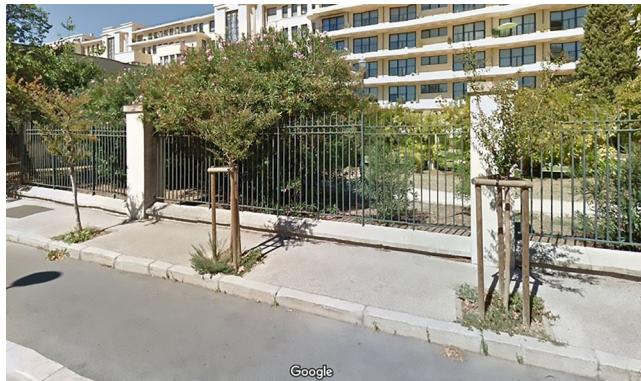
Décrire les résultats : comparer les deux populations, urbaine et rurale.

Proposer une explication aux effets d'une fragmentation de l'habitat sur les fleurs étudiées.

2 Deux environnements étudiés différents



Milieu ouvert riche en crépides



Milieu fragmenté avec des crépides sur le trottoir

Éléments de réponse

Les fruits dispersants sont en plus grand nombre chez les fleurs en milieu ouvert qu'en milieu fragmenté. À l'inverse, les fleurs en milieu fragmenté ont plus de fruits non-dispersants que les fleurs en milieu ouvert. En milieu fragmenté, les fruits non-dispersants de la crêpide semblent être sélectionnés alors qu'en milieu ouvert ce sont les fruits dispersant qui semblent avantagés.

Activité 2

Comment la construction des trottoirs peut-elle avoir modifié les proportions des types de fruits de la crêpide ?

3 les deux types de fruits de la crêpide



a.
masse : 0,1g

Chaque plante forme deux types de fruits, certains équipés d'une ailette (a) qui aide à sa dispersion, d'autres (b) sans ailette.



b.
masse : 0,27g



Formuler des hypothèses pour expliquer les différences de proportions des deux types de fruits entre les milieux fragmentés et ouverts étudiés ici.

À partir du matériel proposé ou imaginé : différents fruits de la crêpide sur pied, ventilateur, grandes feuilles adhésives, etc., réaliser un modèle pour tester votre hypothèse.

Décrire les résultats de votre expérience. Conclure en justifiant la validité de l'hypothèse formulée.

Déroulement de la séance

Collectivement et en s'appuyant sur les documents 1 et 3, les élèves sont amenés à réfléchir aux explications possibles en les reliant à leur mécanisme de dispersion respectif.

Bien évidemment, il faut leur donner des fruits afin de faire leurs expériences...

Hypothèses attendues

« Après être tombés au sol, les deux types de fruits ne germent pas aussi facilement dans un milieu que dans l'autre ».

« Les deux types de dispersion ne donnent pas aux deux types de fruits les mêmes chances de tomber sur un sol favorable à la germination ».

Les élèves peuvent alors concevoir et mettre en œuvre l'expérience qui permettra de valider ou d'infirmer leur hypothèse.

IMPACT DE L'URBANISATION SUR UNE PETITE FLEUR, LA CRÉPIDE

Mise en situation

La Crépide de Nîmes – *Crepis sancta* – est une petite plante ressemblant au pissenlit, qui pousse au bord des chemins et dans les vignes du Midi et même en pleine ville au pied des arbres sur les trottoirs. Des chercheurs se sont intéressés à l'impact de l'urbanisation sur cette plante.

1 Deux types d'environnements

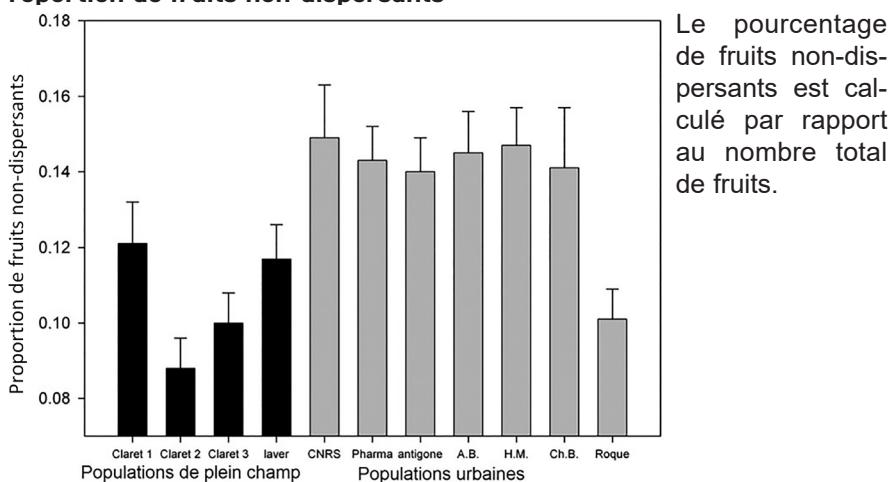
Les chercheurs ont récolté des plantes issues de deux milieux différents : un premier groupe issu de plein champ, un second groupe récolté en ville (Montpellier).



Les chercheurs ont ensuite cultivé des plantes issues de ces deux groupes en serre et compté le type de fruits produits par chaque individu.

2 Les fruits de la crépide (voir documents 1 et 3 de l'activité cycle 4)

3 Proportion de fruits non-dispersants



Le pourcentage de fruits non-dispersants est calculé par rapport au nombre total de fruits.

Programme

- La sélection naturelle résulte de la pression du milieu et des interactions entre les organismes. Elle conduit au fait que certains individus auront une descendance plus nombreuse que d'autres dans certaines conditions.



À l'aide des documents proposés, décrire l'impact de l'urbanisation sur cette plante et expliquer les mécanismes qui ont abouti à cette évolution grâce à vos connaissances.

Éléments de réponse

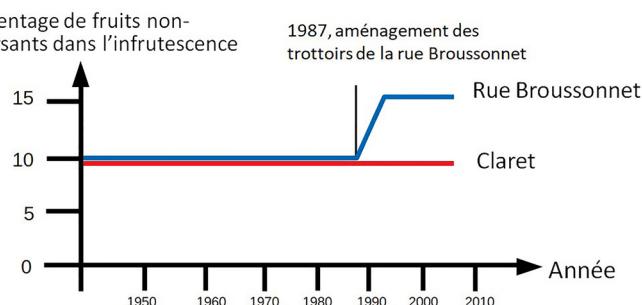
Le document 3 montre que les plantes issues de populations de plein champ produisent significativement moins de fruits non-dispersants (type b), entre 10 et 12%, que les plantes issues de populations de milieu urbain (aux alentours de 15%).

Dans les champs, les fruits de type b qui sont plus lourds (0,27 g contre 0,1 g pour les dispersants) tombent près de la plante mère et subissent de la concurrence pour les ressources trophiques (lumière, eau, sel minéraux). Au contraire, les fruits dispersants ont plus de chances de germer loin de la plante mère.

En plein champ, le caractère non-dispersif présente le désavantage de mettre la jeune plante en concurrence avec la plante-mère, le caractère dispersif semble plus favorable à la survie.

En milieu urbain, les surfaces bétonnées laissent peu de places propices à la germination. De ce fait, les fruits lourds qui tombent près de la plante, ont plus de chance de rencontrer un peu de terre et les graines de germer. Les individus qui produisent ce type de fruits sont favorisés et cette faculté tend à devenir plus importante dans la descendance. Les fruits dispersants se perdent pour la grande majorité sur des surfaces impro pries à la germination des graines. Ce caractère est donc défavorable dans cet environnement et subit une pression de sélection.

4 Variations de la fréquence des fruits non-dispersants dans deux populations sur 70 ans



EXEMPLE D'ACTIVITÉ LYCÉE - TERMINALE

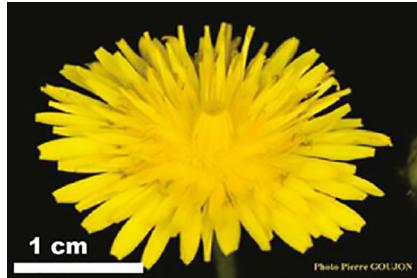
IMPACT DE L'URBANISATION SUR UNE PETITE FLEUR, LA CRÉPIDE

Programme

- Enjeux planétaires contemporains / De la plante sauvage à la plante domestiquée / Reproduction de la plante entre vie fixée et mobilité.

Contexte

- Situation d'évaluation des compétences expérimentales.

Mise en situation		
<p>Divers mécanismes ont été sélectionnés chez les plantes, organismes fixés, permettant la dispersion de leurs graines.</p> <p>La Crépide de Nîmes, <i>Crepis sancta</i>, est une plante de la famille des Astéracées qui produit une infrutescence (ensemble de fruits) où l'on peut observer deux types de fruits : des fruits dispersants et des fruits non dispersants. On peut la trouver dans les champs qui forment des habitats étendus ou bien dans les villes, en habitat fragmenté. En effet, dans ce dernier cas, elle occupe des espaces séparés par des zones goudronnées où la germination est très difficile.</p>	 1 cm Photo Pierre GOUJON	<p>Inflorescence de <i>Crepis sancta</i></p> <p>Ce que l'on confond généralement avec un simple pétales est en réalité une fleur entière comme le révèlent les étamines et pistils que l'on peut observer.</p>
	 1 cm Photo Pierre GOUJON	<p>Infrutescence de <i>Crepis sancta</i></p> <p>Les fruits au centre portent un plumeau et sont plus fins que ceux à la périphérie qui n'ont pas de plumeau.</p>

On cherche à montrer que le milieu de vie influence la proportion des différentes formes de fruits de l'infrutescence de la Crépide de Nîmes.

Ressources		
<p>Document 1 : quelques données sur les fruits de la Crépide de Nîmes.</p> <p>Les formes dispersantes sont légères (0,1 g) et pourvues d'un pappus, touffe de poils permettant une dispersion par le vent. Les formes non dispersantes sont plus grosses (0,27 g) et sans pappus.</p> <p>Compte-tenu du risque de perte associé, la dispersion peut être vue comme coûteuse.</p>	<p>Document 2 : les deux formes de fruits de la Crépide de Nîmes.</p>  2 mm Photo Pierre GOUJON	 2 mm Photo Pierre GOUJON
	<p>Forme dispersante</p>	<p>Forme non-dispersante</p>

Fiche protocole - élève

Matériel disponible et protocole d'utilisation du matériel		
<p>Matériel :</p> <ul style="list-style-type: none"> infrutescences de Crépide de Nîmes de ville ; ciseaux fins, scalpel, pinces fines ; loupe binoculaire ; dispositif d'acquisition et de traitement d'images et logiciel mesurim ou mesurim2 ; tableur et sa fiche technique ; fichier crepide.xls. 		
Rien à signaler	Rien à signaler	<p>Afin de montrer que la forme de crêpide des villes possède une infrutescence différente de celle de la forme des champs :</p> <ul style="list-style-type: none"> observer et dénombrer les types de fruits dispersants et non-dispersants d'infrutescences de crêpide prélevée en ville et en milieu agricole ; utiliser le tableau crepide.xls pour calculer la proportion de fruits dispersants sur des infrutescences prélevées dans les deux types de milieux, urbain et agricole. <p>Appeler l'examinateur pour vérifier le résultat et éventuellement obtenir une aide.</p>

Éléments d'évaluation		
<p>Concevoir une stratégie pour résoudre une situation problème</p> <p>On attend du candidat qu'il conçoive une stratégie réaliste et cohérente avec la recherche à mener et les ressources, précisant :</p> <ul style="list-style-type: none"> ce qu'il fait (matériel, technique, supports, ...); comment il le fait (témoins, paramètres variables et fixés, ...); ce qu'il attend (résultats attendus, ...). <p>On acceptera et on valorisera toute idée d'observation et de comptage des deux types d'infrutescences et de comparaison entre elles. On s'attend à observer une proportion plus grande de fruits non dispersants chez les formes urbaines.</p>		
<p>Mettre en œuvre un protocole de résolution pour obtenir des résultats exploitables</p> <p>On attend du candidat qu'il mette en œuvre le protocole : maîtrise du matériel, respect des consignes et gestion correcte du poste de travail.</p> <p><u>Seules aides majeures :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> fiche de procédure détaillée OU réalisation du geste à la place du candidat (une seule, selon la compétence testée, parmi : la séparation et l'observation des fruits, le réglage de la loupe binoculaire, l'utilisation du logiciel Mesurim ou du tableur) ; l'examinateur intervient pour imposer à l'élève les conditions de travail et les règles de sécurité. <p>Le rangement du poste de travail est comptabilisé comme une aide mineure.</p> <p>Toutes les autres aides doivent être considérées comme mineures.</p>		
<p>Présenter les résultats pour les communiquer</p> <p>On attend du candidat qu'il présente une production :</p> <ul style="list-style-type: none"> techniquement correcte (soignée, lisible, approprié, ...); bien renseignée (informations complètes et exactes dans le cadre du moyen de communication choisi) ; bien organisée (informations traduites dans le sens du problème à traiter). <p>La communication prépare à la comparaison des deux types d'infrutescences afin de mettre en évidence une différence dans la proportion de fruits dispersants et non dispersants.</p>		
<p>Exploiter les résultats obtenus pour les communiquer</p> <p>On attend du candidat qu'il :</p> <ul style="list-style-type: none"> exploite l'ensemble des résultats ; intègre des notions (issues des ressources, de la mise en situation ou d'un apport du candidat) ; construise une réponse au problème posé explicative et cohérente intégrant les résultats. <p>Plus de fruits non dispersants en ville ce qui limite les pertes dues à la dispersion par le vent en habitat fragmenté.</p>		



L'Association des Professeurs de Biologie et Géologie regroupe les professeurs enseignant les sciences de la vie et de la Terre en collège et lycée, ainsi que des professeurs des écoles et des universitaires, désirant partager leurs expériences pédagogiques et scientifiques et se tenir informé de la science qui se fait, comme de celle qui s'applique.

L'APBG est une association professionnelle qui est ouverte à tous ceux qui s'intéressent aux sciences du vivant de l'environnement, de la santé et de la Terre. Elle a pour rôle la défense, la promotion de l'enseignement des SVT dans l'enseignement secondaire.



Il faut être le plus nombreux possible pour continuer à être un interlocuteur privilégié, pour peser auprès de nos décideurs et promouvoir les SVT comme une science complexe au service du quotidien et indispensable aux futurs citoyens.

AUSSI, REJOIGNEZ-NOUS !

Adhésion simple **25€**
Adhésion et
abonnement **65€**
au bulletin trimestriel



<http://www.apbg.org/qui-sommes-nous/adhesion-abonnement/>



LES ORCHIDÉES TROMPEUSES, L'EXEMPLE DE *DACTYLORHIZA SAMBUCA*

taux de fructification (ratio nb fruits / nb fleurs).

taux de pollinisation (Dépôt des pollinies / U.A.)

Attendu : le dépôt de pollen et la production de fruits devraient être plus importants sur les morphes rares, et ce pour les deux couleurs => les morphes rares seraient avantagés.

Résultats & interprétations

Figure 2. Succès de pollinisation (dépôt de pollinie et taux de fructification) en fonction de la fréquence du morpho jaune.

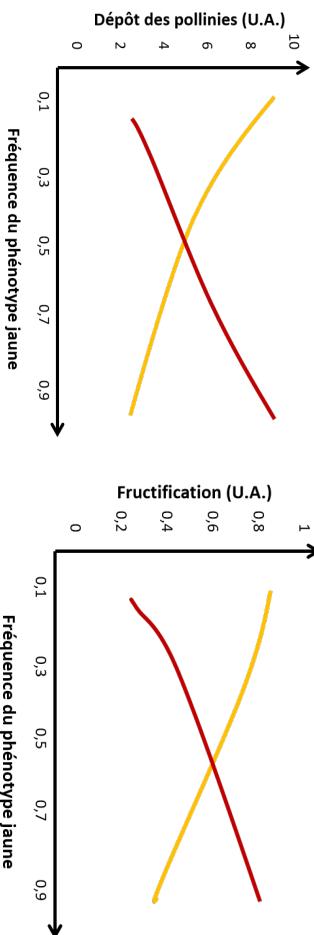
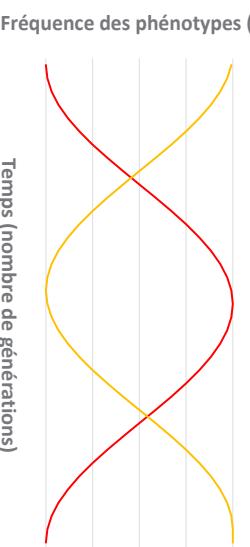
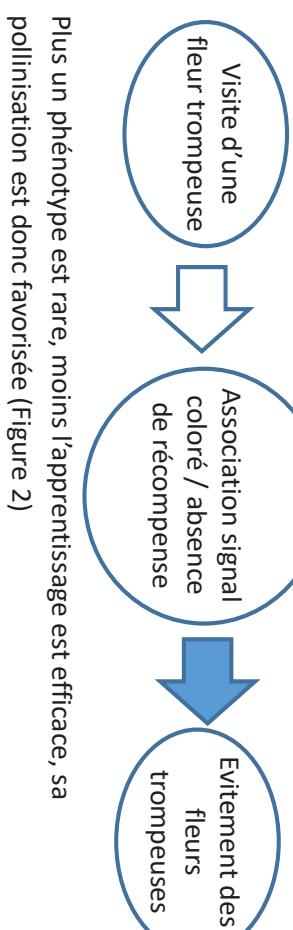


Figure 3. Modèle prédictif de variation temporelle des fréquences de phénotypes colorés au cours des générations



- le phénotype rare est :
- plus visité et pollinisé ;
- produit plus de fruits.

Explication : processus d'apprentissage



Un phénotype rare est donc avantageux (Figure 2), cet avantage devrait entraîner l'augmentation de la fréquence de ce phénotype qui devient donc moins avantageux car moins rare... On attend donc une **variation temporelle** des fréquences des deux morphes dans les populations naturelles (Figure 3).

Conclusion

La sélection naturelle ne conduit pas à l'élimination d'une couleur, qui serait moins avantageuse, mais au maintien et à la fluctuation de la fréquence des deux couleurs chez ces orchidées.

Ces expériences (Figures 1 et 2) et modélisation (Figure 3) permettent d'illustrer un processus de sélection naturelle particulier : « la sélection fréquence dépendante négative » où l'avantage d'un phénotype vient de sa rareté !

Les orchidées trompeuses

D'après l'article Gigord et al., « Negative dependent selection maintains a dramatic color polymorphism in the rewardless orchid *Dactylorhiza sambucina* (L.) »

Soo. Proc. Natl. Acad. Sci. 98: 6253-6255 (2002).

M. Dufay¹, S. Michelier², J-P Goëlo³, L. Porras⁴, J. Heintz⁵

1. Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive, Université de Montpellier, Université Paul Valéry, L'institut Agro, CNRS, INRAE, IRD, EPHE

2. Lycée Jean Jaurès – Saint Clément de Rivière 3. Lycée La Merci– Montpellier 4. Lycée la Merci Littoral – La Grande Motte

5. Collège Camille Claudel - Montpellier

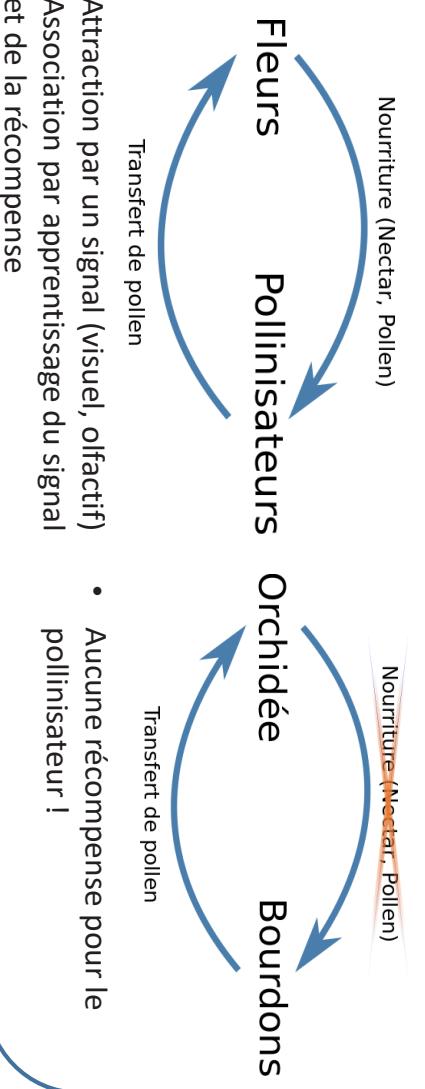
Introduction

Dactylorhiza sambucina présente une caractéristique très rare chez les plantes : un polymorphisme de couleur, avec un phénotype (=morpho) jaune et un phénotype (=morpho) pourpre au sein des mêmes populations.



Fonctionnement de interactions de pollinisation :

La pollinisation par tromperie chez l'orchidée *Dactylorhiza sambucina* :



Questions:

Quel mécanisme maintient-il ce polymorphisme ?
Est-il en lien avec la pollinisation par tromperie observée
chez cette espèce ?

- Attraction par un signal (visuel, olfactif)
- Association par apprentissage du signal et de la récompense

Hypothèse et protocole

Hypothèse : le polymorphisme de couleur est maintenu par un mécanisme de sélection naturelle de type fréquence-dépendance négative.

C'est-à-dire que le succès de pollinisation d'un phénotype dépend de sa fréquence dans la population et que les phénotypes rares sont avantageux.

Figure 1. Protocole expérimental



- 10 parcelles de plantes en pot, placées en milieu naturel

• Environ de fréquences variables des deux morphes x 2 réplicat

- Mesures sur chaque plante = succès de pollinisation individuel (Figure 2) :
- dépôt des pollinies (groupes de grains de pollen) sur les stigmates ;

DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Mode de réalisation.
- Obstacles rencontrés et stratégies mises en oeuvre.
- Simplification des données.

Mode de réalisation

Voici les étapes ayant permis l'adaptation de l'article en données pédagogiques exploitabless en classe.

- Lecture et traduction de l'article.
- Vérification de la compréhension de l'article via le forum de discussion avec les universitaires.
- Identification de la problématique et de la démarche.
- Tri des informations contenues dans l'article : élimination des données et informations non nécessaires pour résoudre le problème.
- Réécriture d'un synopsis avec rajout d'éléments indispensables à la compréhension ne figurant pas dans l'article.

- Recherche d'éléments visuels libres de droits ou création de l'iconographie.
- Adaptation des graphiques : dans l'article, le principal graphique est basé sur la présentation d'un ratio difficile à interpréter. Choix d'une représentation schématique plus simple tout en restant cohérente avec les données de l'article.
- Réalisation du poster : remplacement progressif de certains éléments du texte par des schémas, en vue de faciliter la communication et la rendre plus attractive.
- Temps de relecture et de réajustements.

Obstacles rencontrés et stratégies mises en œuvre

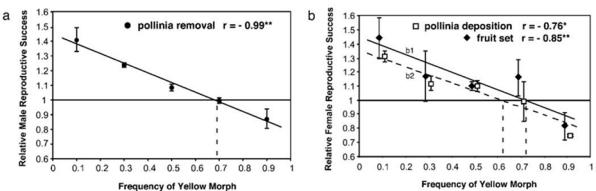
- Compréhension de l'anglais.
- Recherche d'images libres de droits et obstacles

liés aux droits d'auteurs pour les illustrations : un contact auprès des chercheurs et photographes a été tentée mais n'a pas obtenu de réponse.

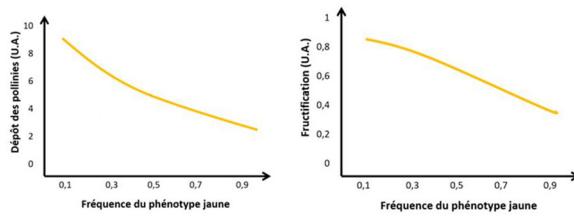
Simplification des données

Trouver une représentation accessible, tout en étant conforme et fidèle à l'article scientifique en précisant, sur le poster, que cette information a été adaptée.

Graphiques originaux



Graphiques modifiées



Succès de pollinisation (dépot de pollinie et taux de fructification) en fonction de la fréquence du phénotype jaune (adapté à partir de l'article).

Refaire les calculs pour construire les tableaux et les courbes.

Phénotype	Effectifs (génération n)	Nb. de graines produites	Taux de germination (%)	Effectifs (génération n+1)	Nb. de graines produites	Taux de germination (%)	Effectifs (génération n+2)
Pourpre	90	98	1	88	97	1	85
Jaune	10	119	1	12	125	1	15

Tableau. Effectifs au stade adulte ou graine des deux phénotypes dans une population sur trois générations successives.

DES ORCHIDÉES TROMPEUSES

Mise en œuvre par l'enseignant

Premier temps individuel : (35 min)

Second temps en groupe de 4 ou 5 (20 min) : réflexion, autour du poster adapté au niveau cycle 4. Objectif : percevoir les obstacles, liés à la compréhension de la démarche scientifique. Activité accompagnée d'une fiche d'auto-évaluation sur les représentations que l'élève a de sa maîtrise de la pratique d'une démarche scientifique et ce qu'il identifie comme indicateur permettant d'en déterminer les étapes.

Thème

- Le vivant et son évolution.

Programme

- Établir des relations de causalité entre différents faits pour expliquer la biodiversité (diversité des espèces) ;
- Reproductions sexuée [...], rencontre des gamètes, milieux et modes de reproduction et de dissémination.

Compétences

- Pratiquer des démarches.

Prérequis

- Travail préalable des démarches.

PREMIER TEMPS DE TRAVAIL



A partir du corpus documentaire (documents 1, 2 et 3), relever les éléments correspondant aux différentes étapes de la démarche scientifique. Rédiger une phrase complète pour chaque élément relevé. Si des difficultés sont rencontrées, des aides sont à disposition, elles peuvent permettre de :

- rappeler les étapes de la démarche : aide 1 ;
- donner des indices pour la recherche de ces étapes dans le document : aide 2 ;
- proposer une présentation de ta réponse : aide 3.

Un délai de 35 minutes est imposé pour effectuer ce travail.

1

Les deux couleurs de l'Orchidée *Dactylorhiza sambuca*

Dactylorhiza sambuca est une orchidée qui présente une caractéristique très rare chez les plantes sauvages : la présence de deux couleurs de fleurs au sein d'une même population : pourpre et jaune. Mais dans les prairies, on observe toujours une couleur des fleurs (phénotype) majoritaire qui alterne avec l'autre dans le temps.

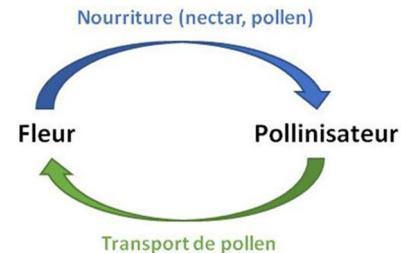
On cherche à comprendre l'origine des changements de phénotypes majoritaires dans les populations au cours du temps.



2

Interaction plante à fleur - pollinisateur

De nombreuses plantes ont recours à des animaux, souvent des insectes, pour assurer leur pollinisation. Pour ce, elles attirent le pollinisateur par un signal visuel ou olfactif. Le pollinisateur lui, associe le signal à la récompense obtenue : nectar ou pollen. Il visitera donc préférentiellement cette variété de fleur à l'avenir.



3 Vers une explication...

Cette Orchidée ne produit pas de nectar mais utilise quand même un pollinisateur, le bourdon.

Cela révèle un paradoxe qui amène les scientifiques à envisager que cette absence de nectar peut-être la cause de l'alternance de couleur des fleurs observée. Ils imaginent alors que les bourdons apprennent très vite que les fleurs ayant la couleur majoritaire dans la prairie ne contiennent pas de nectar. Les fleurs de couleur rare deviendraient plus attractives. Par conséquent, elles seraient plus visitées.

Ils conçoivent donc une l'expérience en créant des parcelles avec des plantes en pot, placées en milieu naturel selon le modèle suivant :



Parcelle n°1



Parcelle n°2

Parcelle n°1 : phénotype jaune majoritaire et phénotype pourpre rare.

Parcelle n°2 : phénotype pourpre majoritaire, phénotype jaune rare.

Ils comptent le nombre de graines obtenues par variété après pollinisation.

Ils s'attendent à ce que les graines des fleurs du phénotype rare deviennent plus nombreuses dans chaque parcelle au fur et à mesure du temps.

Tableau 1 : résultats obtenus pour la parcelle n°1

Phénotype	Nombre de graines produites l'année 1	Nombre de graines produites l'année 2
Pourpre	98	126
Jaune	87	65

Tableau 2 : résultats obtenus pour la parcelle n°2

Phénotype	Nombre de graines produites l'année 1	Nombre de graines produites l'année 2
Pourpre	98	76
Jaune	119	135

Il apparaît ici que le phénotype rare est celui qui produit le plus de graines la deuxième année d'expérience. Des résultats similaires ont été obtenus dans d'autres parcelles, contenant des proportions variables de chaque phénotype.

Les graines étant produites après la rencontre des gamètes mâles (contenus dans les grains de pollen déposés sur les fleurs par les bourdons) et femelles (contenus à l'intérieur des ovules) lors de la reproduction sexuée, il semble alors possible de valider le fait que les bourdons sont plus attirés par les phénotypes rares. Cette pollinisation originale par le bourdon peut donc être la cause de l'alternance de couleur des fleurs au cours du temps observée chez l'Orchidée *Dactylorhiza sambuca*.

Aide 1 – Les étapes de la démarche scientifique

- Le constat ou observation.
- Le problème soulevé.
- L'hypothèse à tester et sa conséquence vérifiable.
- Le protocole (le test ici n'est pas réalisé par vous).
- Les résultats attendus.
- La communication lisible des résultats.
- L'interprétation (explication) des résultats.
- La conclusion à la question (problème) posée.

**Aide 2 – Rechercher les étapes dans le document**

Un article de recherche présente généralement les différentes étapes de la démarche dans l'ordre de la recherche. Le début du compte-rendu correspond aux premiers temps d'observation et de questionnement, à la fin du compte-rendu qui donne la réponse. Ainsi, au cours de ta lecture, repère successivement :

Début du corpus documentaire

Milieu du corpus documentaire

Fin du corpus documentaire



- Qu'est-ce qui est recherché dans le corpus documentaire et ce qui a été à l'origine de cette recherche ?
- Qu'est-ce qui est proposé dans le corpus documentaire comme étant une solution possible à ce qui recherché et ce qui serait la conséquence de cette solution possible ?
- Qu'est-ce qui est proposé dans le corpus documentaire pour tester l'hypothèse et à que s'attend-t-on à trouver comme résultats ?
- Comment sont exprimés les résultats réellement obtenus et en quoi est-ce pertinent de les présenter ainsi ?
- Qu'est-ce qui est mis en lien avec les résultats pour valider ou invalider l'hypothèse proposée et quelle réponse est donnée à la question posée au départ posé ?

**Aide 3 - Organiser la réponse**

Afin de structurer ce qui est attendu, complète le tableau ci-dessous. Il te permettra de repérer les éléments du document correspondant aux différentes étapes d'une démarche scientifique.



Les étapes de la démarche scientifique	Je note les éléments du document qui correspondent à cette partie
1° étape : Un CONSTAT ou UNE OBSERVATION nous amène à...	
... LA FORMULATION D'UN PROBLÈME sous forme de question ou bien de ce que l'on « cherche à » montrer ou comprendre.	
2° étape : L'ÉLABORATION D'UNE HYPOTHÈSE (ou plusieurs) sous la forme d'une affirmation répondant au problème et...	
... LA RECHERCHE D'UNE CONSÉQUENCE VÉRIFIABLE pouvant être mise en évidence lors de l'expérimentation. Celle-ci peut être identifiée en exprimant la phrase : « si l'hypothèse est vraie alors la conséquence vérifiable est ... »	

SECOND TEMPS DE TRAVAIL



É changer à partir du poster proposé et des réponses faites pour :

- déterminer si vous avez identifié la totalité des éléments correspondant aux étapes de la démarche scientifique ;
- vous expliciter comment vous avez pu les identifier dans le document.

Rédiger un bilan qui permet de montrer que, dans le cas de reproduction sexuée chez l'Orchidée *Dactylorhiza sambuca*, le bourdon est un facteur de sélection de la couleur des fleurs.

Auto-positionnement sur ma maîtrise de la compétence « Pratiquer des démarches »

Avant échanges ou aide : j'avais repéré ce qui correspond au constat ou observation	Oui	Non
Après échange ou aide : qu'est-ce qui peut me permettre de repérer ces éléments ?		
Avant échanges ou aide : j'avais repéré ce qui correspond au problème soulevé	Oui	Non
Qu'est-ce qui peut me permettre de repérer ces éléments ?		
Avant échanges ou aide : j'avais repéré ce qui correspond à l'hypothèse à tester	Oui	Non
Qu'est-ce qui peut me permettre de repérer ces éléments ?		
Toutes les étapes de la démarche ne sont pas présentes. Cela est fait exprès pour que chacun puisse élaborer sa propre grille d'auto-évaluation...		

- **J'ai réussi sans aide** : mon autonomie dans la réflexion et dans la réalisation du travail à accomplir est acquise.
- **J'ai réussi avec l'aide de 1** : pour accéder à l'autonomie, je dois me souvenir des différentes étapes d'une démarche, par contre, je sais retrouver ces étapes dans un document. Comment faire pour réussir ? Je peux m'entraîner à les réécrire sans les avoir sous les yeux jusqu'à ce que ma liste soit complète, je peux aussi les réciter à haute voix en m'enregistrant et me réécoulant pour vérifier si ma liste est complète.
- **J'ai réussi avec l'aide 2** : je connais les étapes de la démarche, j'ai des difficultés à les identifier. Comment faire pour réussir ? Refaire cet exercice en me rappelant de la structure d'une présentation d'une recherche, de sa chronologie et en recherchant des mots clé indices de l'étape : « on se demande si », « on cherche à montrer que » sont indices de la question à résoudre ou de l'hypothèse posée ; « on va faire » ou toute description de ce qui est fait montre l'étape du protocole... puis chercher dans d'autres exemples (de mon livre) si j'arrive à retrouver ces éléments.
- **J'ai réussi avec l'aide 3** : j'ai besoin d'apprendre à m'organiser mais je suis capable d'y arriver. Comment faire pour réussir ? Une proposition pour t'organiser... Avant de foncer dans le document, je prends un peu de temps pour la question : qu'est-ce qu'on demande ? De retrouver les étapes de la démarche. Quelles sont ces étapes ? Je les écris en liste sur un papier en laissant un peu de place en face, ou comme montré dans l'aide, je les place en colonne dans un tableau. Je commence maintenant la lecture du document, doucement, en cherchant chaque étape, dès que je l'ai trouvée, je la note en face de son nom.

DES ORCHIDÉES TROMPEUSES

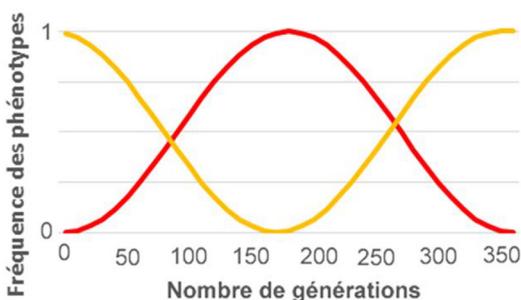
Document de référence

Lors de recherches sur internet, un élève découvre qu'en milieu naturel, au sein d'une population d'une même espèce de plantes à fleurs, les individus présentent généralement une seule couleur de fleur. Néanmoins, chez l'orchidée *Dactylorhiza sambuca* on trouve systématiquement deux phénotypes colorés au sein des mêmes populations : certains individus présentent une corolle pourpre, et d'autres présentent une corolle jaune.



Les deux phénotypes colorés de *Dactylorhiza sambuca*. Chaque inflorescence contient une dizaine de fleurs.

Il découvre également que cette observation serait le résultat d'une évolution par sélection dite fréquence-dépendante : mécanisme d'évolution selon lequel l'aptitude d'un type varie en fonction de sa fréquence dans la population. La sélection fréquence-dépendante peut être positive ou négative et favoriser alors les alternativement phénotypes rares ou abondants à un temps t. Ainsi, la fréquence des deux phénotypes fluctuerait dans le temps, selon le modèle prévisionnel suivant.



Prédiction des fluctuations de fréquences des phénotypes pourpres (courbe rouge) et jaunes (courbe jaune) au sein des populations de *Dactylorhiza sambucina*

L'élève se questionne alors sur la pollinisation de cette plante, dont il a aussi lu qu'elle était assurée par un bourdon : **comment ce mode de pollinisation permet-il les modifications de fréquence des deux phénotypes et à leur alternance dans le temps au sein des populations ?**

Programme

- De la plante sauvage à la plante domestiquée : la fécondation croisée implique une mobilité des grains de pollen d'une plante à une autre. Dans une majorité de cas, la pollinisation repose sur une collaboration entre plante et pollinisateur en relation avec la structure florale [...].

Compétences

- Comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique.
- Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents à des fins de connaissance.
- Discerner, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux.

Prérequis

- Mécanismes favorisant la diversification du monde vivant.
- La pollinisation repose sur une collaboration entre plante et pollinisateur en relation avec la structure florale.

Objectifs

- Réexploiter des savoirs et savoir-faire afin de montrer que la sélection naturelle n'est pas seulement unidirectionnelle, mais peut aboutir au maintien des phénotypes originaux.
- Présenter les implications de cette sélection sur la pollinisation des Angiospermes.



À l'aide des connaissances et des informations issues des documents, mettre en évidence que les relations existant entre *Dactylorhiza sambuca* et le bourdon peuvent avoir pour implication évolutive des fluctuations de fréquences des phénotypes pourpres et jaunes au sein des populations de cette orchidée telles que le modèle prédictif les envisage.

1 La pollinisation de l'orchidée

Comme de nombreuses autres plantes à fleurs, organismes fixés, les orchidées sont dépendantes de polliniseurs, en majorité des insectes, pour leur reproduction sexuée. Ces polliniseurs visitent généralement les fleurs à la recherche de nourriture (pollen et/ou nectar). Ce faisant, ils transportent du pollen, qui est déposé sur le pistil des fleurs visitées par la suite, assurant ainsi la fécondation et la production de graines.

Chez les Orchidées, le pollen est agglutiné en pollinie, non consommable par les insectes et beaucoup d'entre elles ne sécrètent pas de nectar. C'est le cas de *Dactylorhiza sambuca*, qui est principalement pollinisée par quelques espèces de bourdons.

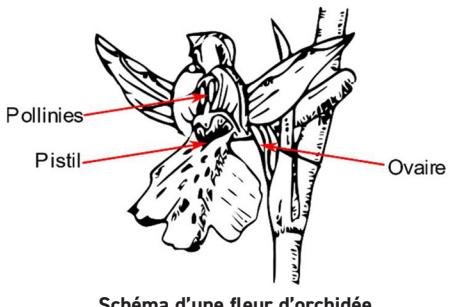


Schéma d'une fleur d'orchidée

2 Apprentissage chez les polliniseurs

Les bourdons sont capables de différencier différentes couleurs dont le pourpre et le jaune. Ils sont par ailleurs capables, comme de nombreux insectes, de modifier leur comportement en fonction de leur expérience. Au bout de plusieurs visites sur un type de fleurs ne produisant aucune ressource nutritive, les insectes reconnaissent la fleur, l'évitent puis vont visiter d'autres types de fleurs. Plus un phénotype est fréquent dans l'environnement, plus l'apprentissage vis-à-vis de ce phénotype est rapide.

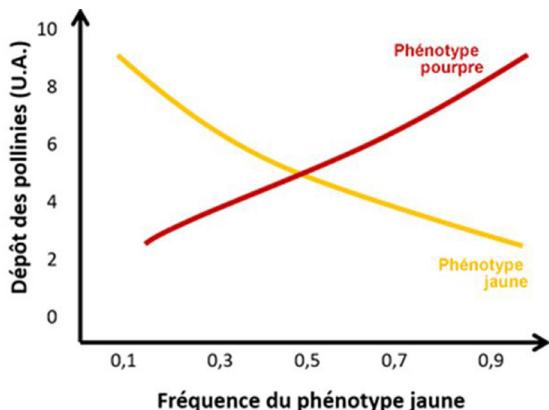
3 Variation du succès de pollinisation

Afin de comprendre comment les deux phénotypes sont pollinisés dans les différentes populations, des chercheurs ont créé 5 lots de plantes, dont la fréquence de chacun des phénotypes colorés varie (par exemple, dans le premier lot, il y a 10% de phénotypes jaunes et 90% de pourpres). Ils mesurent, pour les deux phénotypes, dans chaque lot :

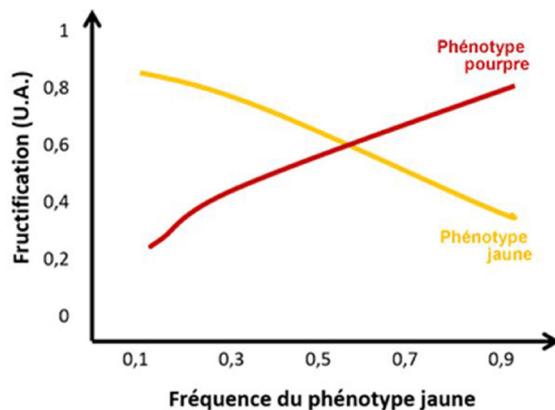
- le nombre de pollinies déposées sur les stigmates ;
- la proportion de fleurs fécondées se transformant en fruits et contenant des graines.



Bourdon visitant une fleur



Nombre de pollinies déposées sur le pistil des phénotypes jaunes et pourpres, en fonction de la fréquence du phénotype jaune dans le lot expérimental.



Proportion de fleurs se développant en fruit sur les phénotypes jaunes et pourpres, en fonction de la fréquence du phénotype jaune dans le lot expérimental.

Phénotype	Génération n			Génération n + 1			Génération n + 2
	Effectifs	Nombre de graines produites par plante	Taux de germination (%)	Effectifs	Nombre de graines produites par plante	Taux de germination (%)	Effectifs
Pourpre	90	98	1	88	97	1	85
Jaune	10	119	1	12	125	1	15

Effectifs au stade adulte et graines des deux phénotypes dans une population d'orchidées pendant trois générations successives

Éléments de réponse

Dactylorhiza sambuca présente au sein d'une même population deux phénotypes de couleur de fleur (pourpre et jaune), fait rare chez une espèce sauvage. Au cours du temps on prédit qu'il existe une oscillation des fréquences, chacun des phénotypes pouvant être tour à tour majoritaire ou minoritaire dans la population. Aucun d'eux ne disparaît.

On cherche déterminer si la coexistence des deux phénotypes colorés de *Dactylorhiza sambuca* et leur évolution fluctuante dans le temps au sein d'une même population – telle que décrite dans le modèle prédictif – peut être liée au mode de pollinisation de cette plante par le bourdon.

Saisies d'informations

Document 1

- Absence de récompense (nectar, pollen) chez la fleur, or il y a une pollinisation par des bourdons.

Document 2

- Le bourdon naïf peut apprendre à reconnaître une fleur qui ne donne pas de récompense et l'éviter. Cet apprentissage est ralenti lorsque la fréquence de la plante est faible.

Document 3

- L'expérience montre que dans une population majoritairement composée de fleurs pourpres, le dépôt de pollinies est plus important sur les fleurs jaunes et inversement. De la même manière, la fructification est plus importante chez le phénotype rare.
- Le comptage de graines par plante sur deux générations montre que le phénotype rare augmente progressivement sa descendance et donc sa fréquence dans la population.

Mises en relation

- Les bourdons visitant une orchidée apprennent que celle-ci n'offre aucune récompense. Pour le phénotype le plus nombreux, la probabilité de visiter une fleur de cette couleur majoritaire est plus grande. En outre, les bourdons sont capables de différencier les deux phénotypes de couleur. Cela favoriserait l'association "couleur" et "tromperie".
- On peut faire l'hypothèse que dans une population d'orchidée avec un phénotype majoritaire et un phénotype rare, les bourdons se détournent plus rapidement des fleurs dont la couleur est majoritaire et que les fleurs du phénotype rare seront plus visitées par des bourdons naïfs et ainsi fécondées. Dès lors le phénotype plus rare est favorisé, il va donc produire plus de graines, avoir une descendance plus importante et voir sa fréquence augmenter dans la population. C'est une sélection naturelle.
- Génération après génération, les fréquences vont s'inverser. Le phénotype majoritaire va devenir rare et sera, à son tour, favorisé, permettant la mise en place d'une alternance du phénotype dominant telle que prédictive par le modèle.

Synthèse

Les relations existant entre *Dactylorhiza sambucina* et le bourdon, peuvent avoir pour conséquence évolutive des fluctuations de fréquences des phénotypes pourpres et jaunes au sein des populations de *Dactylorhiza sambucina* telles que le modèle prédictif les envisage. Ce mécanisme est une forme particulière de la sélection naturelle, on parle de sélection fréquence-dépendante.

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

[http://ent-apbg.org/evolution_action/orchidee/
POSTER_orchidee.pdf](http://ent-apbg.org/evolution_action/orchidee/POSTER_orchidee.pdf)



Accès aux documents

[http://ent-apbg.org/evolution_action/orchidee/docs_
orchidee.zip](http://ent-apbg.org/evolution_action/orchidee/docs_orchidee.zip)



Tout pour la biologie moléculaire

Nouveau programme Lycées : Sciences de la Vie

Catalogue produits 2021



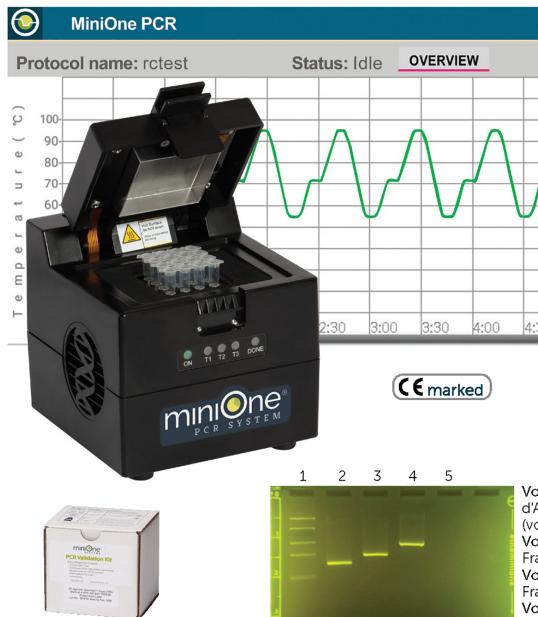
Système PCR MiniOne® M4000-EU

Enseigner et faire des TP PCR en 45 minutes !

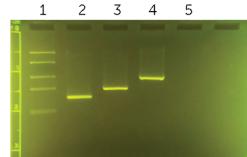
980 €

Thermocycleur PCR rapide commandé sur un appareil mobile Bluetooth® LE (voir page 22). Amplifiez l'ADN en moins de 45 min.

- Un thermocycleur MiniOne pour la PCR avec 16 puits d'échantillons
- Une alimentation électrique de 12V, 100W, 100-240 VAC
- Un kit de validation GRATUIT
- Plage de température de 4°C à 99°C
- Possibilité de faire une pause pour évaluer l'amplification



Le kit de validation fournit suffisamment de réactifs pour deux cycles de PCR, chacun amplifiant deux fragments de taille différente, puis visualisant les résultats avec l'électrophorèse MiniOne®.



Exemple de résultats du kit de validation du système PCR ~ 20 min. d'amplification et ~ 20 min. de migration



Kits Electrophorèse

Kit ADN entier : Empreinte et diagnostic génétiques

Kit ADN hydrolysés pour les empreintes génétiques

Kit ADN hydrolysés pour le diagnostic de pathologie génétique

Kit Empreintes pour électrophorèse : Phylogénie moléculaire et évolution

Kit Empreintes pour électrophorèse : Génome des plantes cultivées et biodiversité



Kits PCR

Kit : Amplification à partir du génome du phage lambda

Kit d'analyse du nombre de cycles par PCR



Système d'électrophorèse MiniOne® M1000-EU

399 €

Système d'électrophorèse intégré en temps réel pour des TP simples et rapides.



Ce catalogue a été développé par l'équipe de l'École de l'ADN en partenariat avec l'APBG, dans le but d'aider les élèves à comprendre les concepts de la biologie moléculaire et à acquérir une expérience pratique de l'expérimentation en biologie et en biotechnologie.

Les matériels et produits présentés dans ce catalogue ont été testés et validés par l'école de l'ADN. Des lycées de la région Occitanie, Bretagne, Poitou-Charentes, Rhône-Alpes et PACA ont utilisé les équipements MiniOne au cours de travaux pratiques en 2019-2020. L'ensemble des retours nous confirme la rapidité, la facilité d'utilisation et surtout l'intérêt pédagogique pour s'insérer facilement dans les nouveaux programmes de SVT.



<https://www.youtube.com/watch?v=GoGzH5rPVcU>

Retrouvez tous nos produits dans le catalogue complet

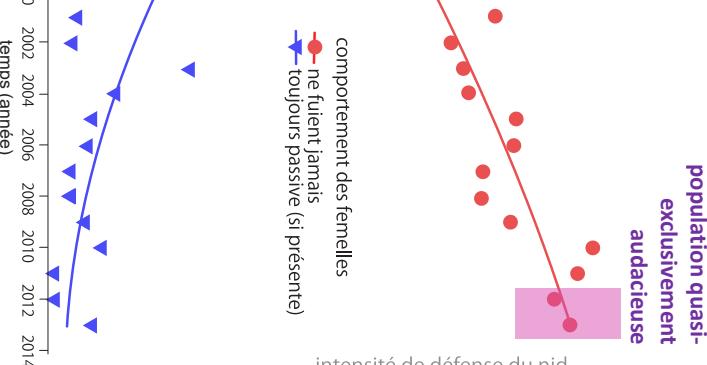
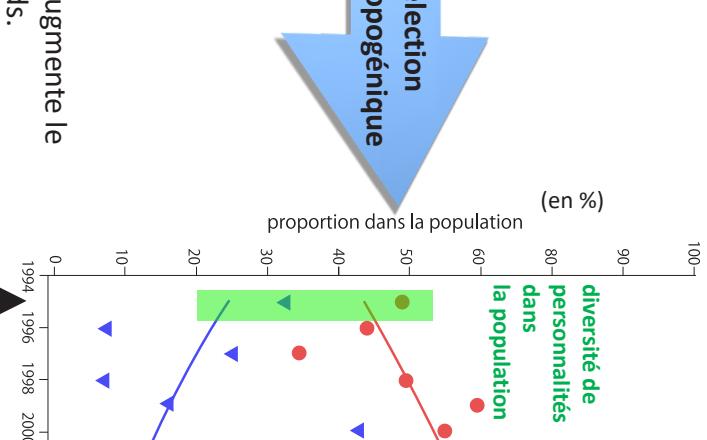
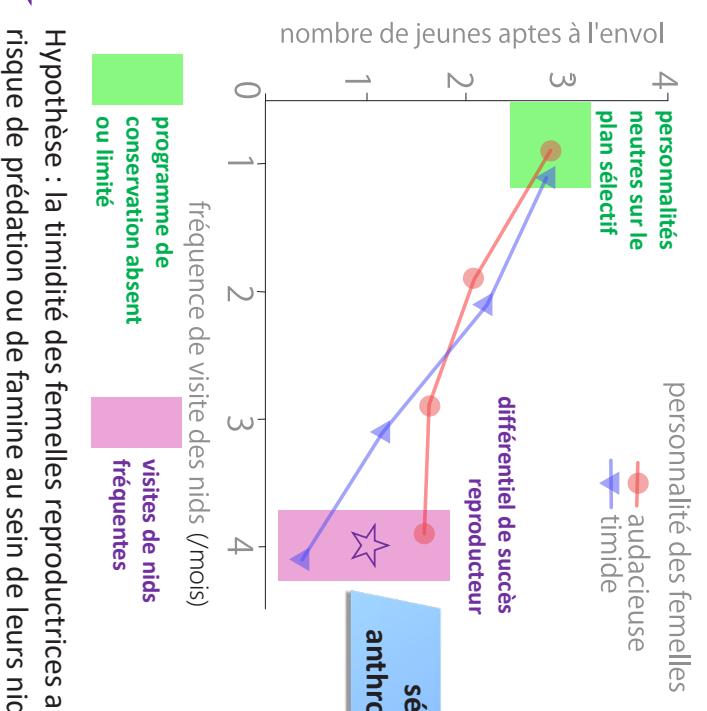
<https://www.apbg.org/wp-content/uploads/2021/08/2021-07-CAT-11-0621-APBG-MiniOne-APBG-V2.pdf>





SELECTION & CONSERVATION : ÉVOLUTION COMPORTEMENTALE DU BUSARD CENDRÉ, *CIRCUS* *PYGARGUS*

Figure 1 : Les visites ont des conséquences variables sur le succès reproducteur en fonction de la personnalité des femelles



Note : la tendance temporelle est statistiquement significative, y compris en intégrant la variabilité contextuelle : abondance en proies, rang et fréquence des visites, présence du mâle, stade de la nichée.

Une personnalité audacieuse est avantagée en terme de succès reproducteur dans un contexte où les visites sont fréquentes.

Conclusion

Le contact répété des Busards cendrés avec les humains dans un contexte de conservation modifie le succès reproducteur des diverses personnalités initialement présentes dans la population (Figure 1).

Le différentiel de succès reproducteur en faveur des comportements les plus audacieux induit une sélection directionnelle vers la tolérance de la présence humaine voire une agressivité des femelles vis-à-vis de l'espèce humaine (Figure 2).

L'homogénéisation rapide de la composition phénotypique de la population, en termes de personnalités (Figure 2), qui en résulte est préjudiciable au maintien des populations de busards cendrés dans leur habitat naturel.

Cette étude met en évidence les conséquences évolutives immédiates des programmes de conservation tout en portant l'attention sur un effet collatéral de ces derniers, antagoniste au long terme.

Figure 2 : Homogénéisation des personnalités au cours du temps

Sélection & conservation :

évolution comportementale du Busard cendré *Circus pygargus*

D'après l'article « Individual variation in behavioural responsiveness to humans leads to differences in breeding success and long-term population phenotypic changes » Arroyo et al., Ecology Letters, 20:317-325 (2017)

M. T. Sofonea¹, B. Gastre², M. Gavanon², C. M'Beguie², F. Kalfoun², A. Pasquale²

1. MNEGEC, IRD, CNRS, UM

2. Lycée Mermoz, Montpellier

Introduction

Le Busard cendré est un rapace qui a l'habitude de nicher dans les champs de céréales. Ses nichées étant particulièrement vulnérables au moment de la moisson, cette espèce protégée a fait l'objet d'un programme de suivi régulier de ses nids. Au cours des générations, les femelles reproductrices craignent de moins en moins la présence humaine.

L'intervention humaine dans un but de conservation peut-elle constituer une pression de sélection comportementale ?

Méthodologie



Nichée au sol

Diversité des comportements des femelles lors des visites humaines de leurs nids

Nichée au sol

- L'étude en chiffres :**
- 19 ans soit 4 à 5 générations ;
 - 2402 visites de 83 nids ;
 - 70 couples de busards par an.

- Variables mesurées :**
- 8 traits comportementaux des femelles reproductrices ;
 - 5 données contextuelles des visites ;
 - 3 descripteurs de la niche.



Femelle survolant son nid au cours d'une visite

Personnalité : ensemble des comportements exprimés en réponse à un même stimulus, de manière consistante pour un individu mais éventuellement variable d'un individu à l'autre.

Fuite
(envol)

Présence passive
(autour du nid sans alarme ni attaque)

Défense
(encerclément du visiteur)

Intensité de la défense
- hauteur d'approche indirecte
- taux d'alarme
- taux d'attaque

Timide

Personnalité de la femelle déduite du comportement

Audacieuse

Résultats

DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Accès à la ressource scientifique.
- Compréhension scientifique de l'article.
- Adaptation de l'article à notre sujet d'étude : la sélection naturelle.
- Choix des illustrations et adaptation à une utilisation pédagogique.

Étape 1 - Accès à la ressource scientifique

L'accès à des articles récents de revues scientifiques internationales se fait souvent sur abonnement onéreux ou achat d'article sans pouvoir en estimer préalablement le contenu.

La compréhension de l'article (anglais) a nécessité la traduction de certains mots techniques. Cependant, il ne faut pas envisager une traduction complète de l'article qui mène à de sérieux contre-sens.

Étape 2 - Compréhension scientifique de l'article

L'étude statistique et les modèles utilisés requièrent un niveau en mathématiques que nous ne possédions pas et donc ne nous aurait pas permis de comprendre réellement le traitement mathématique des données brutes sans l'aide d'un chercheur.

La distinction entre « comportements » et « personnalité » nous a questionnées :

- la définition de la personnalité ne se trouve pas dans l'article. Elle est à différencier du comportement. Nous avons donc eu recours au chercheur qui nous a accompagnées dans ce travail pour mieux comprendre cette notion ;
- certains graphiques présentent les personnalités (timide-audacieux) alors que sur d'autres se trouvent uniquement les comportements (fuite/passivité). Un contact avec l'auteur de l'article aurait pu nous permettre de comprendre ces choix.

La distinction de la part de la plasticité, de la dispersion et de la sélection dans les changements observés est délicate :

- le trait caractère étudié (la personnalité) peut être le résultat d'une plasticité mais la répétition du comportement suggère que la plasticité n'est pas

déterminante pour expliquer l'évolution de la personnalité au niveau de la population ;

- d'autres études (données non publiées) ont montré qu'après un échec reproductif sur un site, 30% des femelles reproductrices nidifient l'année suivante à plus de 20 km de ce premier site, soit en dehors de la zone d'observation qui a été choisie pour le suivi de populations de cet article. Il est donc possible que les femelles timides se soient simplement éloignées de la zone d'observation et donc que le changement phénotypique de la population observé d'une année sur l'autre ne soit que local. Néanmoins comme le programme de protection des nids a lieu sur l'aire de répartition de la population, on peut penser que la pression de sélection (visite des nids par la LPO, le passage des agriculteurs) s'opère sur tout le territoire. Si la dispersion hors de la zone d'observation était la seule cause de l'augmentation du phénotype audacieux alors les femelles nouvelles arrivantes sur l'aire d'observation seraient exclusivement timides. Or ce n'est pas ce qui est observé, le phénotype audacieux étant de plus en plus présent.

Étape 3 - Adaptation de l'article à notre sujet d'étude : la sélection naturelle

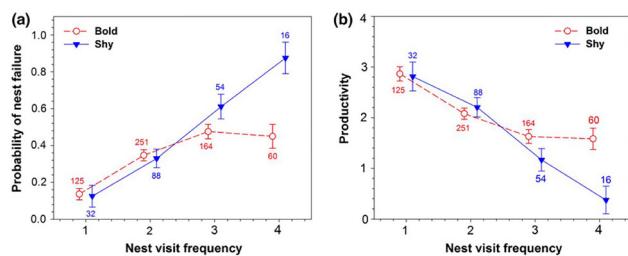
Nous avons aussi dû réorienter la problématique dégagée par l'article : celui-ci est focalisé sur la conservation d'une espèce, le

busard cendré, alors que alors que ce programme de conservation génère une pression de sélection que nous avons souhaité mettre en avant.

Étape 4 – Choix des illustrations et adaptation à une utilisation pédagogique

Déterminer les graphiques les plus démonstratifs et explicites.

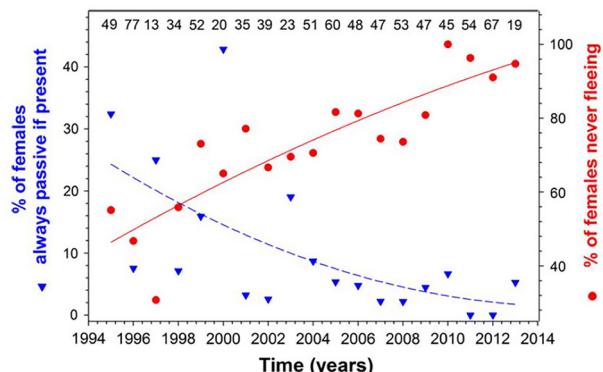
Nous avons hésité entre la figure a (probabilité d'échec de la couvée en fonction de la fréquence des visites des nids) et la figure b (nombre de jeunes aptes à l'envol en fonction de la fréquence des visites des nids).



La compréhension du graphique 3b était plus intuitive pour mesurer le succès reproducteur d'un phénotype ; c'est donc celui qui a été retenu.

Modifier des graphiques.

La figure 2 représente avec 2 échelles différentes l'évolution du pourcentage de femelles passives lorsqu'elles sont présentes et celle de femelles qui ne fuient jamais en fonction du temps.



Dans la figure 2 du poster, didactisée, nous n'avons utilisé qu'une seule échelle pour rendre les résultats

plus lisibles et plus abordables pour les élèves.

Garder ou non les barres d'erreurs ?

- Avantage : montrer la variabilité des données et l'importance des données statistiques.
- Inconvénient : difficulté pour les élèves de comprendre l'outil mathématique (écart standard).

Nous avons laissé les barres d'erreurs dans un souci scientifique, n'étant pas indispensables à la compréhension du graphique, leur exploitation en lycée dépendra des objectifs poursuivis.

Garder ou non les points de mesure en plus de la courbe de tendance ?

- Avantage : montrer la variabilité des données et l'importance des données statistiques.
- Inconvénient : difficultés pour les élèves de comprendre l'outil mathématiques (régression linéaire).

Nous avons laissé les points de mesure dans un souci de rigueur scientifique : c'est ce qui est mesuré !

Garder ou non l'ensemble des paramètres mesurés ?

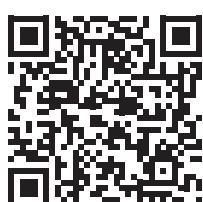
De nombreux paramètres ont été mesurés lors de chaque visite : absence/présence du mâle, fréquence des visites, taille de la couvée, nombre de visites déjà effectuées, abondance alimentaire – campagnols – stade de nidification. Ces différents paramètres ont été testés statistiquement et semblent moins déterminants que la personnalité des femelles sur l'évolution phénotypique de la population.

Nous avons décidé de ne pas tous les détailler pour faciliter la compréhension par les lycéens et faire apparaître l'effet majeur, en restants conscient du risque de « tri sélectif des données »...

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/busard/POSTER_busard.pdf



Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/busard/docs_busard.zip



EXEMPLE D'ACTIVITÉ COLLÈGE - LYCÉE

TÂCHE COMPLEXE

LE BUSARD CENDRÉ, *CIRCUS PYGARGUS*, UNE ESPÈCE MENACÉE

Mise en situation

Le Busard cendré est le plus petit des quatre busards européens. C'est un oiseau migrateur. On le rencontre essentiellement dans les champs de céréales où il trouve des conditions favorables à la nidification et à la chasse.

L'espèce est en nette régression ces dernières années. Face à ce constat de baisse des effectifs, une stratégie de conservation du Busard cendré a été mise en place sur les terres agricoles où des nids ont été repérés.

Consigne (Cycle 4 - Seconde)

 **E**n tant que chargé de mission au sein d'une association de protection de la faune, faire un bilan argumenté des effets de l'intervention humaine sur la diversité au sein de la population de Busards cendrés.

Consigne (Terminale)

 **E**n vous appuyant sur les documents fournis, expliquer comment l'action humaine visant au maintien de la biodiversité peut conduire à sa modification.

Note : sauf mention particulière, les documents suivants sont à exploiter pour les différents niveaux de classe

1 Témoignage de Maryse Ducocq, bénévole à la LPO Lorraine

« Comme beaucoup de rapaces, le Busard cendré* a longtemps été victime des activités humaines. Malgré sa protection par la loi à la fin des années 70, certains chasseurs réclament toujours qu'il soit chassable sous prétexte qu'il serait à l'origine de la disparition de la perdrix dans bien des régions de plaine.

En réalité, la disparition de cette dernière est uniquement due à l'agriculture intensive qui détruit les haies et les couverts où elle pouvait nicher et qui empoisonne les insectes et les graines qui forment l'essentiel de sa nourriture. De plus, les exploitants méconnaissent cette espèce (busard) qui pourtant consomme bon nombre de rongeurs nuisibles des cultures.

Depuis les années 1970, le Busard cendré est artificiellement maintenu en vie dans bien des endroits de France par une foule de bénévoles de diverses associations de protection de la nature. Entre 1984 et 2000, près du tiers des 21000 jeunes qui se sont envolés ont été sauvés grâce à l'intervention des bénévoles pendant les moissons.



Ces derniers se chargent de surveiller les nids situés dans des cultures et les repèrent en les entourant de piquets lorsque l'agriculteur débute la moisson. Sans cette intervention qui mobilise des milliers de personnes en France au début de l'été, le Busard cendré aurait bel et bien disparu de nombreuses régions, car là où les marais ont tous disparu, les cultures représentent l'unique site de substitution.»

* Le Busard cendré est considéré en France comme une espèce quasi menacée (classification internationale UICN, <https://uicn.fr/liste-rouge-mondiale/>), c'est-à-dire une espèce qui pourrait être menacée si des mesures de conservation spécifiques n'étaient pas prises.

Cycle 4 - Activité découverte

Éléments du programme

- Attendu de fin de cycle : identifier les principaux impacts de l'action humaine, bénéfices et risques, à la surface de la planète Terre.
- Connaissance et compétence associées : expliquer comment une activité humaine peut modifier l'organisation et le fonctionnement des écosystèmes en lien avec quelques questions environnementales globales.

Compétences

- Domaine 1 - Lire, interpréter, exploiter et mettre en relation des données présentées sous différentes formes - Communiquer sous différentes formes.
- Domaine 4 - Argumenter des choix en matière de développement durable.

Seconde - Activité de réinvestissement

Éléments du programme

- La biodiversité change au cours du temps.
- L'évolution de la biodiversité au cours du temps s'explique par des forces évolutives s'exerçant au niveau des populations.

Objectif

- Envisager les effets des pratiques humaines contemporaines sur la biodiversité comme un exemple d'interactions entre espèces dirigeant l'évolution de la biodiversité.

Enseignement de spécialité, terminale

Éléments du programme

- La connaissance et la gestion d'un écosystème permettent d'y préserver la biodiversité (Thème 3 : une histoire du vivant - La biodiversité et son évolution).

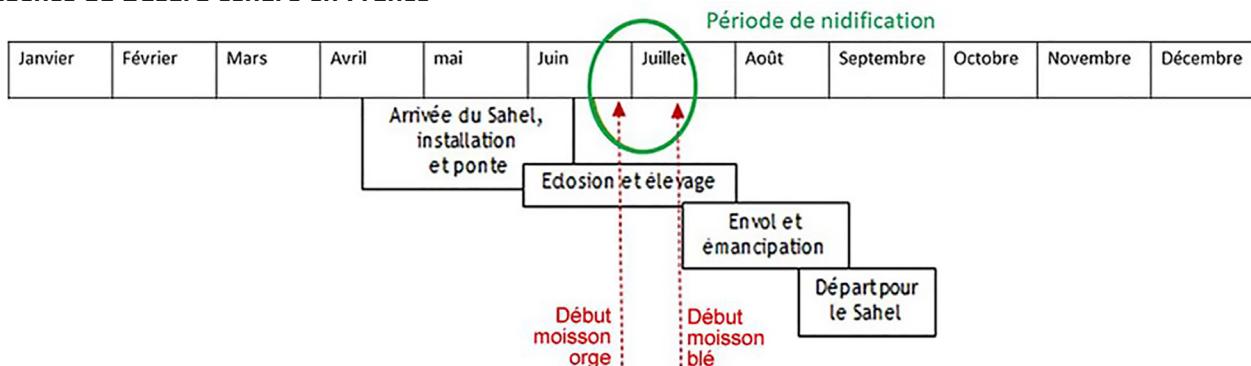
Objectifs

- Identifier des critères de gestion durable d'un écosystème.
- Envisager des solutions pour un environnement proche.

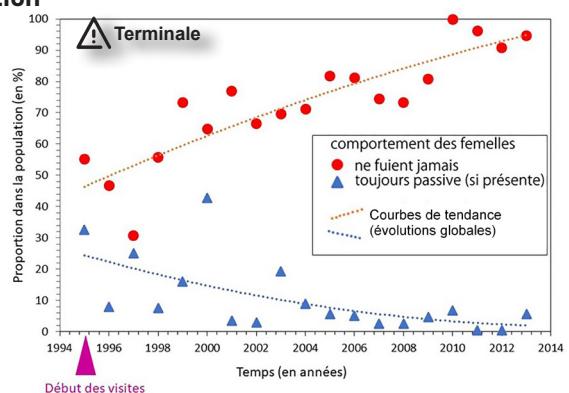
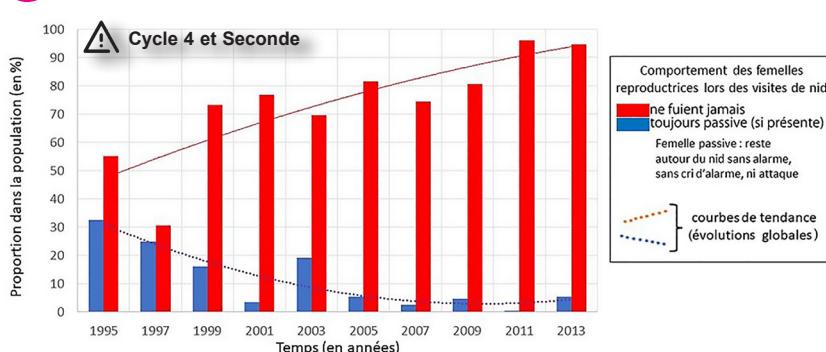
Compétences (tous niveau lycée)

- Pratiquer des démarches scientifiques : savoir distinguer, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux.
- Communiquer : communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant.

2 Présence du Busard cendré en France



3 Comportement des femelles reproductrices et visites de protection



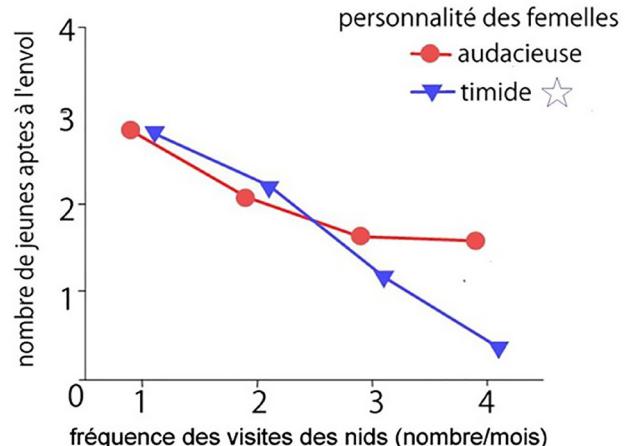
4 Impact des visites sur le succès reproducteur des femelles de Busard cendré

Le succès reproducteur est la capacité qu'a un individu à diffuser ses gènes. Cela se mesure par le nombre descendants qui pourront se reproduire à leur tour.



« Des comptages du nombre de jeunes aptes à l'envol pour chaque nid ont été effectués à la fois chez les femelles qui défendaient leur nid (dites audacieuses) et chez celles qui fuyaient le nid (dites timides) lors des visites. Les jeunes sont aptes au premier vol vers 30 jours. Ensuite, le nid ou ses abords restent le point d'attachement du jeune encore dépendant des parents de 25 à 30 jours. »

(<http://rapaces.lpo.fr/busards/les-busards>)



On estime que la timidité des femelles augmente le risque de préation ou de famine du nid.

5 Importance du maintien de la variabilité au sein d'une population



La diversité des comportements permet aux espèces de mieux s'adapter aux changements de l'environnement (fuite face aux prédateurs, changements climatiques, changements du lieu de nidation...) et constitue une richesse pour tous les êtres vivants.

JOURNÉES NATIONALES

DE FORMATION

Tous les mois de novembre, à Paris, l'APBG organise ses journées nationales de formation.

Les JN ce sont :

- des conférences scientifiques de haut niveau, toujours en lien avec l'actualité et les programmes, assurées par des intervenants à la pointe de la recherche fondamentale et appliquée ;
- des exposants, des éditeurs, des ressources pour vos établissements ;
- des moments privilégiés d'échanges, de rencontres dans un cadre unique avec des chercheurs, en liaison avec de grands organismes scientifiques (CNRS, Inserm, MNHN, Institut Pasteur, INRAE...), des universitaires, les grandes Institutions et Académies, des Associations scientifiques ainsi que des organismes de grands secteurs économiques ;
- des moments de convivialité, où nous, enseignants de SVT puissions se voir, échanger, tisser des liens d'amitiés et s'enrichir mutuellement de nos expériences.



JN 2021, LES 26, 27 ET 28 NOVEMBRE 2021

THÈME : "OBSERVER, MODÉLISER ET PRÉVOIR EN SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE"

RETROUVEZ LE PROGRAMME ET LES MODALITÉS D'INSCRIPTION SUR NOTRE SITE...



<http://www.apbg.org>



ÉVOLUTION RAPIDE D'UNE POPULATION DE LÉZARDS, *PODARCIS SICULA* ASSOCIÉE À UN CHANGEMENT DE RÉGIME ALIMENTAIRE

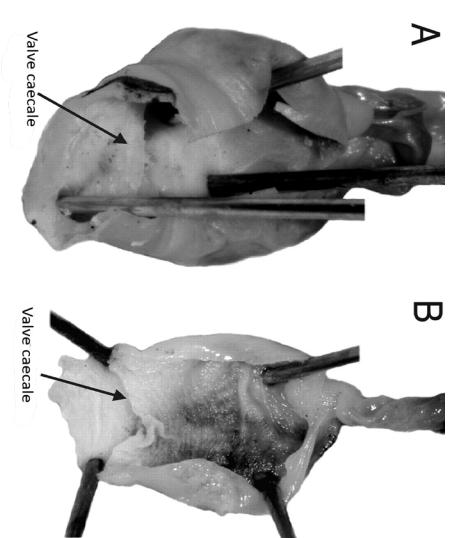
Le tube digestif

Présence de **valves cæcales** au niveau de l'intestin chez les lézards de l'île Pod Mrčaru (Figures 3 et 4).

Les valves cœcales ralentissent le passage des aliments et fournissent des chambres de fermentation permettant aux micro-organismes commensaux de convertir la cellulose en acides gras volatils (permettant d'optimiser la digestion).

Ces valves ne se retrouvent jamais au sein d'autres populations de *Podarcis sicula* mais sont similaires à celles retrouvées chez d'autres espèces de lézards herbivores.

Figure 3. Morphologie intestinale des lézards de l'île Pod Mrčaru



On note en moyenne chez les individus mâles (A), femelles (B) et juvéniles (C) de l'île Pod Mrăru un accroissement de la tête et de la puissance de morsure (Figure 2).

- Les barres d'erreurs indiquent l'écart type et les astérisques indiquent les différences significatives entre les populations.
- L'axe des ordonnée montre une échelle \log_{10} - transformée ajustée à la fois aux mesures de la taille de la tête et à la force de morsure.

Conclusion

Cette étude démontre l'**existence de changements morpho-anatomiques** très rapides d'une population insulaire de lézards par rapport à la population source en moins de 40 ans soit environ 30 générations.

Ces modifications se retrouvent chez les jeunes ce qui suggère un déterminisme génétique et non un changement plastique, au cours de la vie, de type acclimatation.

L'apparition conjointe de changements morpho-anatomiques et de modifications dans le régime alimentaire, plus herbivore, suggère l'existence d'une sélection naturelle (adaptation) plutôt que le résultat de la dérive génétique.

Evolution rapide d'une population de lézards associée à un changement de régime alimentaire

D'après l'article Herrel et al. « Rapid large-scale evolutionary divergence in morphology and performance associated with exploitation of a different dietary resource »
Proc. Natl. Acad. Sci. 105:4792-4795 (2008)

Benoit Nabholz¹, Joëlle Barrera², Eric Bosc², Patricia Uly², Elodie Teissier², Serge Sandragné²

¹. Institut des sciences de l'évolution, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE 2. Lycées Jules Fil & Paul Sabatier, Carcassonne

Introduction : un peu d'histoire contemporaine

En 1971, des chercheurs introduisent 5 couples de Lézards des ruines (*Podarcis sicula*) issus de l'île de Pod Kopište sur l'île voisine de Pod Mrčaru où cette espèce n'était pas présente.

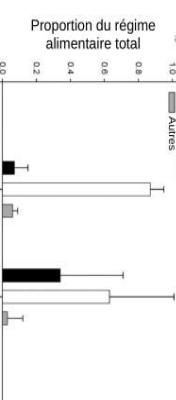
Puis, un conflit politique associé à l'éclatement de l'ex-Yougoslavie empêche le suivi scientifique de ces lézards introduits.

Ce n'est qu'en 2004 que d'autres chercheurs reviennent étudier les lézards de Pod Mrčaru.

Une phylogénie moléculaire basée sur l'ARNr mitochondrial confirme l'introduction récente de ces lézards sur Pod Mrčaru et leur proximité génétique avec ceux de Pod Kopište.

Changement de régime alimentaire

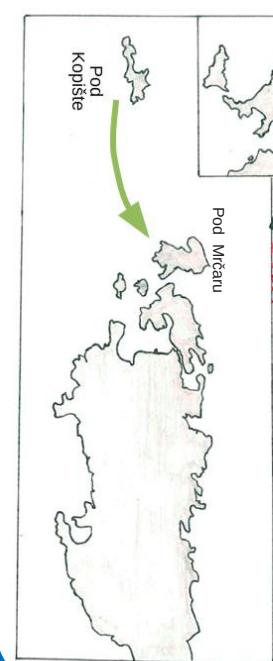
Figure 1. Comparaison des régimes alimentaires entre les deux populations de lézards au printemps (A) et en été (B)



Cela représente une innovation par rapport à la population ancestrale (source) qui est majoritairement insectivore comme, d'ailleurs, presque toutes les espèces du genre *Podarcis*.

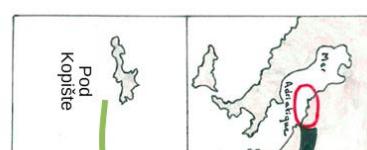
La tête et la force de morsure

Figure 2. Comparaison des dimensions de la tête et de la force de la morsure entre les deux populations de lézards

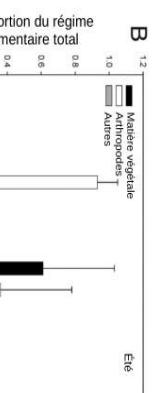


Localisation géographique des îles.
Zoom

Pour accéder à la phylogénie de *Podarcis*



portion du régime alimentaire total
portion du régime
mâles



La force de la morsure est exprimée en Newtons (N)

DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Appréhender un article scientifique.
- Travail sur l'iconographie.
- Travail sur les graphiques.
- Objectifs et points de vigilance.

Appréhender un article scientifique

- Cerner les objectifs théoriques de l'article.
- Relever les faits scientifiques étudiés et la méthode.
- Établir une relation de causalité entre les faits et expliquer les éléments révélés.
- Noter les obstacles pour les élèves et élaborer des stratégies pour les résoudre.

Travail sur l'iconographie

- Ajout de photographies montrant les organismes étudiés et leur environnement.
- Illustration des expériences et explicitation par des schémas.

Travail sur les graphiques

- Sélection et hiérarchisation des données importantes.
- Conservation des graphiques exploitables.
- Simplification des données complexes.

PROCESSUS DE DIDACTISATION

Objectifs et points de vigilance

- Simplifier sans dénaturer.
- Rester intelligible sans perdre en rigueur.

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/leizard/POSTER_leizard.pdf



Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/leizard/docs_leizard.zip



EXEMPLE D'ACTIVITÉ SECONDE

MÉCANISME ÉVOLUTIF À L'ORIGINE DES MODIFICATIONS OBSERVÉES CHEZ LES LÉZARDS



Realiser un tableau comparatif de présentation des deux lézards en prenant en compte leurs localisations, leurs régimes alimentaires, les dimensions de leurs têtes, la force de leurs morsures et la présence de valves caecales.

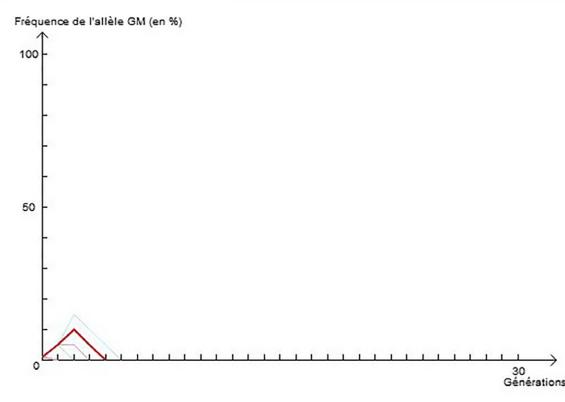
Objectif pédagogique : poser un constat

A partir du poster (sans la conclusion), les élèves doivent poser le constat des variations de forme et de régime alimentaire selon la localisation. Ils doivent pouvoir émettre des hypothèses sur les mécanismes ayant œuvré à la mise en place de ces modifications.



Apartir des résultats de simulations, déterminer le mécanisme évolutif qui semble le mieux correspondre à l'évolution constatée de la mâchoire des lézards sur l'île Pod Mrčaru en le justifiant.

1 Modélisation de la dérive génétique



Bilan (au bout de 100 générations) :

	Fréquence initiale	Fréquence finale
allèle GM	1%	0%
allèle PM	99%	100%

Effectif de la population n=10

L'allèle GM a disparu à la génération n°4.

Voir aussi : [Evolution allélique \(sélection naturelle\)](#)
[Modélisation de la dérive génétique par tirage avec remise](#)

Version HTML5/JS(Raphaël), Auteur : Philippe Cosentino

Objectif pédagogique: modéliser le mécanisme évolutif

On chercher à identifier le mécanisme évolutif à l'origine des modifications observées dans la population des lézards de Pod Mrčaru.

On considère le gène du développement qui détermine la taille de la mâchoire pour lequel existent les allèles : « Petite Mâchoire », noté « PM », et « Grande Mâchoire », noté « GM ».

Protocole

<https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/derive-genetique/>



1. Ouvrir le logiciel.

2. Compléter le nom des allèles et leur fréquence : l'allèle GM représente 1% de la population.



Réglages des paramètres :

Nom de l'allèle 1 =
Nom de l'allèle 2 =

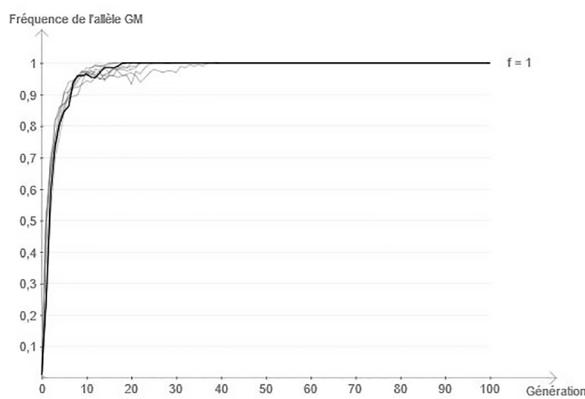
Fréquence initiale
de l'allèle GM = %

Effectif =

Nb de générations =

3. Lancer plusieurs simulations successives. Noter, pour chaque simulation, les résultats obtenus (fréquence finale de chacun des allèles).

2 Modélisation de la sélection naturelle



Remarque

On gagnera ici à mutualiser les résultats de l'ensemble des élèves du groupe classe pour donner une valeur statistique aux résultats obtenus. Le nombre de répétitions des simulations dépendra du temps disponible. Nous avons fixé notre quota à un minimum de 5.

Protocole

<https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/genepop/>



- Ouvrir le logiciel.
- Compléter le nom des allèles, la fréquence initiale de l'allèle GM et la valeur sélective des génotypes (comme indiqué ci-dessous. *Dans ce cas, un avantage sélectif est donné aux grandes mâchoires.*



Paramètres du modèle :

Effectif de la population (0 signifie infini) :	<input type="text" value="100"/>
Nom de l'allèle 1 :	<input type="text" value="GM"/>
Nom de l'allèle 2 :	<input type="text" value="PM"/>
Fréquence initiale de l'allèle 1 :	<input type="text" value="0,01"/>
Valeur sélective du génotype GM//GM :	<input type="text" value="1"/>
Valeur sélective du génotype GM//PM :	<input type="text" value="0,9"/>
Valeur sélective du génotype PM//PM :	<input type="text" value="0,01"/>
Fréquence mutation GM → PM :	<input type="text" value="0"/>
Fréquence mutation PM → GM :	<input type="text" value="0"/>

- Sur 100 générations, exécuter plusieurs simulations successives. Noter, pour chaque simulation, les résultats obtenus (fréquence finale de chacun des allèles).

ÉVOLUTION RAPIDE D'UNE POPULATION DE LÉZARDS ASSOCIÉE À UN CHANGEMENT DE RÉGIME ALIMENTAIRE

Partie 1 (travail maison) - Proposer un scénario évolutif

En 1971, des chercheurs capturent 5 couples d'une espèce de lézards *Podarcis sicula* sur l'île de Pod Kopište. Ils réalisent une implantation expérimentale de ces lézards, sur une île voisine, celle de Pod Mrčaru où l'espèce était jusqu'alors absente.

Un conflit politique associé à l'éclatement de l'ex-Yougoslavie empêche le suivi de ces lézards jusqu'en 2004, où les recherches sur l'introduction de *Podarcis sicula* sur Pod Mrčaru peuvent reprendre.

En moins de 40 ans (30 générations), les lézards *Podarcis sicula* de Pod Mrčaru se sont multipliés et présentent des différences morphologiques, physiologiques et sociales marquées par rapport à la population source de Pod Kopište.



Exploiter l'ensemble des documents afin de proposer un scénario expliquant l'évolution des lézards de l'île de Pod Mrčaru par sélection naturelle.

Éléments du programme

- L'inéluctable évolution des génomes au sein des populations - Les populations sont soumises à la sélection naturelle et à la dérive génétique. À cause de l'instabilité de l'environnement biotique et abiotique, une différenciation génétique se produit obligatoirement au cours du temps. Toutes les espèces apparaissent donc comme des ensembles hétérogènes de populations, évoluant continuellement dans le temps.

Acquis des classes antérieures

- Seconde - La biodiversité change au cours du temps (évolution observable sur de courtes échelles de temps) - L'évolution de la biodiversité au cours du temps s'explique par des forces évolutives s'exerçant au niveau des populations (dérive génétique et sélection naturelle).
- Première spécialité - Les écosystèmes : des interactions dynamiques entre les êtres vivants et entre eux et leur milieu.

Place dans la progression

- Cette proposition permet de consolider les acquis de sélection naturelle et de dynamique des populations en se situant à l'échelle des populations ; elle permet de réinterroger la notion d'espèce.

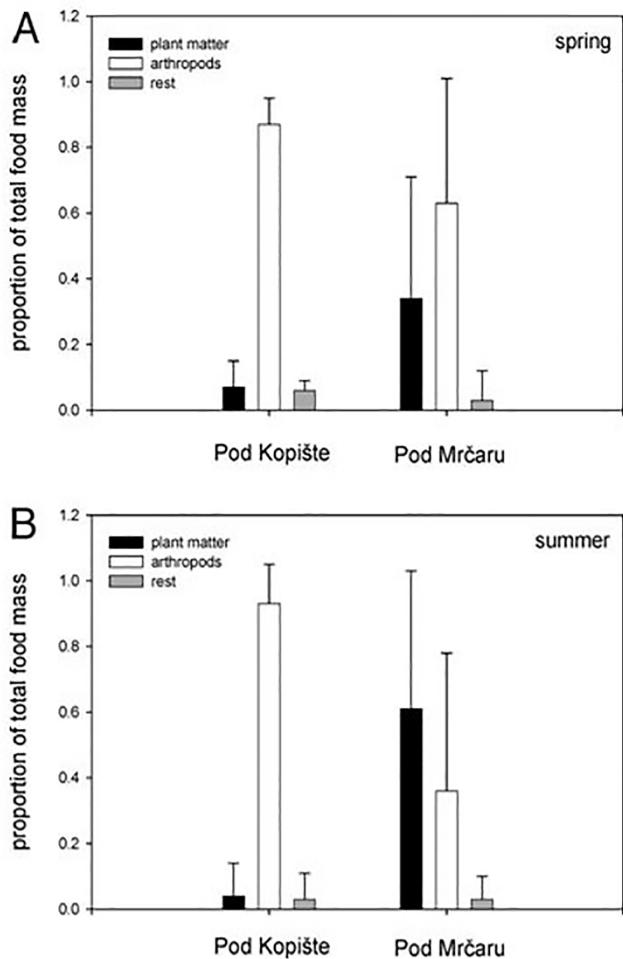
Compétences mises en œuvre

- Pratiquer des démarches scientifiques : comprendre le lien entre les phénomènes naturels et le langage mathématique.
- Concevoir, créer, réaliser : concevoir et mettre en œuvre un protocole.
- Utiliser des outils et mobiliser des méthodes pour apprendre : recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information.

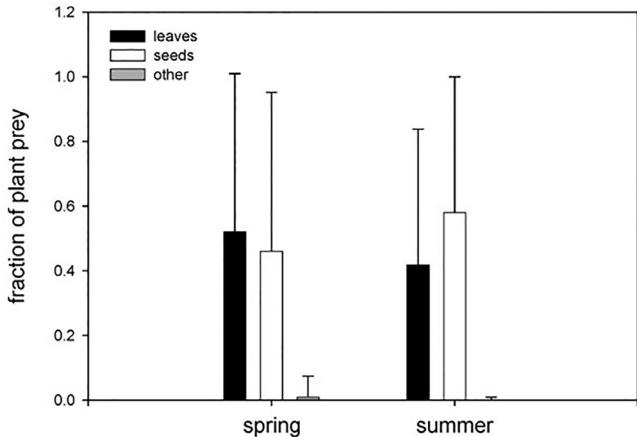
Contexte de l'activité

- Les activités pratiques proposées en complément de l'étude documentaires sont l'occasion de discuter des différents types de modèles (analogiques et numériques) avec les élèves et d'aborder la notion de preuve en sciences de l'évolution.

1 Les régimes alimentaires des Lézards sur Pod Kopište et Pod Mrčaru



Régime alimentaire des populations de lézards sur Pod Kopište et sur Pod Mrčaru, au printemps (A) et en été (B) ; données obtenues à partir de l'analyse du contenu stomacal.



Proportion des différentes parties des plantes consommées par les lézards de Pod Mrčaru au printemps et en été ; données obtenues à partir de l'analyse du contenu stomacal.

Vocabulaire

- *Plant matter : matière végétale*
- *Leaves : feuilles*
- *Seeds : graines*
- *Proportion of total food mass : proportion de masse alimentaire*
- *Fraction of plant prey : part des plantes consommées*

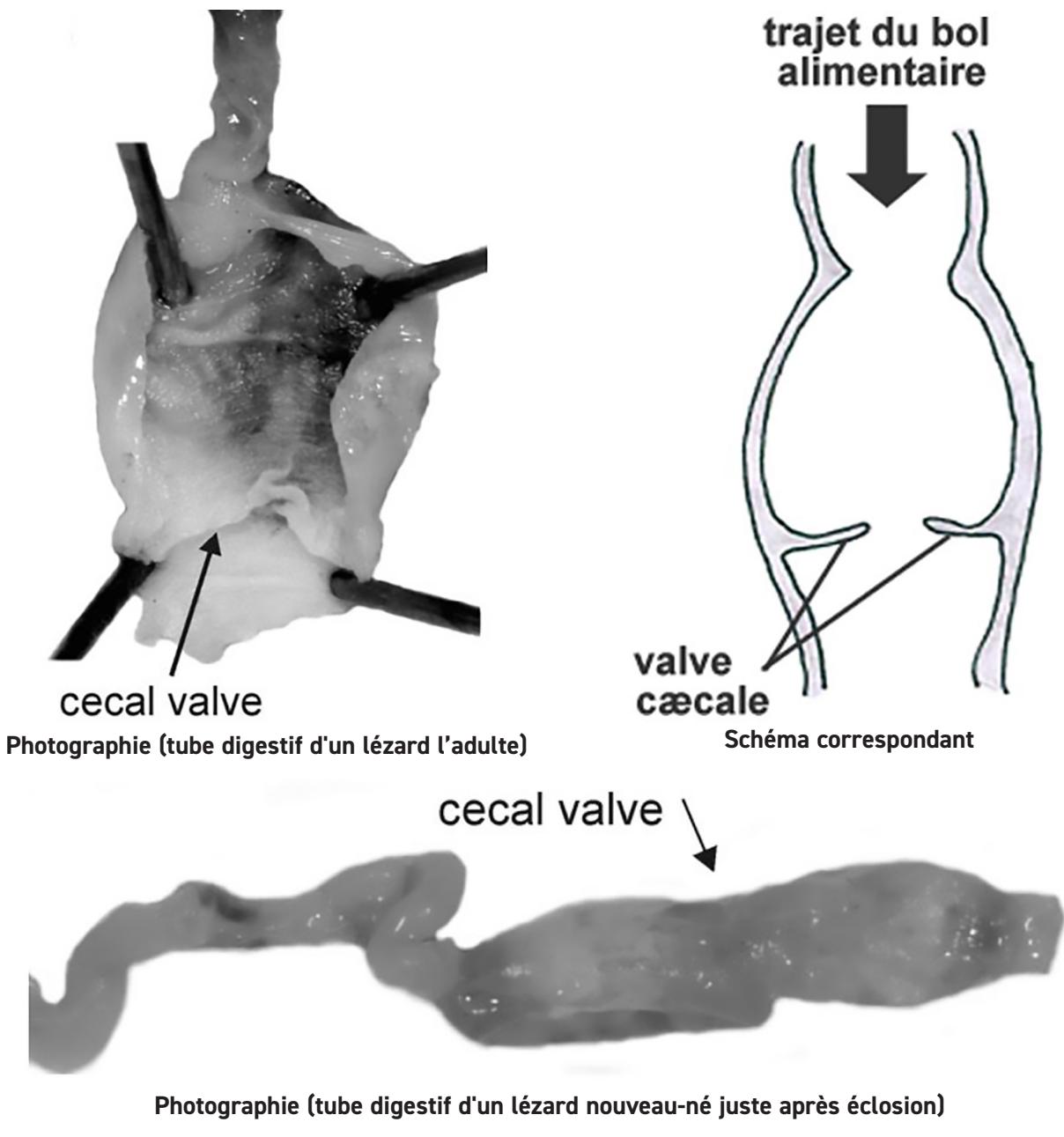
Les valeurs des axes des ordonnées ont été traitées par la fonction \log_{10} .

2 Anatomie du tube digestif

Les valves cœcales ralentissent le passage des aliments et fournissent des chambres de fermentation, permettant aux micro-organismes commensaux de convertir la cellulose en acides gras volatils. Elles sont retrouvées chez plusieurs espèces de lézards herbivores. Elles sont généralement absentes dans les populations de *Podarcis sicula*.

« Certains reptiles semblent réorganiser leur intestin après absorption de nourriture beaucoup plus rapidement que les oiseaux et les mammifères et cela en parfois quelques heures ou quelques jours. Chez le *Python birman*, par exemple, la masse de l'intestin grêle antérieur augmente de plus de 40 % en 6 heures, par rapport à la période de jeûne, au cours d'un repas copieux. (...) Ces changements proviennent essentiellement d'une intense prolifération de la couche muqueuse de l'intestin. On peut aussi observer des réorganisations cellulaires et macromoléculaires de l'intestin. »

Extrait de *Physiologie animale*. Roger Eckert. Edition Deboeck University.

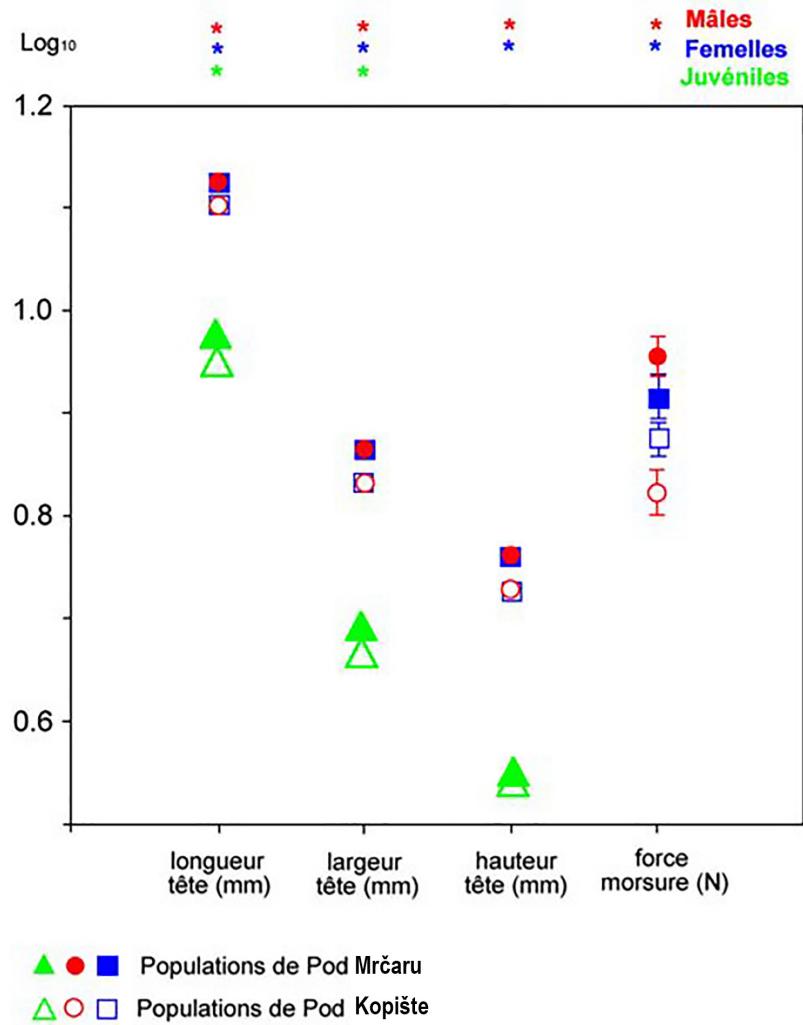


3 Différences entre adaptation et acclimatation

« L'acclimatation ou « plasticité phénotypique » est une modification phénotypique (morphologique, physiologique...) réversible des individus exposés à un changement environnemental. (...) C'est une réponse individuelle au changement environnemental. L'adaptation est le résultat de la sélection naturelle effectuant un tri sur un ensemble d'individus (une population) présentant des caractéristiques héréditaires (génétiques). Selon l'environnement rencontré, certaines caractéristiques vont permettre une meilleure survie et/ou reproduction des individus (traits adaptatifs) dans un environnement donné, et les gènes qui déterminent ces traits vont être sélectionnés d'une génération à l'autre. (...) C'est une réponse populationnelle au changement environnemental. Cette adaptation par tri sélectif des individus qui s'opère d'une génération à l'autre peut être relativement rapide lorsque les pressions de sélection sont fortes. »

D'après <https://www.encyclopedie-environnement.org/>

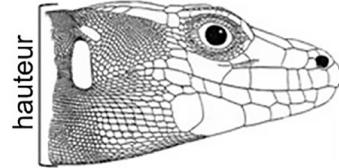
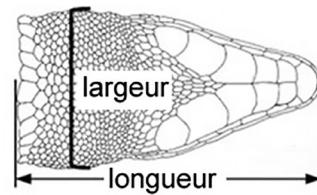
4 Morphologie de la tête



Sur le graphique ci-contre les astérisques (*) indiquent les différences jugées significatives entre les deux populations.

Les valeurs des axes des ordonnées ont été traitées par la fonction \log_{10} . La puissance de la morsure est exprimée en Newtons (N).

Mesures des distances linéaires de têtes de lézards



D'après Kaliotzopoulou et al. 2012 (haut) et Berns et Adams, 2010 (bas)

Exploitation attendue - Quelques éléments de correction

Document 1 – Le régime alimentaire des lézards de Pod Mrčaru s'est modifié par rapport à celui de Pod Kopište. Les lézards consomment plus de végétaux, particulièrement en été mais aussi au printemps. La fraction des végétaux consommée est majoritairement constituée de feuilles et graines.

Documents 2 et 3 – Le tube digestif des lézards de Pod Mrčaru présente des valves caecales tant chez l'adulte que chez le jeune. Ce qui traduit une adaptation : les organismes présentant cette différence génétique ont été sélectionnés et ont pu se répandre dans la population de lézards de cette île.

Document 4 – Les variations morphologiques concernent aussi la tête qui est plus grosse avec une force de la morsure plus importante.

Un lien entre les différences morpho-anatomiques constatées et la modification de régime alimentaire semble possible. Les lézards possédant les adaptations à un régime alimentaire phytopage ont pu être avantagés dans cet environnement et se répandre dans la population jusqu'à la représenter entièrement.

Partie 2 - Travaux pratiques

De retour en salle, cette séance de travaux pratiques permettra, à partir d'une dissection, de trouver des liens entre le régime alimentaire et l'organisation du tube digestif par analogie avec une autre espèce.

Enfin, la création d'un modèle algorithmique permettra de bien comprendre le mécanisme évolutif à l'origine de l'évolution de la population des lézards.



Etablir une relation entre le régime alimentaire et les dispositifs anatomiques permettant de modifier le temps de digestion.

Exploitation attendue

Argumenter le lien entre régime alimentaire et organisation du tube digestif par analogie avec une autre espèce.

1

Qu'est-ce qu'un modèle scientifique ?

Un modèle scientifique est une représentation simplifiée, et souvent idéale, de la réalité d'un phénomène permettant de prévoir ce qu'il se passerait dans certaines conditions. Dans la plupart des cas, un modèle reste limité à un domaine d'application (les valeurs



Protocole - Dissection

Matériel

- Deux poissons téléostéens : un herbivore (mulet, sauge,...) et un carnivore (daurade, truite, vieille...).
- Cuvette à dissection et outils de dissection.
- Appareil photo et logiciel Mesurim OU fil et double décimètre.

Manipulation

- Réaliser la dissection du tube digestif.
- Repérer les différentes parties du tube : bouche, estomac, intestin, anus.
- Mesurer la longueur de la bouche à l'anus avec Mesurim (ou avec un fil). La ramener à la longueur totale de l'animal pour déterminer la longueur relative du tube digestif.

(D'après *Travaux pratiques d'écologie*, Educagri)

minimales et maximales des différentes variables) en dehors duquel ledit modèle n'est plus applicable. Un modèle aide les scientifiques à concevoir, à analyser ou à imaginer des concepts scientifiques. Mais il n'a pas fonction de preuve.

2

Comment paramétrier le logiciel NetBioDyn ?

Nous situerons ici notre modélisation sur la population de Pod Mrčaru, en été. Des plantes coriacées sont abondamment disponibles. Il s'agit de montrer l'impact de la valeur sélective d'un caractère (fitness) sur les populations. Cette fitness dépend de deux facteurs, la survie et la fertilité. Sur le logiciel, on peut faire varier

la fitness d'un caractère en jouant sur ces deux paramètres : la survie (demi-vie) attribuée à une entité et sa fertilité (taux de reproduction).

Il s'agit dans un premier temps de paramétrier le modèle de la façon la plus réaliste possible.



Montrer, par modélisation numérique, qu'un caractère avantageux se répand dans une population modifiant ainsi sa structure.

Exploitation attendue

Argumenter la propagation d'une adaptation avantageuse dans une population.

Exploitation - paramétrages de la modélisation

Une discussion peut être engagée avec les élèves sur l'estimation des différents paramètres à partir de leurs observations issues de l'étude des documents du travail préparatoire et ainsi mesurer avant même de la réaliser les limites et conditions d'une modélisation numérique. On peut aussi laisser les élèves estimer les différents paramétrages en les justifiant et comparer les résultats entre eux, aboutissant à une discussion sur les usages des modélisations numériques pour rendre compte d'un phénomène observé, voire leur valeur prédictive avant de leur donner le détail des paramétrages proposés, qui ont été définis de façon empirique après plusieurs essais. Le nombre d'individus placés au départ ainsi que leur répartition font varier les résultats du modèle. On obtient aussi des résultats différents avec un même milieu si l'on répète la simulation plusieurs fois.

NetBioDyn peut être téléchargé sur le site de l'Université de Brest :
<http://virtulab.univ-brest.fr/netbiodyn.html>



Paramétrage des espèces en présence (agents)

1. Paramétrier les ressources alimentaires

- Plantes : demi-vie attribué = 0 (infinie). Les plantes consommées ne le sont que partiellement et peuvent donc se régénérer.
- Arthropodes : demi-vie attribuée = 10.



2. Paramétrier les populations de lézards utilisant les ressources

On distingue les lézards en fonction de leur régime alimentaire :

- lézard dit « herbivore » (H), il est mobile et est majoritairement herbivore, d'où son appellation, bien que consommant aussi des arthropodes. Sa demi-vie, qui peut être estimée comme 4 fois supérieure à celle du lézard omnivore, est paramétrée à 200 ;
- lézard omnivore (O), mobile, il consomme des plantes mais surtout des arthropodes en quantité importante. Sa demi-vie peut être 4 fois inférieure à celle du lézard herbivore afin d'illustrer l'avantage du régime phytophage sur l'île de Pod Mrčaru qui est riche en plantes coriacées. Demi-vie attribuée = 50.

Agent	
Name	plante
Deplacement	Proba= 0.0
Directions=	
1/2 Life (0=infinite)	0.0
Appearance	Color: Square Image: No image
Cleanable	<input checked="" type="checkbox"/>
Invisible	<input type="checkbox"/>
OK	
Cancel	

Agent	
Name	Lézard H
Deplacement	Proba= 1.0
Directions=	
1/2 Life (0=infinite)	200.0
Appearance	Color: Square Image: No image
Cleanable	<input checked="" type="checkbox"/>
Invisible	<input type="checkbox"/>
OK	
Cancel	

Paramétrage des comportements

1. Paramétrier les taux de reproduction

On choisit ici de ne pas jouer sur la fertilité des lézards. La différence en termes de fitness se fera, dans le modèle, sur la survie seulement. On attribue donc les mêmes taux de reproduction aux deux types de lézard.



Comportement	
Nom	production lézards herbivores
Probabilité	1
Age >=	0.0
Réactifs	Agents: R1=lézards herbivores, R2=lézards herbivores, R3=0
Positions	
Produits	Agents: lézards herbivores, lézards herbivores, lézards herbivores
Origine	0, 0, 0
Ok	
Annuler	

Comportement	
Nom	production lézards omnivores
Probabilité	1.0
Age >=	0.0
Réactifs	Agents: R1=lézards omnivores, R2=lézards omnivores, R3=0
Positions	
Produits	Agents: lézards omnivores, lézards omnivores, lézards omnivores
Origine	0, 0, 0
Ok	
Annuler	

2. Paramétrier les comportements alimentaires des lézards

Il s'agit ici de modéliser l'exploitation des ressources et la reproduction des lézards H et O. Par exemple l'interaction alimentaire : lézard H + plante = génère en sortie un lézard H et une plante, en effet, la totalité de la plante n'est pas consommée. Cette interaction a une probabilité de 0,5 (part moyenne de plantes dans le régime alimentaire).

Comportement	
Nom	codes par lézards herbivores
Probabilité	0.5
Age >=	0.0
Réactifs	Agents: R1=lézards herbivores, R2=arthropodes, R3=+
Positions	
Produits	Agents: lézards herbivores, lézards herbivores, lézards herbivores
Origine	0, 0, 0
Ok	
Annuler	

Comportement	
Nom	plantes par lézards herbivores
Probabilité	0.5
Age >=	0.0
Réactifs	Agents: R1=lézards herbivores, R2=plantes, R3=+
Positions	
Produits	Agents: plantes, lézards herbivores, lézards herbivores
Origine	0, 0, 0
Ok	
Annuler	

Paramétrage des comportements (suite)

On choisit d'attribuer la probabilité de consommation grâce à la part prise par les plantes et les arthropodes dans le régime alimentaire :

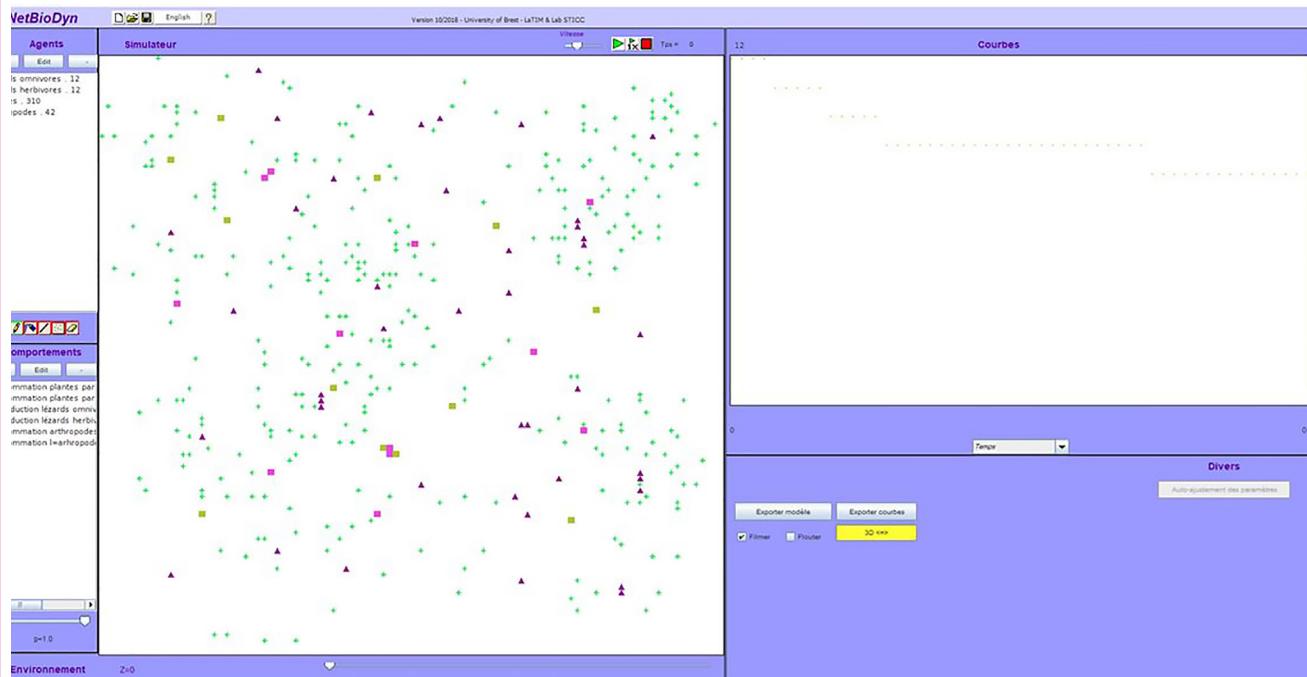
- consommation de plantes par les lézards herbivores : 0,5 ;
- consommation de plantes par les lézards omnivores : 0,1 ;
- consommation d'arthropodes par les lézards herbivores : 0,5 ;
- consommation d'arthropodes par les lézards omnivores : 0,9.



3. Paramétrier le peuplement du milieu

Choix de peuplements effectués :

- 300 plantes ;
- 40 arthropodes ;
- 12 lézards herbivores ;
- 12 lézards omnivores.



Attendus – Quelques éléments de correction

1 – Argumenter le lien entre régime alimentaire et organisation du tube digestif par analogie avec une autre espèce.

La relation entre la longueur du tube digestif (ramenée à la longueur de l'animal) et le régime alimentaire est nette chez les poissons : les phytopages ayant un tube digestif plus long. De même chez ceux-ci, des valves peuvent aussi être repérées. Les lézards sur Pod Mrčaru sont beaucoup plus herbivores que ceux de Pod Kopište. Cela va de pair avec une modification du tube digestif : valves qui ralentissent les aliments par rapport à la population « source ». Les plantes nécessitant un temps de digestion plus long, les lézards herbivores ont donc un tube digestif adapté à leur changement de régime sur Pod Mrčaru. Ces changements se retrouvent chez les jeunes, on peut penser que l'origine est génétique.

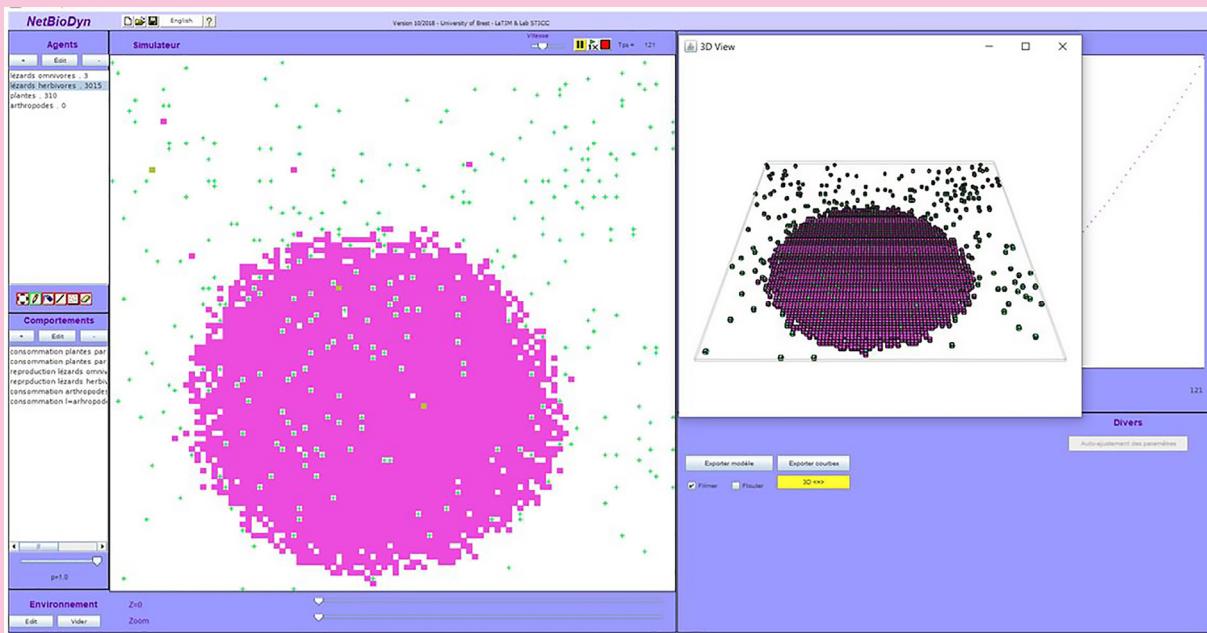
Ainsi, le scénario proposé est le suivant :

1. des lézards sont introduits sur Pod Mrčaru ;
2. ils ont un régime alimentaire plus herbivore ;
3. ceux qui ont des valves caecales ont une meilleure survie et se reproduisent = sélection naturelle ;
4. le caractère "valve caecale" se répand dans la population.

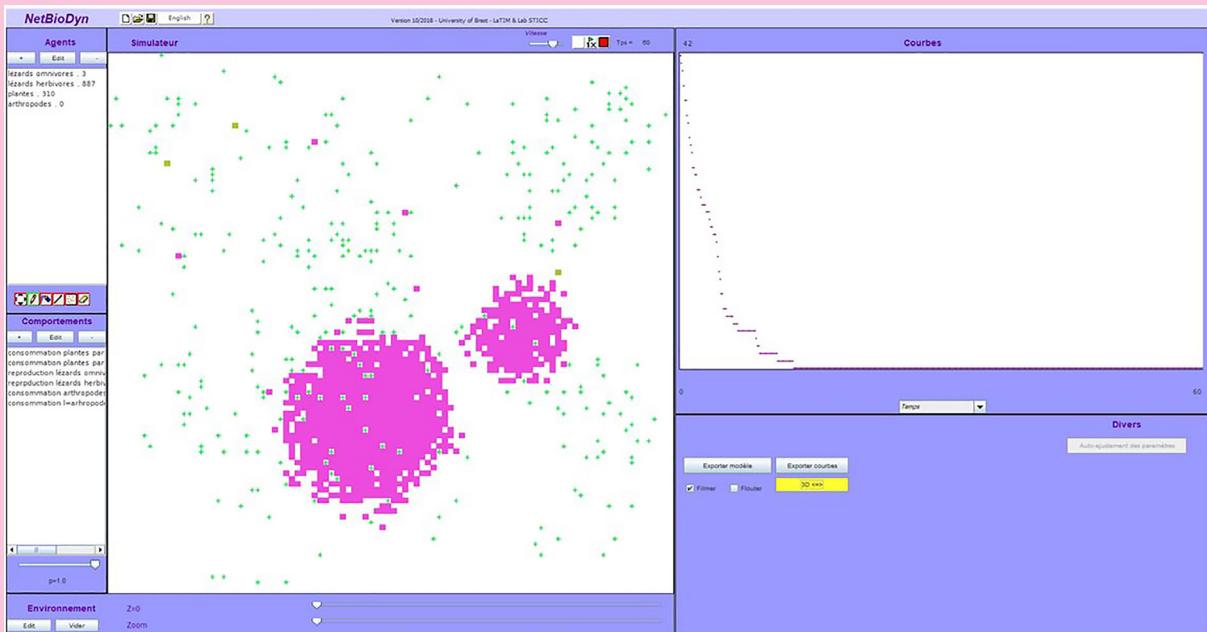
Attendus – Quelques éléments de correction

2 – Argumenter la diffusion d'une adaptation avantageuse dans une population.

Cas où les lézards « herbivores » se développent :



Cas où deux foyers de multiplication apparaissent :



Dans tous les cas de modélisation où un avantage sélectif est donné aux lézards présentant une adaptation au régime alimentaire herbivore, ceux-ci deviennent majoritaires dans les populations. Cette modélisation avec ces conditions initiales reproduit fidèlement l'évolution des populations des lézards sur l'île de Pod Mrčaru. On peut donc raisonnablement supposer que ce sont ces conditions qui se sont appliquées à cette population de lézard, indiquant l'existence d'une pression de sélection à l'œuvre sur cette île.



SÉLECTION NATURELLE ET COLORATION DU PELAGE CHEZ LA SOURIS DES PLAGES, *PEROMYSCUS* *POLIONOTUS*

Conséquences sur la valeur sélective

Pour conclure



L'auteur présente des paires « souris claire/souris sombre » à des chouettes et des hiboux, dans des enclos avec sol sombre ou sol clair. Il note à chaque fois quelle est la souris qui est mangée (en premier).

→ les prédateurs consomment plus souvent la souris la moins camouflée

$$\text{soit la valeur sélective } w_i = \frac{\text{nb essais} - \text{nb souris } i \text{ mangées}}{\text{nb essais} - \text{nb souris sombres mangées}}$$

Sur sol clair : w souris claires > w souris sombres

→ souris claires avantagées

→ plus fréquentes dans ce type d'environnement

On observe l'inverse sur sols sombres.

Bibliographie complémentaire

- Hoekstra, H. E. (2006). Genetics, development and evolution of adaptive pigmentation in vertebrates. *Heredity*, 97(3), 222–234.
- Hoekstra, H. E., Hirschmann, R. J., Bundey, R. A., Insel, P. A., & Crossland, J. P. (2006). A Single Amino Acid Mutation Contributes to Adaptive Beach Mouse Color Pattern. *Science*, 313(5783), 101–104.
- Hoekstra, H. E., Drumm, K. E., & Nachman, M. W. (2004). Ecological genetics of adaptive color polymorphism in pocket mice: geographic variation in selected and neutral genes. *Evolution*, 58(6), 1329–1341.

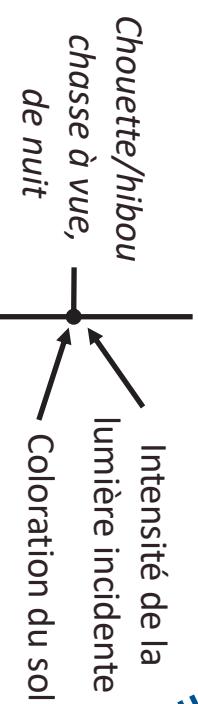
Mutations aléatoires

du gène *Mc1r* (Melano cortine 1 receptor)

Hoekstra et al. 2006

Diversité

dans les colorations des pelages de *Peromyscus*



ENVIRONNEMENT



Autres exemples

Sceloporus undulatus

Biston betularia



Sélection naturelle et coloration du pelage chez la Souris des plages

D'après l'article de Kaufman, « Adaptive coloration in *Peromyscus polionotus* : experimental selection by owls », *Journal of Mammalogy*, 55 : 271-283 (1974).

P. Labb  ¹, A. Lazo², A. Bardet³, G. Raynaud³, A. Gayraud³

1. Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE 2. Lycée Arago, Perpignan 3. Collège et Lycée Saint Louis de Gonzague, Perpignan

Grande diversité de coloration des Souris des plages mais distribution non aléatoire dans l'espace

Figure 1. Distribution des colorations de pelage des souris *Peromyscus polionotus* au sud de l'Arizona, USA



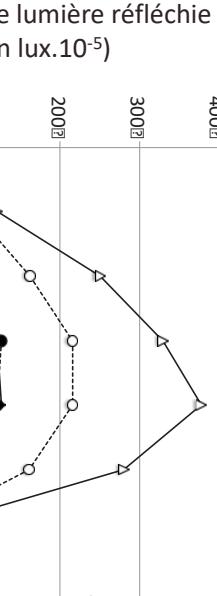
La taille des souris est proportionnelle à leur fréquence dans les populations

D'après Hoekstra et al. 2004

Pourquoi ?

Camouflage vis-à-vis du substrat !

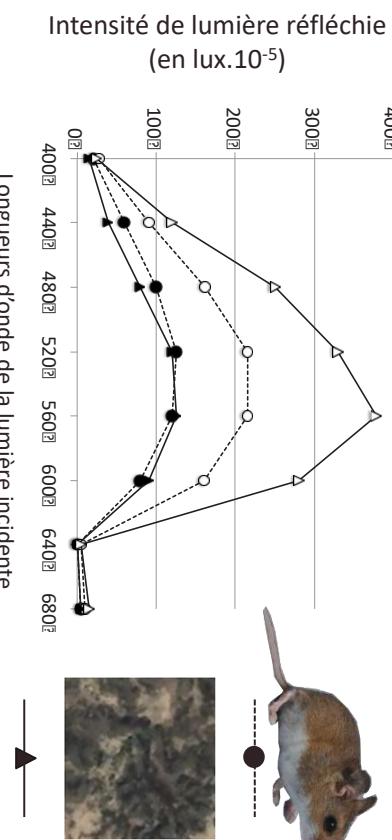
Figure 2. Intensité de la lumière r  f  chie par les sols et les pelages en fonction de la lumière incidente



Variation d'intensité de la lumière r  f  chie par les sols ou par les pelages en fonction de la lumière incidente (Figure 2).



Le pelage des souris les plus fréquentes localement (Figure 1), présente un patron proche de celui du sol correspondant.



Longueurs d'onde de la lumière incidente
(en nm)

camouflage

DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Lire l'article scientifique en anglais.
- Cibler les notions clés importantes à transmettre.
- Simplifier pour permettre la compréhension par des élèves.

Lire un article scientifique en anglais

Article en anglais : difficultés de compréhension de certaines notions / subtilités de la langue anglaise.

Article scientifique : difficultés d'appropriation de plusieurs notions liées aux résultats de la recherche,

notamment chiffrés.

Nécessité de la rencontre avec un chercheur pour échanges, explications / vérification de la juste compréhension du contenu scientifique.

Cibler les notions clés importantes à transmettre

Nécessité de faire des choix par rapport au contenu de l'article pour sa mise en adéquation avec les programmes.

Échanges en équipe afin de définir, par niveau scolaire, les notions clés, et avec le chercheur pour éviter des contre-sens scientifiques.

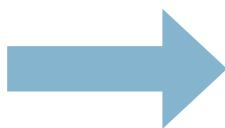
Simplifier pour permettre la compréhension par des élèves

I fallait modifier les supports d'informations en introduisant des documents nouveaux.

Pour cela nous avons :

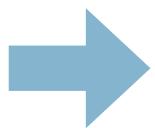
- choisi des images (sur le web) en lien avec le sujet ;

*Dans l'article
“The old-field mouse,
Peromyscus polionotus, exhibits
more pelage color variation than
most mammalian species.”*

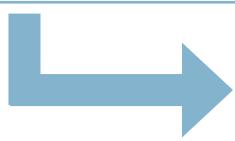


- créé des illustrations à partir de données de l'article ;

*Dans l'article
“Many small mammals demon-
strate considerable variation in
pelage across their geographic
range (for example, small mam-
mals in the southwestern United
States, Benson, 1933; Dice and
Blossom, 1937).”*



La taille des souris est proportionnelle à leur fréquence dans les populations
D'après Hoekstra et al. 2004



Recherche d'autres articles plus récents (en lien avec le sujet) fournissant des données détaillées permettant de construire la schématisation.
Choix/création d'images pour illustrer ces données.



- transformé (simplifié) des illustrations de l'article (adaptation des légendes, des formulations, ...).

Dans l'article

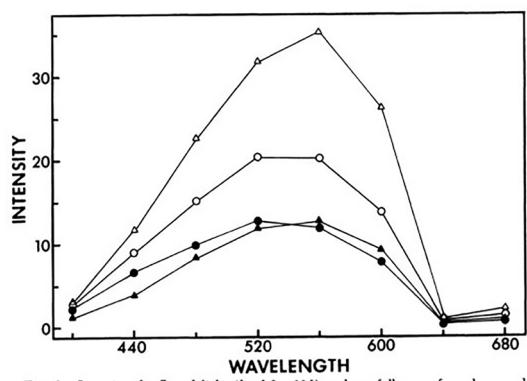
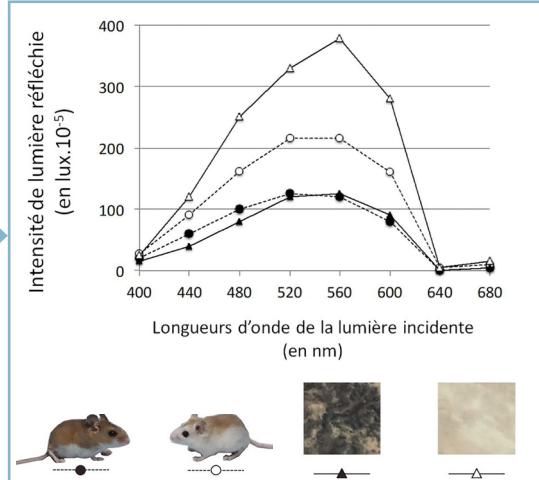
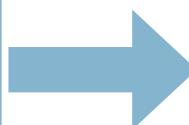


FIG. 3.—Intensity of reflected light ($\text{lux} \cdot 10^{-5}$) under a full moon for pelages and soils. Values were calculated from reflectance (Fig. 2) and full moon illumination (Fig. 1) for light brown *Peromyscus* (open circles), dark brown *Peromyscus* (closed circles), light soil (open triangles), and dark soil (closed triangles).



Pour alléger le contenu informationnel, nous avons :

- enlevé des informations qui complexifient la compréhension ;

Dans de l'article

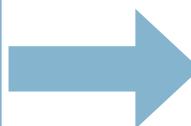
Expérimentations et résultats en lien avec les nombreuses variations de luminosité.

TABLE 4.—Number of light brown (L) and dark brown (D) *Peromyscus* captured by owls (barn owls and screech owls combined) in field enclosures. Selection indices are given in parentheses. Light class 1 represents nights with one-half to full moon, class 2 represents nights with less than one-half moon, and class 3 represents nights with no moon or with heavy cloud cover.

Light class	Light soil	Dark soil
1	18L:19D (-0.027)	12D:8L (-0.400)*
2	28L:37D (-0.138)	10D:32L (-0.524)**
3	11L:38D (-0.551)**	20D:26L (-0.130)

*Associated chi-square value significant at $P < 0.05$.

**Associated chi-square value significant at $P < 0.01$.



- adapté des outils mathématiques et conceptuels pour synthétiser plusieurs résultats avec des choix de valeurs simplifiées.

Dans de l'article

"Captures of conspicuous mice, the phenotype less like the soil in coloration, and matching mice, the phenotype more closely resembling the soil coloration, were compared using the selection index (SI) developed by Dice (1947), which is calculated as follows : $SI = (a-b)/(a + b)$."

TABLE 5.—Number of mice captured and number of trials mice were not taken during the first trial per owl on any night. Per cent for each category is given in parentheses. Experiments were conducted on dark soil with sparse vegetation and on light soil with both sparse and dense vegetation. Prey used were light brown (L) and dark brown (D) *Peromyscus*.

Substrate	Conspicuous mice	Nonconspicuous mice	Nothing
Dark sparse	36L (53.7)	22D (32.8)	9 (13.4)
Light sparse	43D (55.1)	25L (32.1)	10 (12.8)
Light dense	17D (23.0)	9L (12.2)	48 (64.9)

$$\text{soit la valeur sélective } w_i = \frac{\text{nb essais} - \text{nb souris } i \text{ mangées}}{\text{nb essais} - \text{nb souris sombres mangées}}$$



L'auteur présente des paires souris claire/souris sombre à des chouettes et des hiboux, dans des enclos avec sol sombre ou sol clair. Il note à chaque fois quelle est la souris qui est mangée (en premier). Il note à chaque fois quelle est la souris qui est mangée (en premier).

L'appui du chercheur est indispensable pour de nombreux points de cette étape 3, en particulier celui de maîtriser les contenus scientifiques pointus !

EXEMPLE D'ACTIVITÉ SECONDE

SÉLECTION NATURELLE ET COLORATION DU PELAGE CHEZ LA SOURIS DES PLAGES



À partir de l'analyse des différents documents, proposer une explication sur les fréquences de répartition des populations de souris observées dans le Sud de l'Arizona, au niveau des sables Pinta et des coulées de lave de Pinacate. La réponse prendra la forme d'un schéma-bilan commenté.

1 Phénotypes et génotypes des souris

La Souris de plages, *Peromyscus polionotus*, est un petit mammifère nocturne vivant en Floride et en Caroline du Sud (U.S.A.) dont la couleur du pelage présente d'importantes variations en fonction de son milieu de vie. On observe dans les populations une grande variété de colorations du pelage (phénotype). Le gène Mc1r (Melano cortine 1 receptor), responsable de la couleur du pelage, existe sous plusieurs versions, c'est-à-dire plusieurs allèles (génotype).

(Source : <https://www.pinterest.fr/pin/864198615965902798/>)

Programme

- Thème : la Terre, la vie et l'organisation du vivant - Biodiversité, résultat et étape de l'évolution.

Objectif de connaissance

- La sélection naturelle résulte de la pression du milieu et des interactions entre les organismes. Elle conduit au fait que certains individus auront une descendance plus nombreuse que d'autres dans certaines conditions.

Compétences

- Pratiquer des démarches scientifiques : interpréter des résultats et en tirer des conclusions.
- Communiquer : communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant.



2 Distribution des colorations de pelage des souris *Peromyscus polionotus* au sein des populations du sud de l'Arizona, USA



D'après Hoekstra et al. 2004

La taille des souris est proportionnelle à leur fréquence dans les populations.



3 Expériences de préation

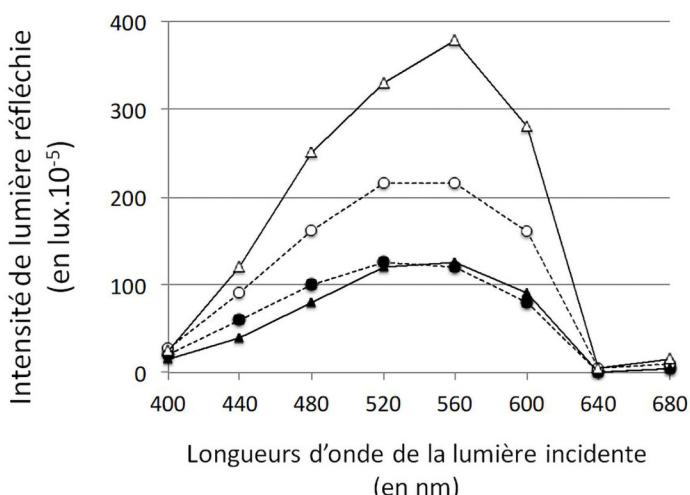
Ces expériences ont été conduites par Dice en 1947. Une expérience correspond au lâcher d'un binôme de souris (une à pelage clair et une à pelage sombre) en présence d'une chouette (ou d'un hibou), prédateur naturel des Souris des plages. L'expérience est reproduite 128 fois en sol sombre et 151 fois en sol clair. On compte le nombre de souris mangées par les prédateurs (💀) pour chacune des couleurs de pelage sur chaque sol et on calcule la valeur sélective (W). Pour le calcul de W , les souris de pelage sombre sont prises en référence.

$$W_i = \frac{\text{nb essais} - \text{nb souris } i \text{ mangées}}{\text{nb essais} - \text{nb souris sombres mangées}}$$

i correspond au phénotype considéré pour le calcul de la valeur sélective.

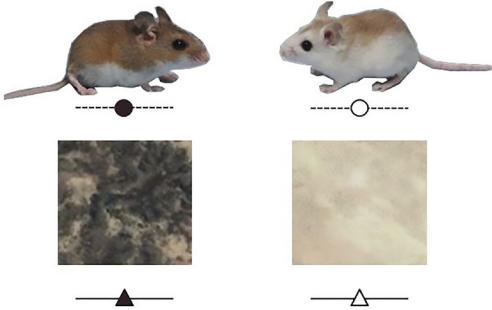


4 Courbes de variation de l'intensité lumineuse réfléchie



L'intensité lumineuse de la lumière incidente correspond à celle présente lors d'une nuit de pleine lune.

Légende



Éléments de correction

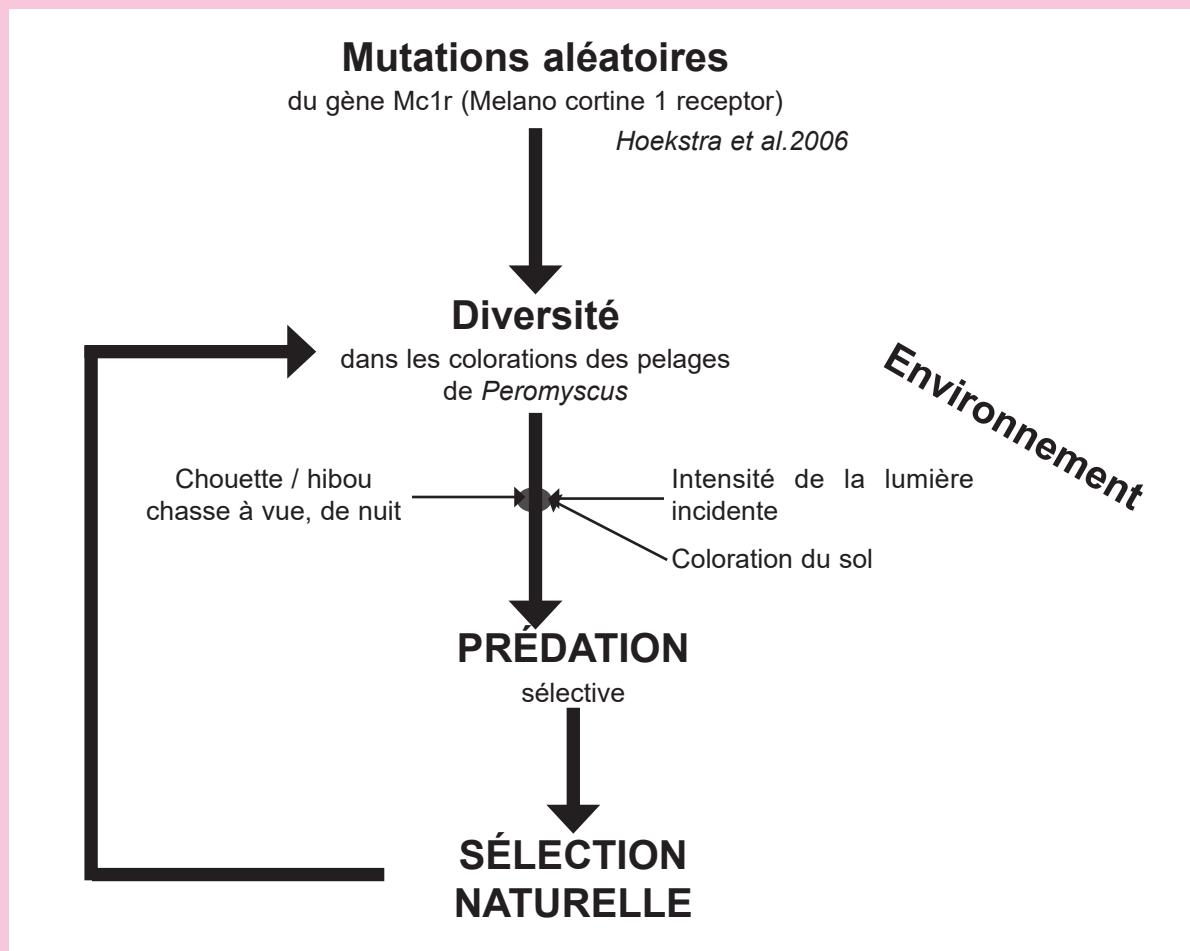
Documents 2 et 3 :

- sur sol clair, le nombre de souris claires est plus important que le nombre de souris sombres. Les prédateurs consommant plus souvent la souris la moins camouflée, les souris claires sont avantageées. C'est pourquoi elles sont plus fréquentes dans ce type d'environnement.
- sur sol sombre, le nombre de souris sombres est plus important que le nombre de souris claires. Les prédateurs consommant plus souvent la souris la moins camouflée, les souris sombres sont avantageées. C'est pourquoi elles sont plus fréquentes dans ce type d'environnement.

Documents 2 et 4 :

- les plus faibles écarts de réflectance se retrouvent entre souris de « même » couleur que le sol. Ainsi, plus le pelage des souris les plus fréquentes sur un sol donné présente un patron proche de celui du sol correspondant, plus la couleur de pelage représente un camouflage. Cela correspond à un avantage sélectif.

Proposition de schéma bilan



En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/souris/POSTER_souris.pdf



Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/souris/docs_souris.zip





RELATIONS ENTRE ÉVOLUTION D'UN RONGEUR GÉANT, *AMBLYRHIZA INUNDATA* ET DYNAMIQUE DE LA SUBDUCTION ANTILLAISE

Figure 1. Situation géologique dans la région des caraïbes au Crétacé supérieur (Santonien-Campanien) ≈ 80 - 75 Ma

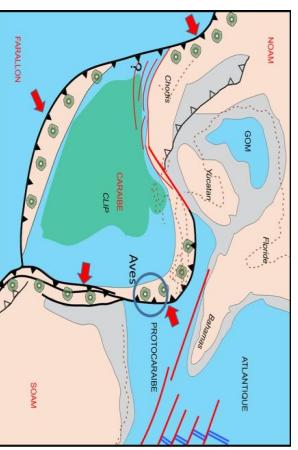
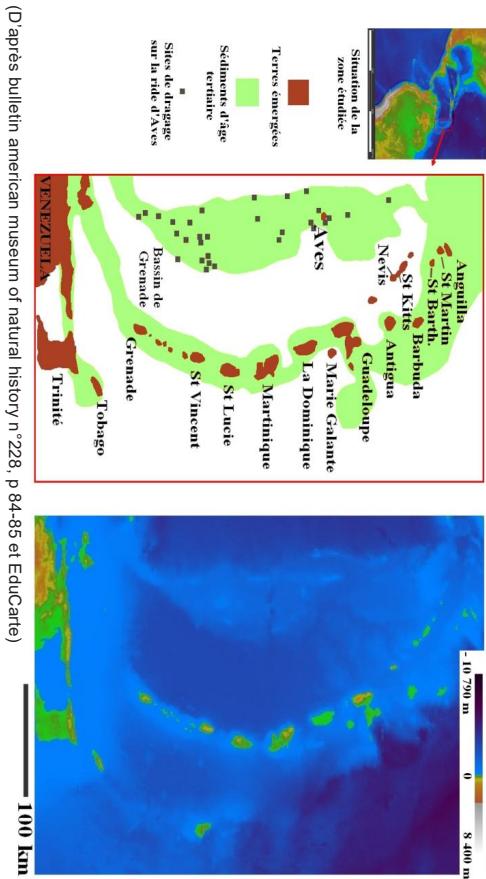


Figure 3. La ride d'Aves : géographie actuelle et sédiments tertiaires répertoriés dans les Caraïbes



(D'après Bernard Mercier de Lépinay GeoAzur)

Une subduction est à l'origine d'un arc insulaire volcanique dans la région des caraïbes. Cette zone de subduction et le front de l'arc insulaire se sont déplacés depuis 120 Ma (Figures 1 et 2).

Figure 2. Déplacement du front de l'arc magmatique depuis 120 Ma

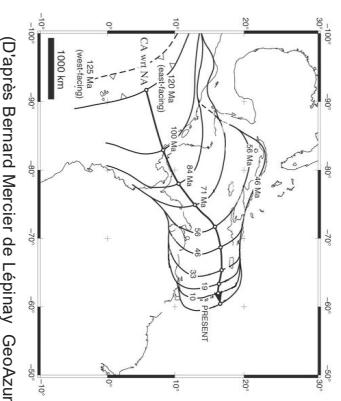
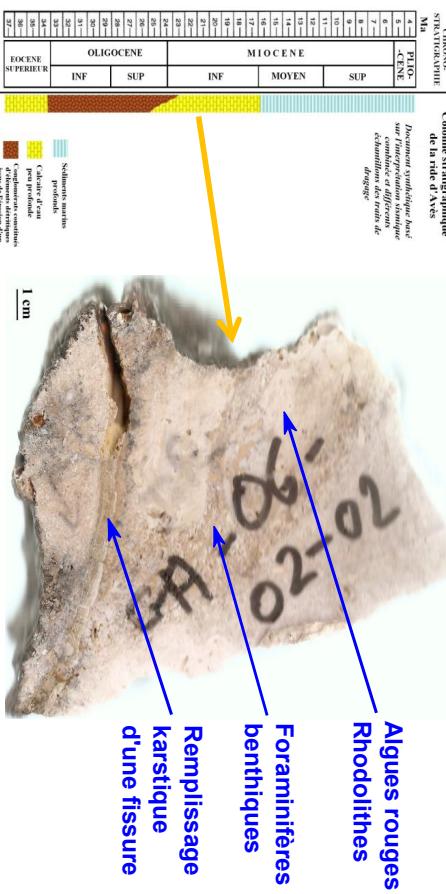


Figure 4. Calcaire recueilli lors d'un dragage au niveau de la ride d'Aves par la mission GARANT! (2017)

(D'après GARANT!, UM Montpellier, Ph. Munch)



(D'après Bernard Mercier de Lépinay GeoAzur)

Conclusion

La ride d'Aves était émergée à l'Oligocène et pouvait constituer un passage continu ou discontinu entre des îles des Antilles et l'Amérique du Sud. Ce "pont", aujourd'hui disparu a pu permettre la colonisation d'îles des Antilles par la lignée d'*Amblyrhiza inundata*. L'isolement postérieur serait alors responsable de son évolution en une forme géante.

- Les foraminifères benthiques permettent de dater le calcaire : il est d'âge Eocene moyen-Oligocène. Les foraminifères et les fossiles associés indiquent qu'à cette époque la ride d'Aves se trouvait sous le niveau marin à une profondeur faible.

Le remplissage karstique de la fissure montre que ce calcaire a été émergé. L'émergence est donc forcément postérieure à l'âge du calcaire.

- Les premiers dépôts au dessus des calcaires karstifiés se sont faits en environnement marin profond et sont estimés d'âge Miocène supérieur.
- Entre 35 et 33 Ma une baisse du niveau marin mondial, en relation avec le début des glaciations dans l'Antarctique, est intervenue, rendant plus facile l'émergence de l'arc.
- L'arrêt du fonctionnement de l'arc volcanique au niveau de la Ride d'Aves serait intervenu à l'Eocène. Le fonctionnement du nouvel arc établi plus à l'Est (arc des petites Antilles) aurait permis le soulèvement des reliefs sous-marins de la Ride d'Aves et la création d'îles aujourd'hui disparues, voire d'un pont comme cela a été proposé par Iturralde-Vinent et McFee en 1989, favorisant le passage de mammifères depuis l'Amérique du Sud comme les ancêtres d'*Amblyrhiza inundata*.

Relation entre évolution du « rongeur géant » *Amblyrhiza inundata* et dynamique de la subduction antillaise

D'après le projet ANR GAARANTI (Grandes Antilles & Aves Ridge versus petites Antilles), Marc Tariére, Patrice Fabre, Fanny Garel, Elodie Granier, Sylvie Hurtrez,

Marc Rosenzweig, Mathieu Stuard, Stéphanie Volle, Agnès Tellier et Philippe Münch.

Institut de Recherche en Enseignement des SVT (RES-SVT) – Montpellier

Des restes de « rongeurs géants » sur des îles

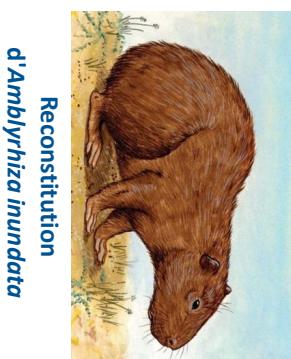
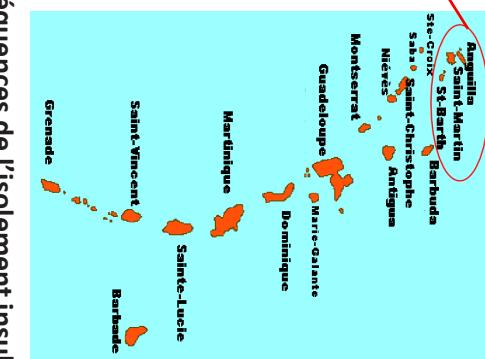
Amblyrhiza inundata est un « rongeur géant » fossile

dont les restes ont été trouvés dans les Antilles.

Ils sont datés de -125 000 pour Anguilla et Saint-Martin, -500 000 à -400 000 ans à Saint-Barthélemy.



Des restes d'*Amblyrhiza inundata*



Reconstitution d'*Amblyrhiza inundata*



Amblyrhiza : un "rongeur géant" (octodontoïde) fossile.

Biknevicius et al., 1993



La taille importante de ces animaux serait une des conséquences de l'isolement insulaire : on parle le syndrome d'insularité

Une des manifestations de ce syndrome est une uniformisation des tailles sous la pression d'un même environnement (l'insularité), engendrant alors un nanisme ou un gigantisme. Dans le cas du gigantisme insulaire, la nouvelle population est nettement plus grande que son ancêtre continental : cela est généralement expliqué par l'absence de certains de ses prédateurs dans son environnement isolé. *Amblyrhiza inundata*, espèce éteinte de rongeur géant endémique du banc d'Anguille dans les Petites Antilles, est un exemple de gigantisme insulaire.

Comment des rongeurs de taille modeste ont-ils colonisé ces îles ?

Amblyrhiza inundata est issue d'une lignée originaire d'Amérique du Sud, de taille modeste, ayant colonisé ces îles et se retrouvant ainsi isolée.

Mais comment la lignée d'*Amblyrhiza inundata* a-t-elle colonisé ces îles?



François Bert / 1777 - Travaux de la France 03
Wolff-Picard, Chapteler, Gérard



©G. Lecocq

Hypothèse 1 : colonisation par radeau



Hypothèse 2 : colonisation empruntant une continuité terrestre

EXEMPLE D'ACTIVITÉ SPÉCIALITÉ TERMINALE

DIVERSIFICATION DES ESPÈCES – LE CAS D'*AMBLYRHIZA INUNDATA*

Mise en situation

Mais qui était donc *Amblyrhiza inundata* ? Les restes d'un fossile d'âge estimé entre -500 000 à -125 000 ans ont été retrouvés sur les îles d'Anguilla, Saint-Martin et



Saint-Barthélemy (Antilles). Les dents (molaires et incisives) indiquent que cet animal était un rongeur. Il a été nommé *Amblyrhiza inundata* par les scientifiques et d'après ses caractéristiques morpho-anatomiques, il a été classé dans la famille actuelle des *Chinchillidae* (chinchilla, viscache, ...), endémique de l'Amérique du Sud.

Crâne de chinchilla actuel
(1 prémolaire et 3 molaires par demi-mâchoire)



Fragment de crâne d'*Amblyrhiza inundata*



En utilisant les caractéristiques dentaires de plus de 100 espèces de rongeurs, les scientifiques ont pu établir une loi, reliant la longueur de la série dentaire (prémolaires + molaires) de l'animal à sa masse :

$$\ln(m) = 2,70 \ln(s) - 0,038$$

avec m = masse corporelle en gramme et s = longueur de la série dentaire en mm

Constat issu de l'activité déclenchante

Les calculs effectués à partir des mesures de dents montrent un animal d'environ 120 kg et de la taille d'un homme.



Biknecius et al., 1993

 À partir des informations fournies, en traitant les images avec le logiciel Mesurim, mesurer la longueur de la série dentaire du chinchilla actuel, d'*Amblyrhiza inundata* et estimer leurs masses respectives.

Problématique

On cherche à comprendre comment, à partir d'une espèce de rongeur de taille modeste et originaire d'Amérique du Sud, a pu se diversifier un « rongeur géant » dans les îles Anguilla, Saint-Martin et Saint-Barthélemy.

Organisation du travail de groupe

Étape 1 : étude d'un corpus avec partage des analyses et conclusions détaillées et argumentées sur un espace partagé pour la classe.

Étape 2 : chaque groupe prend connaissance des travaux des autres groupes et proposent une réponse complète à la problématique.

L'ordre de présentation des différents corpus documentaires suivants ne correspond pas à un ordre nécessaire de traitement.

CORPUS - L'ÉVOLUTION DES PARESSEUX

1

Origines et parentés des Paresseux

En l'absence de données moléculaires sur *Amblyrhiza inundata*, on étudiera celles d'un groupe originaire d'Amérique du sud et présent dans les Caraïbes comme *Amblyrhiza inundata*. Les Paresseux sont représentés aujourd'hui par six espèces, réparties dans les forêts tropicales d'Amérique du Sud et Centrale. Cependant, les espèces actuelles ne représentent qu'une petite fraction de la diversité passée des Paresseux. Plus de 100 genres de paresseux ont été décrits en particulier avec certains représentants terrestres, géants. Parmi ce groupe on trouve le Paresseux géant (*Megatherium americanum*) avec une masse corporelle estimée à plus de 4 000 kg. (...)

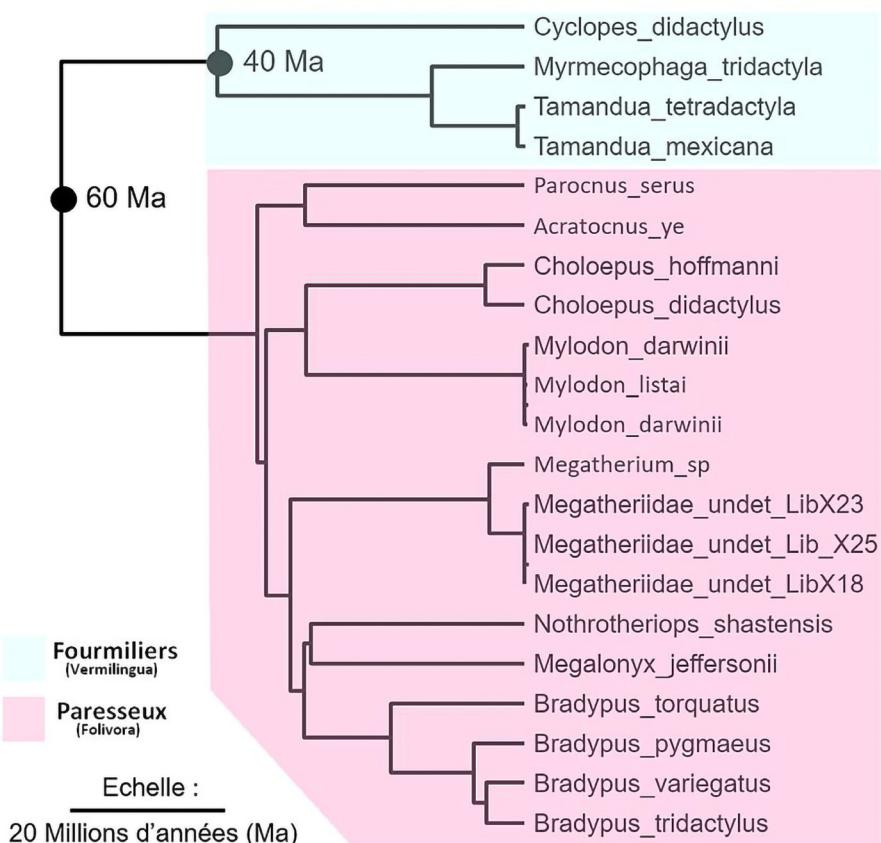
Originaire de l'Amérique du Sud, [le groupe des Paresseux] a colonisé avec succès l'Amérique centrale et l'Amérique du Nord après la formation de l'isthme de Panama il y a environ 4-5 Ma. Le groupe des Paresseux a également atteint un certain nombre d'îles des Caraïbes, donnant lieu à une diversification endémique bien étudiée à partir des taxons du Quaternaire (*Megalocnus*, *Neocnus*, *Acratocnus* et *Parocnus*), éteints peu de temps après l'apparition de l'Homme dans les Grandes Antilles (- 4400 ans).

D'après Delsuc et al. Ancient Mitogenomes Reveal the Evolutionary History and Biogeography of Sloths, Current Biology, juin 2019

2

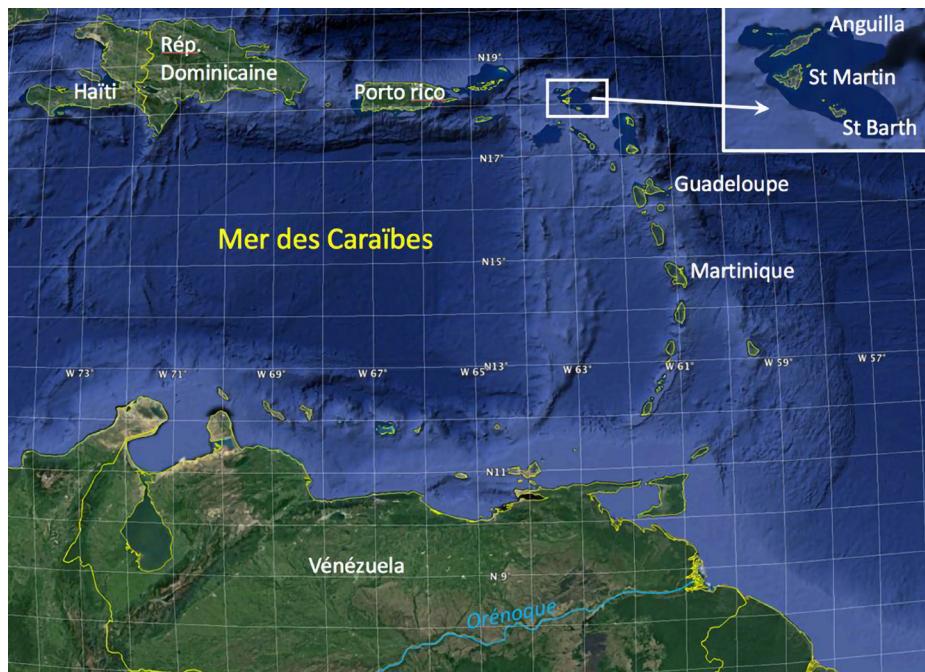
Horloge moléculaire et Paresseux

L'horloge moléculaire correspond au nombre de changements survenant dans une molécule au cours d'un temps donné. Associée à la description des relations de parenté entre organismes, elle permet de dater le moment où ces lignées ont divergé. Dans l'hypothèse de l'horloge globale, l'âge de la séparation des deux lignées, donc l'âge de leur dernier ancêtre commun, peut être calculé. L'utilisation d'horloges moléculaires chez les *Pilosa* (ordre de mammifères rassemblant les Paresseux et Fourmiliers) a permis de construire un chronogramme, c'est à dire un arbre daté.



CORPUS - LE SYNDROME INSULAIRE

1 Situation d'Anguilla, de Saint-Martin et de Saint-Barthélemy



À partir de l'ensemble des informations, formuler et argumenter, une hypothèse qui permettrait d'expliquer la taille d'*Amblyrhiza inundata*.

2 Le syndrome d'insularité

« (...) L'isolement d'une population de l'espèce d'origine prélude à une "révolution génétique" dont le résultat est l'acquisition par les membres de la population isolée de caractéristiques leur assurant l'isolement reproductif lors de la remise en contact ultérieure avec la population d'origine. (...) La primauté de ce mécanisme dans le cas de l'évolution de populations insulaires vraies est encore plus évidente. En effet, une barrière aquatique peut représenter, selon son extension, un obstacle difficile, voire impossible à franchir pour un grand nombre d'espèces. L'existence de nombreuses espèces endémiques insulaires montre à l'évidence l'efficacité de cet isolement. La première phase du mécanisme d'évolution allopatrique, c'est-à-dire la phase d'isolement en tant que tel, peut être réalisée de deux façons principales : dans le premier cas, une population peut être plus ou moins brutalement coupée du reste de l'aire de répartition de l'espèce; dans le second cas de figure, elle peut se développer à partir d'un petit nombre d'individus fondateurs. »

Laurent Granjon, thèse « Évolution allopatrique chez les muridés », novembre 1987.

« (...) le phénomène [syndrome insulaire] ne s'applique pas à n'importe quelle île. Les îles océaniques, trop éloignées des continents pour avoir connu un peuplement en mammifères terrestres à partir de ceux-ci, ne sont pas concernées, pas plus que les îles côtières trop proches où les mammifères continentaux migrent facilement. Les îles-continents comme l'Australie, l'Amérique du Sud pendant toute l'ère tertiaire, et dans une moindre mesure Madagascar, les grandes îles indonésiennes (Java, Sumatra, Bornéo) ou la Nouvelle-Guinée, ont vu se développer des faunes particulières mais à grande biodiversité et sans nanisme ou gigantisme particulier. En fait le phénomène ne s'observe que dans les îles (...), qui ont en commun de n'être ni trop grandes, ni trop petites, et que leur éloignement du continent rend susceptibles d'être peuplées accidentellement, grâce au franchissement successif de chapelets d'îles intermédiaires par des espèces nageant volontiers, ou encore par radeaux naturels. Dans les régions tectoniquement très actives, des ponts continentaux temporaires ont pu aussi constituer des voies de peuplement. On constate ensuite que les faunes véritablement insulaires sont pauvres en espèces, même si elles sont riches en individus, et qu'elles sont en déséquilibre écologique, notamment du fait de l'absence de mammifères prédateurs (Sondaar, 1977), qui sont parfois remplacés par des oiseaux. Enfin, si l'on compare les mammifères insulaires à leurs homologues continentaux, certaines familles de grande taille donnent des espèces naines, certaines familles de petite taille donnent des formes géantes, alors que d'autres familles ne montrent pas de changement de taille significatif. »

Claude GUERIN, « Le nanisme insulaire au quaternaire », Bulletin de la Société Linnéenne de Lyon, 1997

CORPUS - CES MAMMIFÈRES COLONISATEURS

1 Les radeaux naturels

Certains chercheurs ont proposé que les rongeurs, et d'autres espèces aient pu utiliser des radeaux naturels pour migrer au cours de l'histoire de la Terre. La vidéo à consulter a été tournée sur le fleuve Rio Chagres en République du Panama (vidéo du 8 décembre 2010).

https://advances.sciencemag.org/highwire/filestream/191263/field_highwire_adjunct_files/1/1600883_Video_S1.mov

Vidéo, matériel complémentaire de l'article de A. O'Dea et al. Formation of the Isthmus of Panama, Science Advances, aéût 2016.



À partir des documents, proposer un mécanisme de colonisation par *Amblyrhiza inundata* des îles Anguilla, Saint-Martin et Saint-Barthélemy. À partir de cette hypothèse de mécanisme, formuler une question aux scientifiques.

2 Les courants marins

La modélisation suivante montre les courants océaniques de surface actuels au niveau de la mer des Caraïbes depuis l'embouchure du fleuve Orénoque (Vénézuela).

Le rond vert indique la position des îles d'Anguilla, Saint-Martin et Saint-Barthélemy.

<https://earth.nullschool.net/fr/#current/ocean/surface/currents/orthographic=-66.42,13.71,2910/loc=-63.027,18.071>

Les données ayant permis la modélisation sont issues de l'US National Weather Service.



En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/rongeur/POSTER_rongeur.pdf



Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/rongeur/docs_rongeur.zip



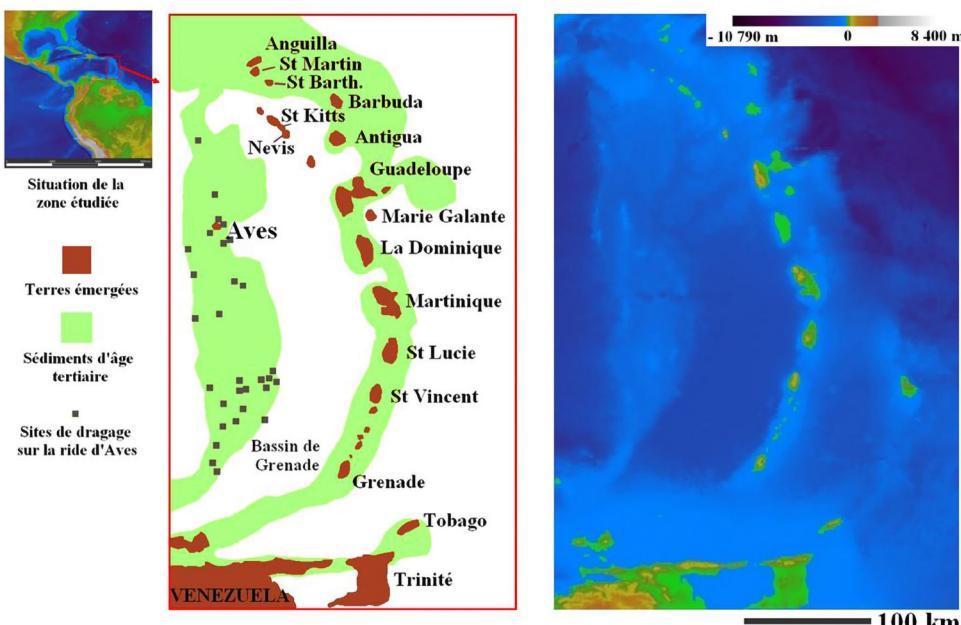
CORPUS - LA RIDE D'AVES

La ride d'Aves est un relief sous-marin d'une profondeur de plus de 1000 m, dont le point culminant, l'île d'Aves, est un petit banc sableux émergé de 2 mètres d'altitude pour 370 mètres de long et quelques dizaines de mètres de large.

1 Géographie actuelle et sédiments tertiaires répertoriés la mer des Caraïbes

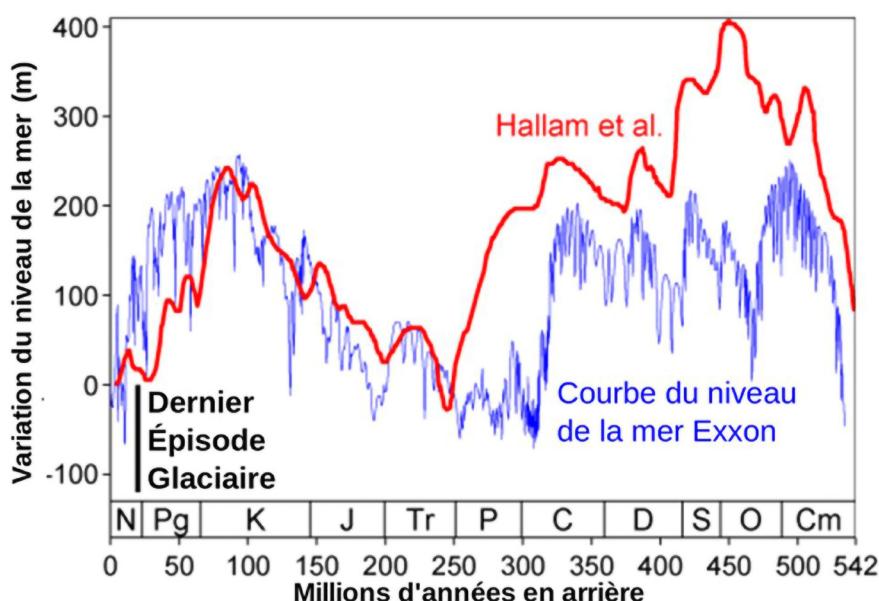
Les sédiments dragués sur la ride sont :

- deux calcaires récifaux datés de 40 à 34 millions d'années et de 23 à 16 millions d'années ;
- des conglomérats constitués d'éléments détritiques issus de l'érosion de reliefs émergés datés de 34 à 23 millions d'années ;
- des sédiments marins profonds entre 16 millions d'années et l'actuel.



(D'après bulletin american museum of natural history n°228, p 84-85 et EduCarte)

2 Reconstitution des variations du niveau marin au cours des 500 derniers millions d'années d'après deux études et méthodes différentes



N : Néogène, 23-0 Ma ; Pg : Paléogène : 65,5-23 Ma ; K : Crétacé, 145,5-65,5 Ma ; J : Jurassique, 200-145,5 Ma ; Tr : trias, 250-200 Ma.

La barre noire indique l'amplitude de la variation intervenue lors de la dernière transition glaciaire / interglaciaire.

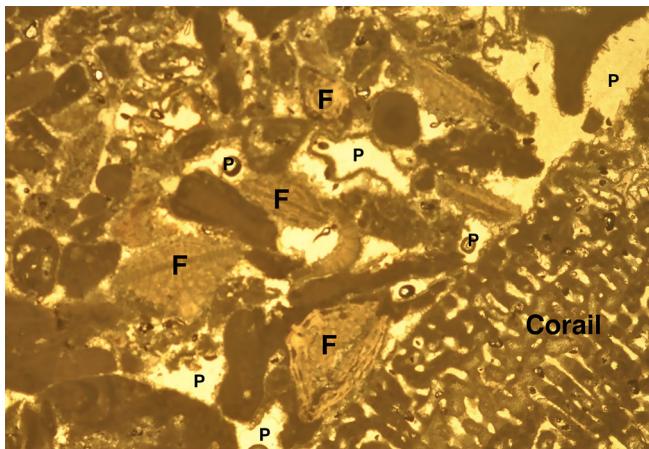
A partir des documents, proposer une histoire géologique de la ride d'Aves sur les 40 derniers millions d'années.

CORPUS - LES CALCAIRES SOUS-MARINS DE LA RIDE D'AVES

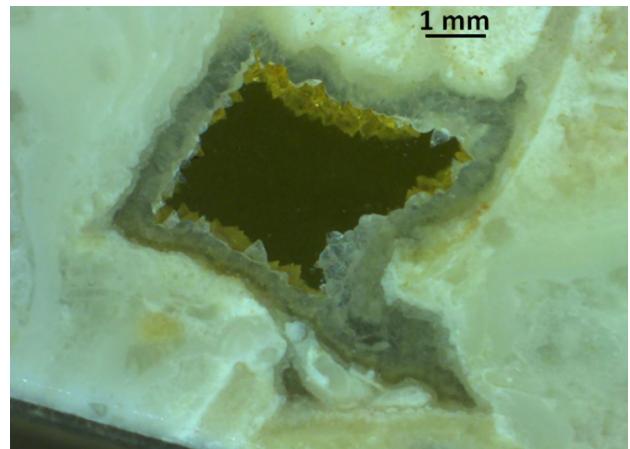
La ride d'Aves est un relief sous-marin d'une profondeur de plus de 1000 m, dont le point culminant, l'île d'Aves, est un petit banc sableux émergé de 2 mètres d'altitude pour 370 mètres de long et quelques dizaines de mètres de large. Cet ensemble est situé en mer des Caraïbes, entre l'Amérique du Sud et les Antilles

 Déterminer les conditions de formation des calcaires (actuellement) sous-marins de la ride d'Aves.

1 Photographies du calcaire issu du dragage au niveau de la ride d'Aves



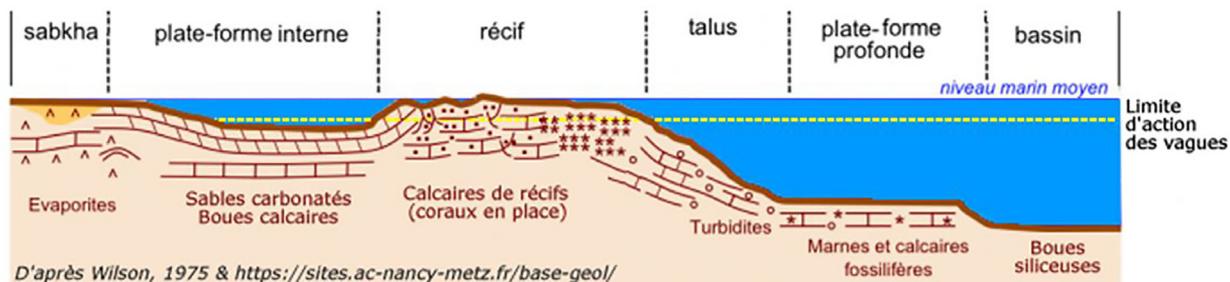
Photographie en lumière polarisée non analysée d'un calcaire récifal Oligo-Myocène
(F= foraminifère fossile ; P = pore)



Photographie de détail d'un pore du calcaire récifal (surface polie)

D'après photographies de J.J. Cornée et Ph. Münch, Université de Montpellier.

2 Environnements sous-marins et roches sédimentaires qui s'y forment

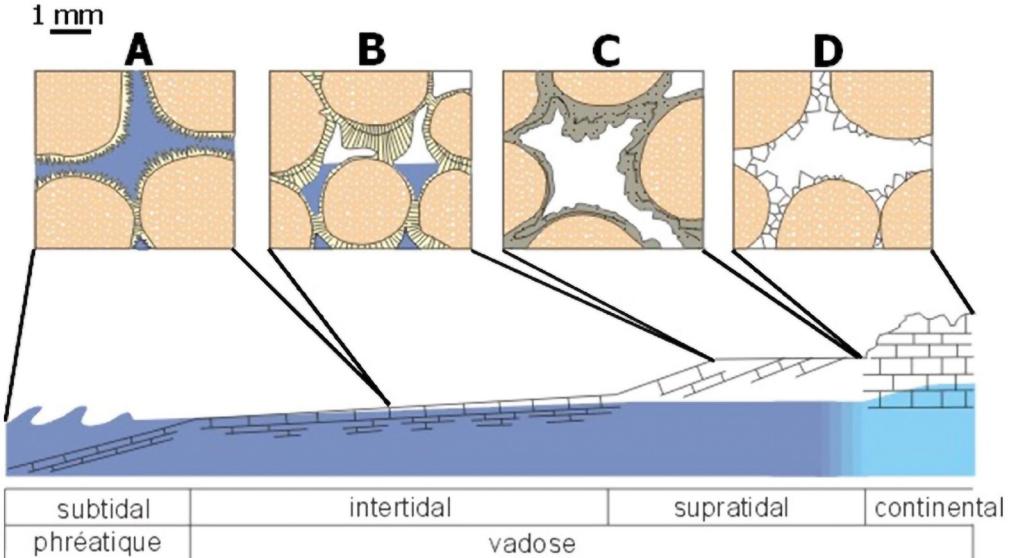


D'après Wilson, 1975 & <https://sites.ac-nancy-metz.fr/base-geol/>

3 Caractéristiques de cristallisation selon la position de la roche dans la zone vadose

La zone vadose ou zone non saturée (ZNS) du sol est la partie du sol et/ou du sous-sol située à l'interface entre atmosphère-sol et la nappe phréatique. Dans cette zone, les pores du sol sont partiellement remplis d'eau, le reste étant des gaz (le plus souvent de l'air)...

(D'après Wikipédia)

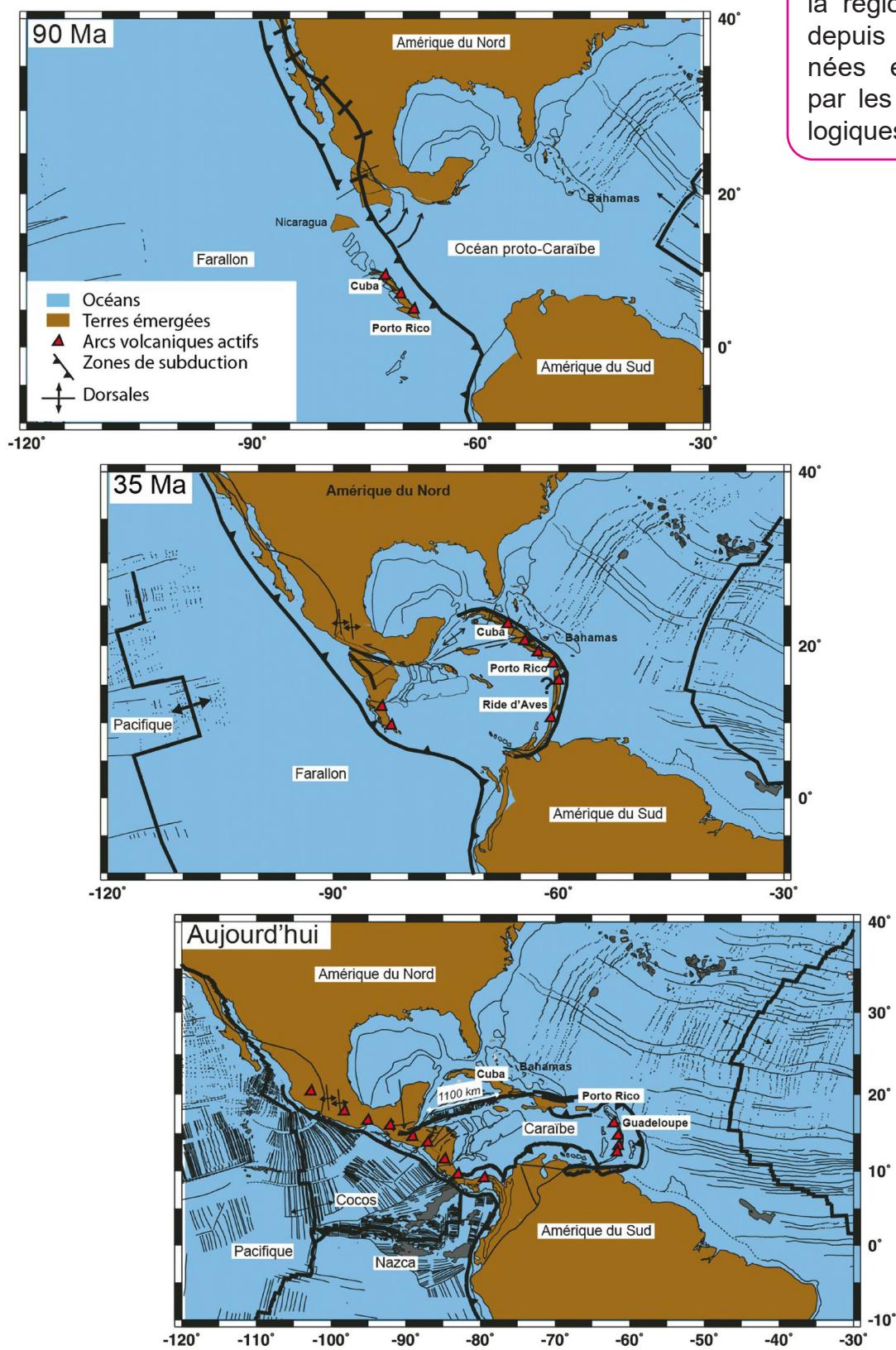


Modifié d'après <http://www.geosed.ulg.ac.be/sedim/diagenese.htm>

CORPUS - CONTEXTE GÉOLOGIQUE DES ANTILLES

1 Reconstitution du contexte géologique de la région des Caraïbes depuis 90 millions d'années

(D'après Paul Mann - *Geological Society of America Special Papers* 2007; 428; 1-19)



À partir des documents, expliquer l'évolution du contexte géologique de la région des Caraïbes depuis 90 millions d'années en argumentant par les marqueurs géologiques de ce contexte.

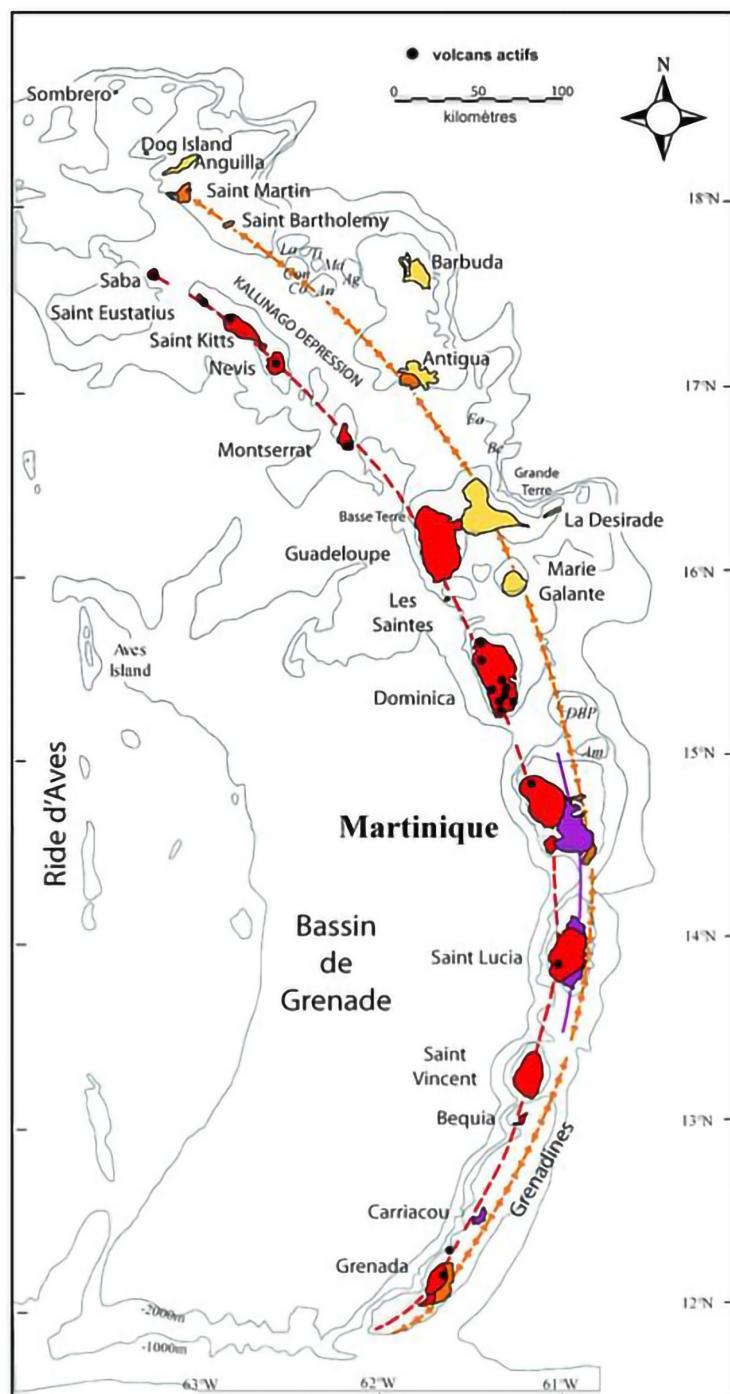
2 Le double arc volcanique des Antilles

L'arc ancien a été actif de l'Eocène à l'Oligocène avec l'émergence des îles de Grenade, Grenadines, Sainte-Lucie, Martinique, Marie-Galante, Grande-Terre de Guadeloupe, Antigua, Saint-Barthélemy, Saint-Martin, Anguilla et Dog. Au nord de la Martinique, les îles constituant cet arc sont recouvertes de calcaires car elles n'ont pas été le siège d'une activité volcanique depuis la fin de l'Oligocène, ce qui leur vaut d'être nommées Antilles Calcaires. (...)

Après une interruption relativement longue dans cette branche nord-est des Petites Antilles dès la fin de l'Oligocène, l'activité volcanique se poursuit, au cours du Miocène, uniquement sur les îles du sud recouvrant les dépôts plus anciens (Martinique à Grenade), mettant en jeu un arc intermédiaire (...).

Puis, vers 8 Ma, l'activité volcanique reprend tout le long de l'arc interne, plus à l'ouest que les arcs précédents. Le long du nouvel arc se sont formées les îles de Grenade, Grenadines, Saint-Vincent, Sainte-Lucie, Martinique, La Dominique, Les Saintes, Basse-Terre de Guadeloupe, Montserrat, Redonda, Nevis, Saint-Kitts, Saint-Eustache, Saba.

Aurélie Germa, *Evolution volcano-tectonique de l'île de la Martinique (arc insulaire des Petites Antilles) : nouvelles contraintes géochronologiques et géomorphologiques. Géologie appliquée. Université Paris Sud - Paris XI, 2008.*



Âges	Dépôts volcaniques	Calcaires	Arc volcanique
5 millions d'années - actuel	■		Actuel
23 à 5 millions d'années	■	■	Intermédiaire
56 à 23 millions d'années	■		Ancien

D'après Bouysses et Garrabé, 1984

CORPUS - CLIMATS ET ENVIRONNEMENT

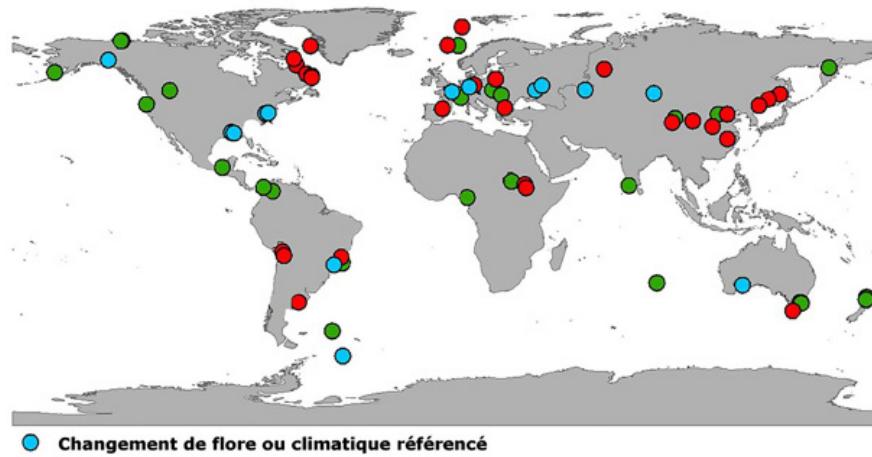
1 Modification des environnements lors de la transition Éocène - Oligocène (34 Ma)

Les températures terrestres reconstruites montrent pour de nombreuses régions un refroidissement qui a commencé bien avant cette transition et s'est poursuivi pendant le début de l'Oligocène.

« (...) Le modèle hétérogène de changement de végétation mondiale a été contrôlé par une combinaison de forçages multiples, tels que la tectonique, la chute du niveau de la mer et le déclin à long terme des concentrations de gaz à effet de serre à la fin de l'Éocène jusqu'au début de l'Oligocène, (...) ».

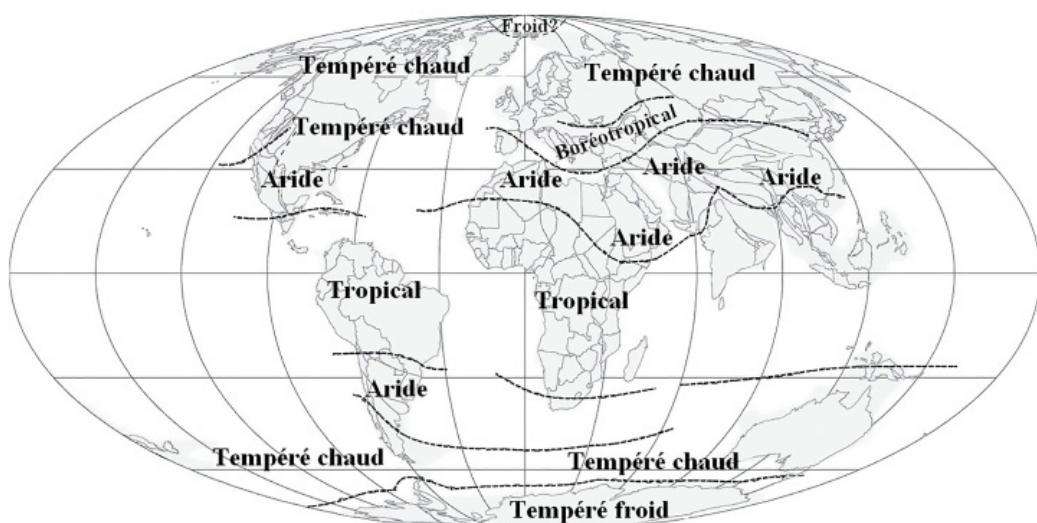
 À partir des documents, identifier des modifications environnementales ayant pu influencer la migration de groupes de Mammifères vers les Caraïbes.

Carte de sites étudiés présentant des archives géologiques de la transition Éocène - Oligocène

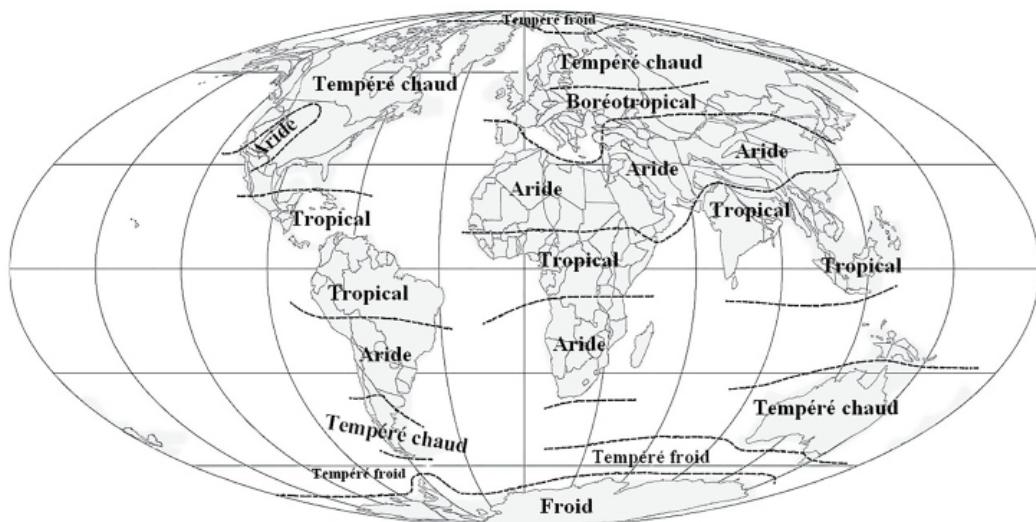


D'après <https://www.nature.com/articles/srep43386>

2 Reconstitution des zones paléoclimatiques lors de la transition Éocène - Oligocène



Éocène moyen et supérieur



Oligocène

D'après : Boucot et al. « Phanerozoic Paleoclimate: An Atlas of Lithologic Indicators of Climate - October 2013

Edition: Concepts in Sedimentology and Paleontology, no. 11, 478 pp. Publisher: SEPM (Society for Sedimentary Geology) Editor: Gary J. Nichols and Brian Ricketts ISBN: 978-1-56576-282-4 » https://www.researchgate.net/publication/263450893_Phanerozoic_Paleoclimate_An_Atlas_of_Lithologic_Indicators_of_Climate

Climat tropical : température moyenne mensuelle > 18°C, pas de « saison hivernale », précipitations > évaporation annuelle, végétation dense (jungle ou savane)

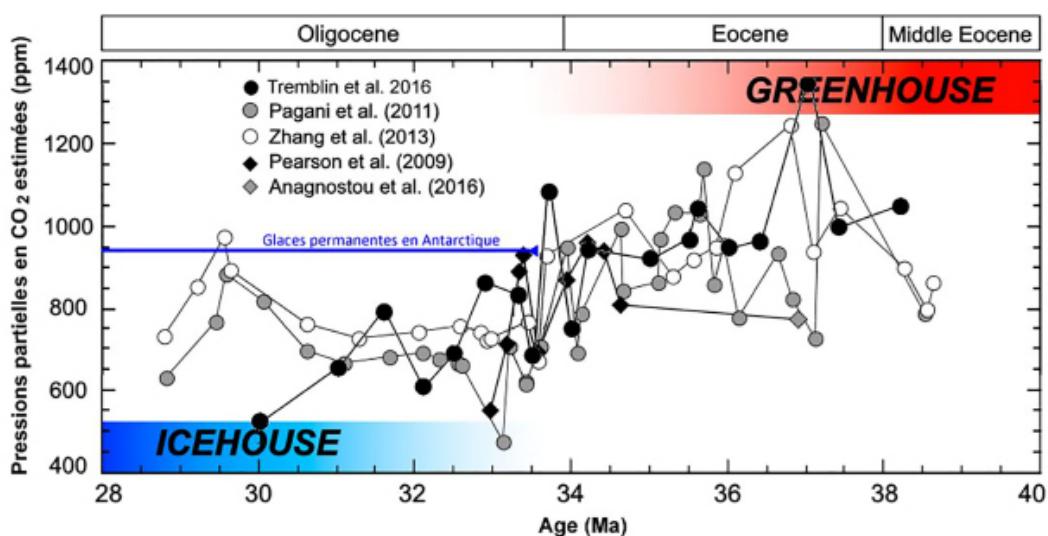
Climat boréo-tropical (paléoclimat) : absence de gelées et de déficit en eau, forêt tropicale.

Climat aride : faible pluviosité et importante évaporation, forte insolation. Il peut être chaud ou froid.

Climat tempéré : deux saisons marquées, l'une froide et l'autre chaude. Il peut aussi être chaud ou froid (températures inférieures à 0°C).

Climat froid : il est de haute latitude ou de haute altitude avec des températures froides.

3 Évolution de la pression partielle en CO₂ atmosphérique entre 40 et 28 Ma



D'après Ghirardi J. Impact de la transition climatique Eocène - Oligocène sur les écosystèmes continentaux : étude du bassin de Rennes. Université d'Orléans, 2016.

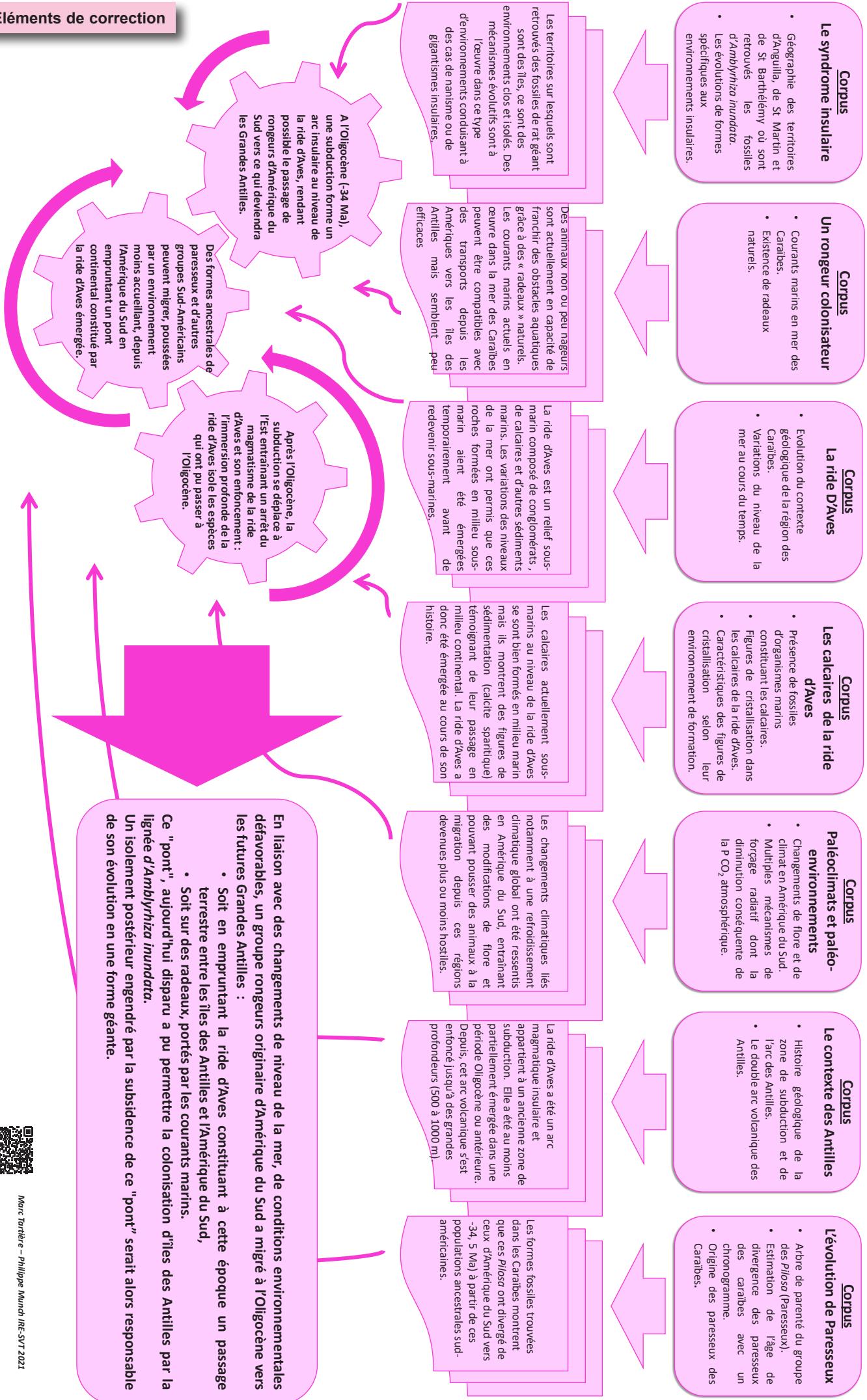
La période « icehouse » est définie par la présence de glaces permanentes aux pôles.

Diversification des espèces - Le cas d'*Amblyrhiza inundata*

On retrouve des fossiles d'un rongeur de la famille des Chinchillidae qui devait peser plus de 120 kg et être probablement de la taille d'un homme sur différentes îles des Antilles (Anguilla, St-Martin, St-Barthélemy).

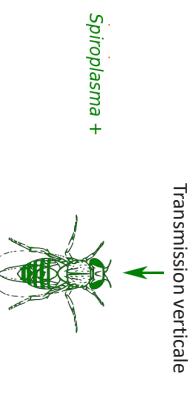
On cherche à comprendre comment cette espèce de rongeur originaire d'Amérique du Sud, a pu accéder puis se diversifier dans ces îles.

Éléments de correction



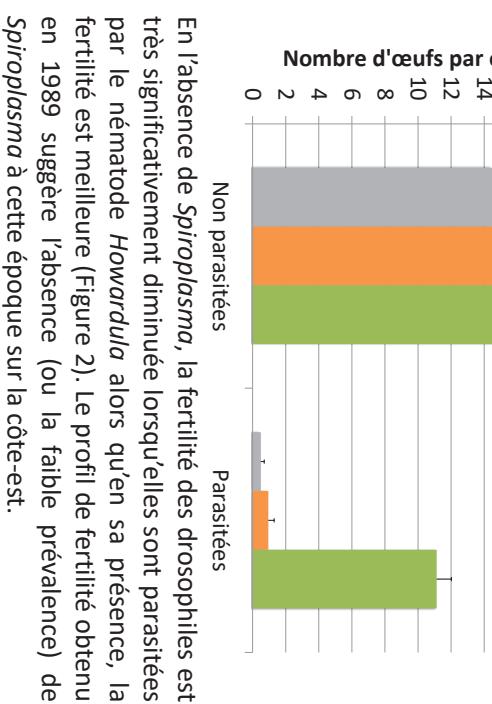


RÉCENTE EXPANSION DU SYMBIOTE "PROTECTEUR", *SPIROPLASMA* CHEZ UNE DROSOPHILE



Les symbiotes *Spiroplasma* se transmettent verticalement de la mère à sa descendance et jamais horizontalement.

Ces symbiotes contribuent donc à l'hérédité mais de manière uniparentale (Figure 1).

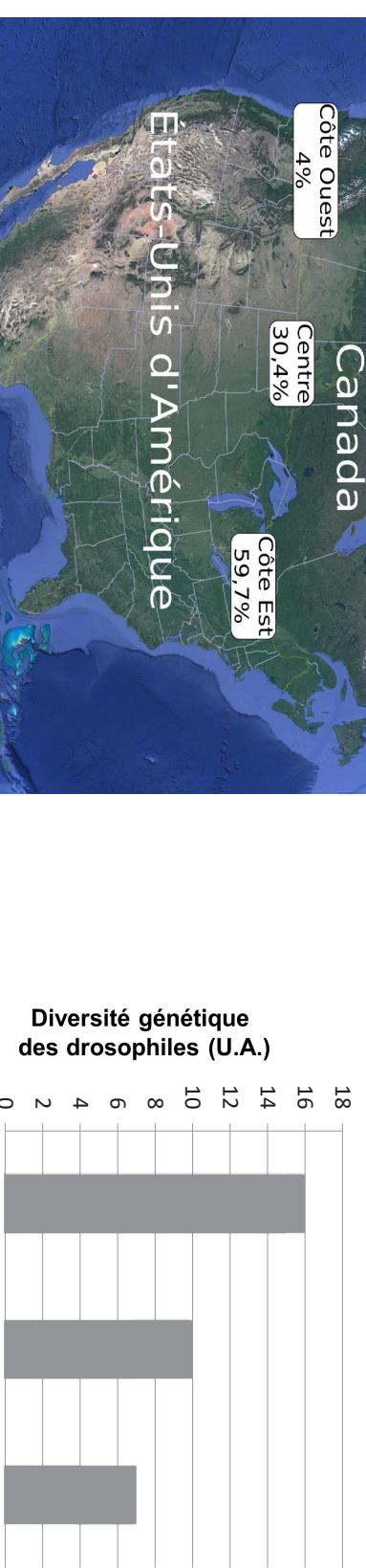


Les individus infectés par *Spiroplasma* sont favorisés, leurs gènes mieux transmis...

À partir d'une importante collecte de drosophiles, en Amérique du Nord, la prévalence de *Spiroplasma* et la diversité génétique (ADN mitochondrial) des drosophiles ont été évaluées.

Figure 4. Prévalence du symbiose *Spiroplasma* en Amérique du Nord en 2008

Figure 5. Répartition géographique de la diversité génétique des drosophiles



On observe, en 2008, que 59,7% des drosophiles de la côte est sont infectées par *Spiroplasma* (contre probablement très peu en 1989 voir figure 2). On observe également un gradient croissant d'ouest en est de prévalence du symbiose (Figure 4).

On observe un gradient décroissant d'ouest en est de la diversité génétique des drosophiles ce qui suggère une contre-sélection des génotypes non symbiotiques et une sélection positive des génotypes hôtes qui transmettent *Spiroplasma*.

En l'absence de *Spiroplasma*, la fertilité des drosophiles est très significativement diminuée lorsqu'elles sont parasitées par le nématode *Howardula* alors qu'en sa présence, la fertilité est meilleure (Figure 2). Le profil de fertilité obtenu en 1989 suggère l'absence (ou la faible prévalence) de *Spiroplasma* à cette époque sur la côte-est.

La mesure de la surface des femelles nématodes à l'intérieur des drosophiles montre que la présence de *Spiroplasma* impacte négativement la croissance et donc la capacité reproductive de celles-ci (Figure 3).

Conclusion

Les populations de *Drosophila neotestacea* nord-américaines révèlent une résistance inattendue aux effets stérilisants d'un ver nématode parasite. John Jaenike et ses collaborateurs ont établi que le maintien des capacités reproductives des drosophiles femelles était dû, en laboratoire comme en conditions naturelles, à la présence de la bactérie symbiotique *Spiroplasma* transmise par voie maternelle.

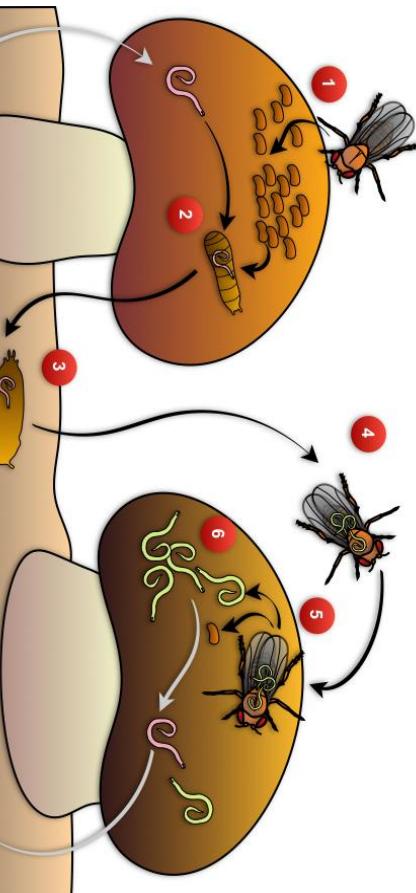
Cet exemple montre un processus de sélection naturelle en cours, sous l'influence d'un endosymbiose. La présence du symbiose *Spiroplasma* est sélectionnée positivement ce qui conduit à la modification de la diversité génétique de ces drosophiles américaines.

Récente expansion du symbiose « protecteur » *Spiroplasma* chez une drosophile

d'après l'article de Jaenike et al. « Adaptation via Symbiosis: Recent Spread of a *Drosophila* Defensive Symbiont », *Science* 329 :212-215 (2010)

A. Duncan¹, S. Mégevand², P. Roca³, O. Mégevand⁴, J. Ménardo⁵ & M. Rousselet⁵
 1. Institut des Sciences de l'Evolution de Montpellier, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE, 2. Lycée C.Bourquin, Argelès sur Mer,
 3. Collège La Côte Radieuse, Canet en Roussillon, 4. Lycée Déodat de Séverac, Céret, 5. Lycée A. Maillol, Perpignan

Cycle de vie du nématode parasite *Howardula*



- 1 Ponte des œufs par la drosophile.
- 2 Infestation par une femelle nématode fécondée (« motherworm ») de la larve de drosophile par pénétration à travers la cuticule.
- 3 Persistance du nématode jusqu'au stade pupe.
- 4 Croissance rapide du nématode femelle et début de prolifération des larves de nématode dans la cavité générale de la drosophile.
- 5 Contamination du champignon par les larves du nématode via l'ovipositeur de la drosophile ou par ses excréments, lorsque celle-ci visite le champignon.
- 6 Accouplement des nématodes mâles et femelles à l'intérieur du champignon.

Ce nématode parasite a pour hôtes des drosophiles et des champignons. Le nématode se sert des drosophiles comme source de nourriture mais également comme vecteur d'un champignon à un autre (dans lesquels ils se nourrissent également). Les drosophiles infestées par *Howardula* voient leur fertilité extrêmement réduite, elles sont quasiment rendues stériles par la présence du parasite.

L'endosymbiose *Spiroplasma* protège les drosophiles de l'effet stérilisant du nématode

Figure 1. Mode de transmission de *Spiroplasma*

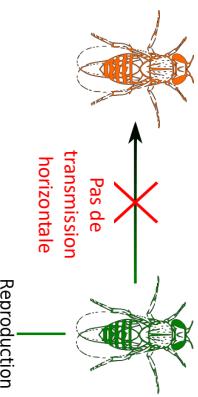


Figure 2. Influence de *Spiroplasma* sur la fertilité des drosophiles parasitées ou non par le nématode

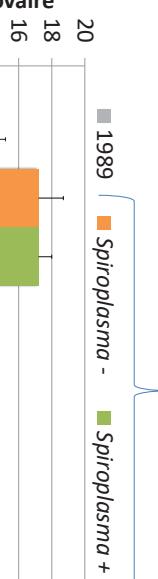
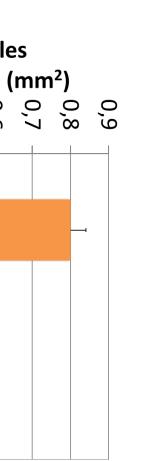


Figure 3. Influence de *Spiroplasma* sur la croissance du nématode parasite dans la drosophile



DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Mesure de la capacité reproductive des drosophiles

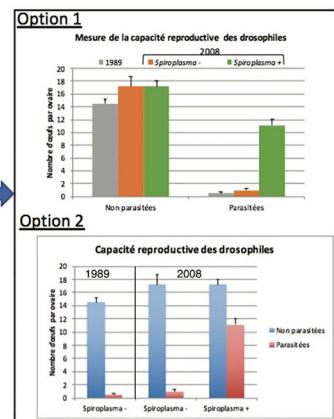
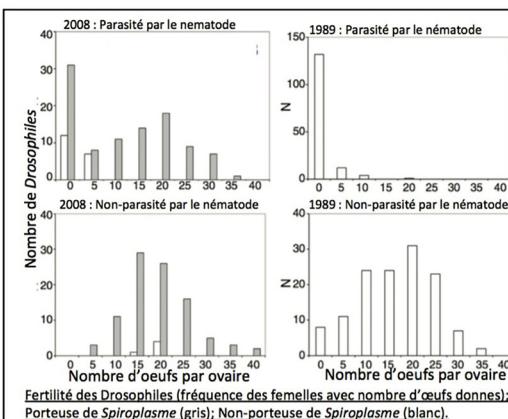
Après lecture de l'article de référence, nous avons d'abord cherché à définir les termes. Les auteurs ont compté le nombre d'œufs présents dans les ovaires des drosophiles porteuses ou non du ver parasite (nematode) et de la bactérie *Spiroplasma*. La présentation de ce résultat ne nous paraissait pas satisfaisante dans la mesure où les données sont fournies sous forme du nombre de drosophiles en fonction de classes indiquant un nombre d'œufs avec une incrémentation de 5. Nous avons donc décidé de faire la moyenne de la quantité d'œufs par ovaire avec une unique classe qui réunit tous les effectifs de drosophile pour chaque cas : parasitées ou non en 1989 et parasitées ou non et porteuses ou non de *Spiroplasma* en 2008.

Nous nous sommes posé la question de la présentation du nouveau jeu de données en deux groupes, « non parasitées » et « parasitées », ou en trois groupes, « *Spiroplasma-* » en 1989, « *Spiroplasma-* » et

Le travail de didactisation

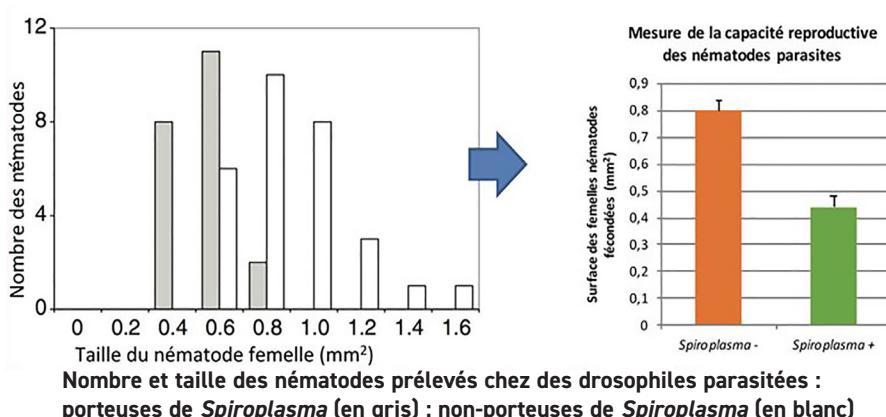
- Mesure de la capacité reproductive des drosophiles.
- Impact de la présence de la bactérie *Spiroplasma* sur la capacité reproductive du parasite nématode.
- Mode de transmission du parasite et de la bactérie *Spiroplasma*.
- Diversité génétique et répartition de la fréquence de la symbiose.
- Production du modèle d'évolution de la proportion de drosophiles porteuses ou non de *Spiroplasma*.

« *Spiroplasma+* » en 2008. La seconde solution demande une réflexion plus poussée pour prélever les informations utiles, nous proposons que le premier graphique puisse être utilisé en classe de seconde et le second graphique en classe de terminale.



Impact de la présence de la bactérie *Spiroplasma* sur la capacité reproductive du nématode

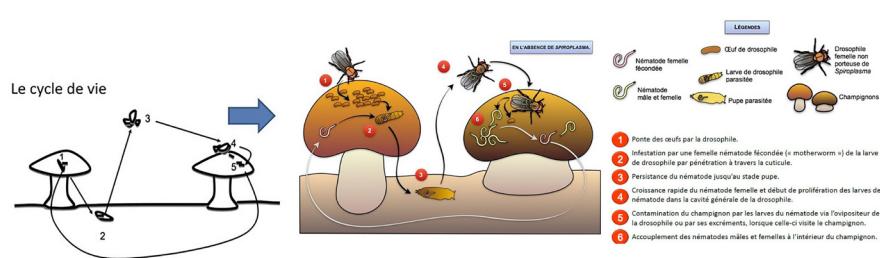
Les données ont été traitées de la même manière que dans le point précédent.



Mode de transmission du parasite et de la bactérie *Spiroplasma*

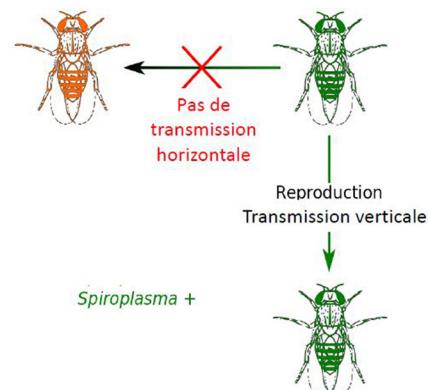
Le schéma montrant le mode de transmission du parasite était donné en « supplementary data » et était très succinct et peu attrayant. Nous l'avons plus détaillé à partir des informations données dans le texte de l'article et avons essayé de le rendre plus attractif.

Aucun schéma montrant le mode de transmission vertical de la bactérie *Spiroplasma* n'était disponible. Nous avons trouvé judicieux d'en réaliser un pour aider à la compréhension. De manière plus générale, il ne faut pas hésiter à traduire un texte en un schéma explicatif.



evolve defenses against these nematode parasites.
D. neotestacea is also infected with two maternally transmitted bacterial endosymbionts, *Spiroplasma* and *Wolbachia*, neither of which acts as a reproductive parasite in this species (20). To test whether the endosymbionts confer defense against nematode parasites, we exposed

Finally, the *Spiroplasma* infection status of flies carrying different mitochondrial haplotypes reveals a *Spiroplasma* infection not yet at species-level equilibrium. We previously found a perfect association between *Spiroplasma* haplotype and mitochondrial DNA (mtDNA) haplotype within Rochester, New York, populations of *D. neotestacea*, indicating that horizontal transmission of *Spiroplasma* is rare or nonexistent (20). Consequently, mtDNA variation can be used to infer



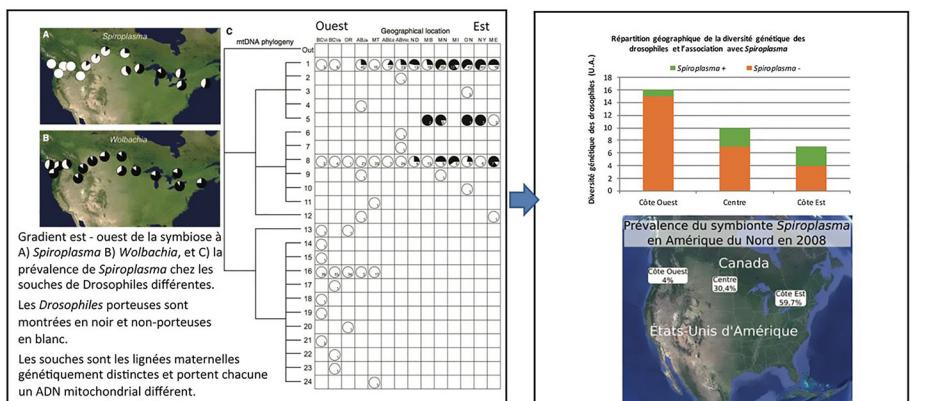
Diversité génétique et répartition de la fréquence de *Spiroplasma*

La notion d'haplotype (portion d'un même chromosome transmise en bloc à la descendance, sans recombinaison possible) est une notion éventuellement abordée dans le programme de spécialité de SVT de la classe de première. Elle a été substituée ici par l'appellation « diversité génétique » des drosophiles. La figure d'origine était très informative mais trop complexe pour permettre aux élèves de la comprendre. Nous avons donc regroupé les données sous forme de classes regroupant plusieurs zones géographiques.

S'est alors posée la question du nombre de classes à utiliser. Rapidement, une solution à 3 et 4 classes semblait pertinente et la solution à 4 classes nous est apparue moins claire pour montrer la perte de diversité en haplotypes avec l'augmentation de la proportion de drosophiles porteuses de la bactérie *Spiroplasma*. Nous avons repris l'excellente idée présentée dans l'article consistant à placer sur une

carte les données.

Notre version perd en précision par rapport aux données sources, cependant, elle permet d'appréhender un des messages phare de l'article qui est le gradient est-ouest de la prévalence de la symbiose.



Concernant l'extraction de données chiffrées, nous avons graphiquement lu les proportions de porteuses et non porteuses en mesurant les angles pour chaque camembert. Cela a été fastidieux mais indispensable.

Production du modèle d'évolution de la proportion de drosophiles porteuses ou non de *Spiroplasma*

Cette étape a été réalisée avec l'aide de Jean-Pierre Ménardo enseignant de Mathématiques retraité.

Capacité reproductive

$$k = (\text{prévalence} \times QwP + (1-\text{prévalence}) \times QwNP) \times 2$$

k : capacité reproductive dans une population (unité : nombre d'œufs par femelle)

prévalence : prévalence de parasitisme par le ver *Howardula* (nématode)

QwP : quantité d'œufs par ovaire chez les drosophiles parasitées

QwNP : quantité d'œufs par ovaire chez les drosophiles non parasitées

Évolution des proportions au sein de la population

Pour les drosophiles *Spiroplasma*-

$$P'_{n+1} = \frac{k_{Spiro-} \times P'_n}{k_{Spiro-} \times (1 - P'_n) + k_{Spiro+} \times P'_n} \times 100$$

Pour les drosophiles *Spiroplasma*+

$$P_{n+1} = \frac{k_{Spiro+} \times P_n}{k_{Spiro-} \times P_n + k_{Spiro+} \times (1 - P_n)} \times 100$$

Pn : proportion de drosophiles non porteuses de *Spiroplasma* à la génération n

P'n : proportion de drosophiles porteuses de *Spiroplasma* à la génération n

kSpiro- : capacité reproductive des drosophiles femelles non porteuses de *Spiroplasma*

kSpiro+ : capacité reproductive des drosophiles femelles porteuses de *Spiroplasma*

Remarque : Pn + P'n = 100%, aussi, plutôt que de rentrer les deux formules, la proportion de *Spiroplasma*+ peut être calculée avec la formule P'n = 1 - Pn.

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

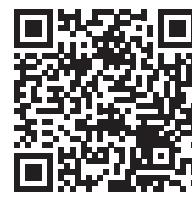
Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/spiro/POSTER_spilo.pdf



Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/spiro/docs_spilo.zip



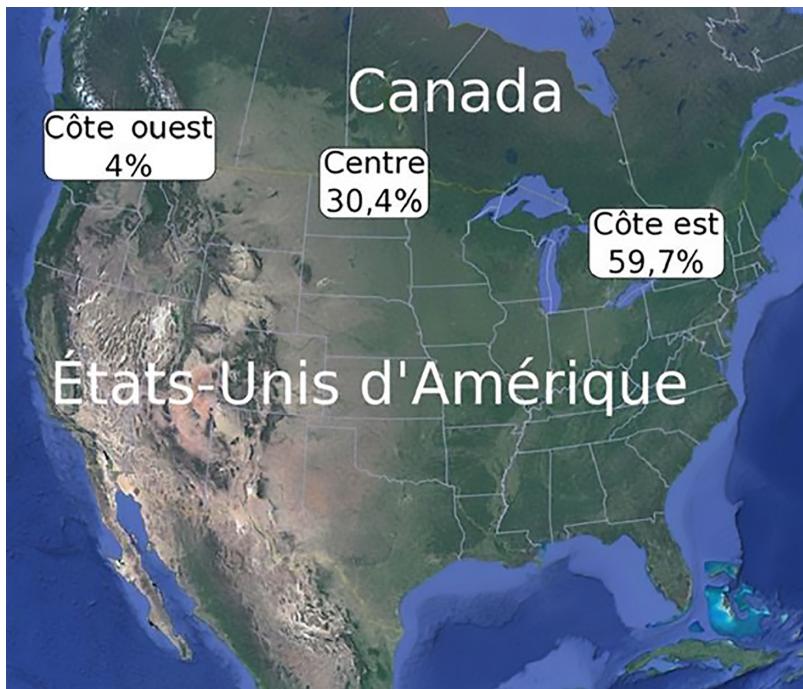
LA PROPAGATION DE DROSOPHILES PORTEUSES D'UNE BACTÉRIE SYMBIOTIQUE : UN EXEMPLE DE SÉLECTION NATURELLE

Objectif

Cet exemple peut être intégré à la présentation des forces évolutives en seconde, où il permet l'utilisation d'un tableur calculant une simulation fournie clé en main.

Mise en situation

En Amérique du Nord, la mouche du vinaigre, *Drosophila neotestacea*, est parasitée par un ver, le nématode *Howardula aoronymphium*. Ces mêmes drosophiles peuvent être porteuses d'une bactérie, *Spiroplasma*. En 2008, les chercheurs constatent que de plus en plus de drosophiles sont porteuses de la bactérie *Spiroplasma*. La prévalence de cette bactérie semble progresser d'est en ouest.



Expliquer pourquoi, avec le temps, on observe une forte augmentation de la proportion de drosophiles porteuses de la bactérie *Spiroplasma* en direction de la côte ouest en Amérique du Nord.

Pour cela, établir un modèle d'évolution théorique en utilisant les informations du document et une simulation de l'évolution d'une population de drosophile à l'aide d'un tableur.

La réponse devra être présentée sous forme d'un texte argumenté obligatoirement accompagné du graphique.

Programme

- L'évolution de la biodiversité au cours du temps s'explique par des forces évolutives s'exerçant au niveau des populations. La sélection naturelle résulte de la pression du milieu et des interactions entre les organismes. Elle conduit au fait que certains individus auront une descendance plus nombreuse que d'autres dans certaines conditions.

Notion fondamentale

- Maintien des formes aptes à se reproduire, hasard / aléatoire, sélection naturelle.

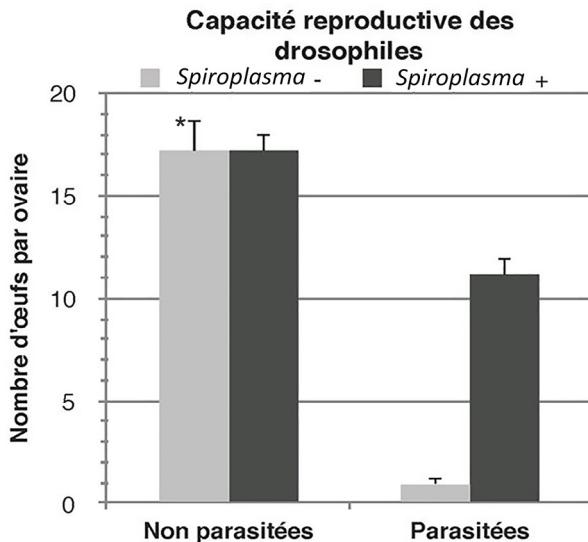
Capacités

- Utiliser un logiciel de modélisation et / ou extraire et mettre en relation des informations pour illustrer la sélection naturelle et la dérive génétique sur des temps courts.

Prérequis

- Acquis de collège sur la sélection naturelle et ses conséquences peuvent être remobilisés en amont (classe inversée...) ou présentés sous forme d'aide dans l'optique d'une tâche complexe.

1 Impact de la présence de la bactérie et/ou du parasite sur la fertilité des drosophiles : un "ménage à trois"



La drosophile étudiée et le ver parasite *Howardula* sont présents dans toute l'Amérique du Nord, contrairement à la bactérie *Spiroplasma* principalement présente sur la côte est. Des études ont montré que la proportion de drosophiles parasités par le ver *Howardula* (prévalence moyenne) est de 0,233.

Les chercheurs se sont intéressés à l'impact de la présence du parasite *Howardula* et de la bactérie *Spiroplasma* sur la fertilité des drosophiles.

* Les barres au dessus des histogrammes, sont une indication de la distribution des valeurs autour de la moyenne.

Exploitation des données dans un tableur

- On considère une population dans laquelle 0,01% de drosophiles sont porteuses de la bactérie *Spiroplasma*.
 - Extraire les données nécessaires du document 1 afin de compléter les cellules du fichier "Spiroplasma.xls" dont le fond est jaune et uniquement celle-ci.
 - Une fois toutes les données correctement entrées, les valeurs correspondant à l'évolution de la proportion de drosophiles porteuses (*Spiroplasma+*) et non porteuses (*Spiroplasma-*) seront calculées par le tableur.
- À l'aide des données ainsi obtenues et de la fiche technique du tableur, réaliser le graphique représentant l'évolution de la proportion de drosophiles porteuses ou non de *Spiroplasma* en fonction du nombre de générations.



Production attendue

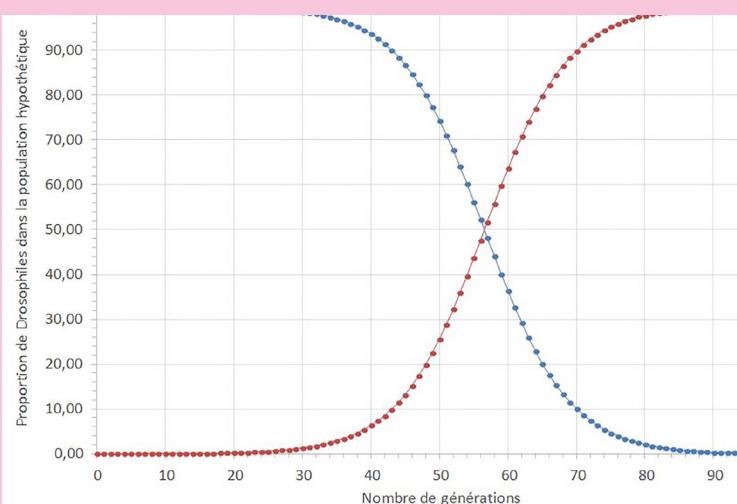
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1										
2	Génération	Spiroplasma -	Spiroplasma +		Prévalence du parasitisme		Spiroplasma -	Spiroplasma +		
3	0	0,99	0,01		0,233		Non parasitées	Parasitées	Non parasitées	Parasitées
4	1	0,99	0,01			Quantité d'œufs par ovarie	17	1	17	11
						Capacité reproductive	26,54			31,20

La lecture du graphique du document 1 permet de relever les nombres d'ovules produits par les ovaires des différentes drosophiles étudiées, le texte fournit la prévalence moyenne.

Le graphique attendu correspond au document 4 de la proposition d'exercice de Terminale proposée après.

Interprétation

Les drosophiles porteuses de la bactérie *Spiroplasma* se reproduisent mieux lorsque le parasite *Howardula* est présent que les drosophiles sans *Spiroplasma*. Cet avantage pour les drosophiles porteuses de *Spiroplasma*, dans un contexte où le parasite est présent dans près d'un quart des individus, entraîne une meilleure reproduction de ceux-ci et donc une augmentation des individus porteurs jusqu'à ce qu'à la 90ème génération, tous les individus soient théoriquement porteurs. On peut dire que les individus porteurs de *Spiroplasma* ont été sélectionnés par rapport à ceux qui ne sont pas porteurs.



EXERCICE DE TYPE 2 : UN SYMBIOSE CONTRE UN PARASITE...

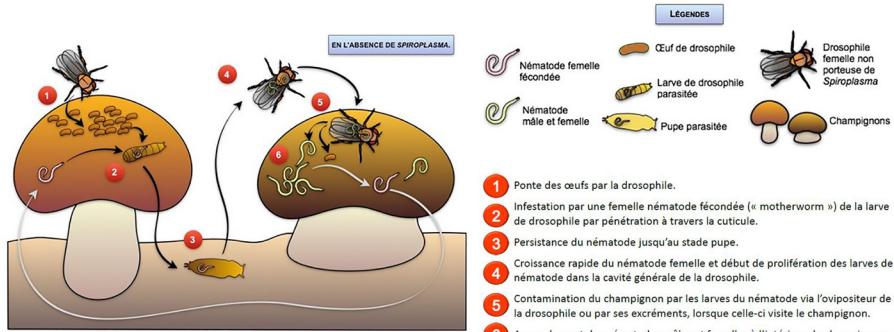
Objectif

Cet exercice, proposé sous la forme du second exercice de l'épreuve terminale du baccalauréat, porte sur une partie de programme qui n'est exigible que pour l'oral. Il pourra facilement être remis en forme comme tâche complexe, et le cas échéant intégrer l'activité de simulation sur tableau proposée en classe de 2^{nde}. Les éléments de correction correspondent aux textes du poster.

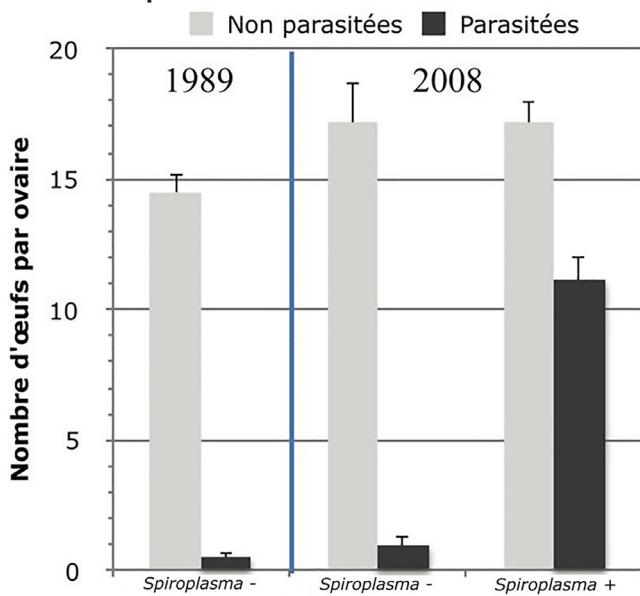
Mise en situation

Les populations de *Drosophila neotestacea* nord-américaines, en symbiose avec la bactérie *Spiroplasma*, présentent une résistance inattendue aux effets d'un ver nématode parasite, *Howardula aoronymphium*. Ce processus de sélection naturelle, actuellement en cours, conduit à la modification de la diversité génétique de *Drosophila neotestacea*.

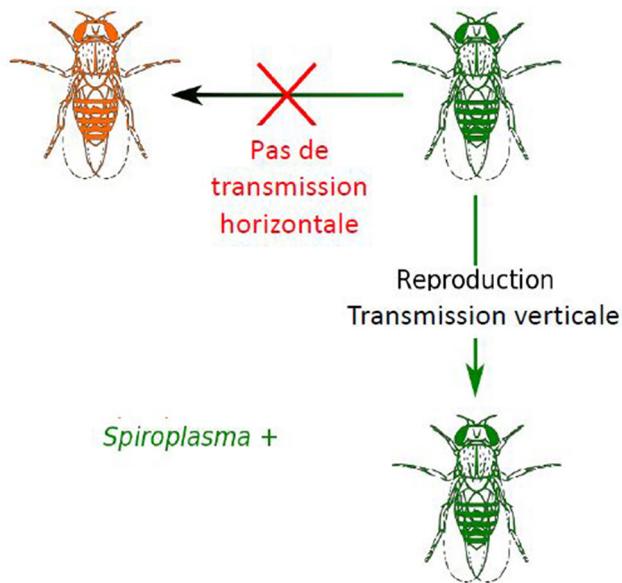
1 Interaction entre le développement de la drosophile et celui du nématode parasite



2 Mesure de la quantité d'œufs mûrs par ovaires chez la drosophile



3 Mode de transmission de la bactérie *Spiroplasma*



Programme

- La diversification phénotypique des êtres vivants n'est pas uniquement due à la diversification génétique. D'autres mécanismes interviennent : associations non héréditaires (pathogènes ou symbiotes ; cas du microbiote acquis).

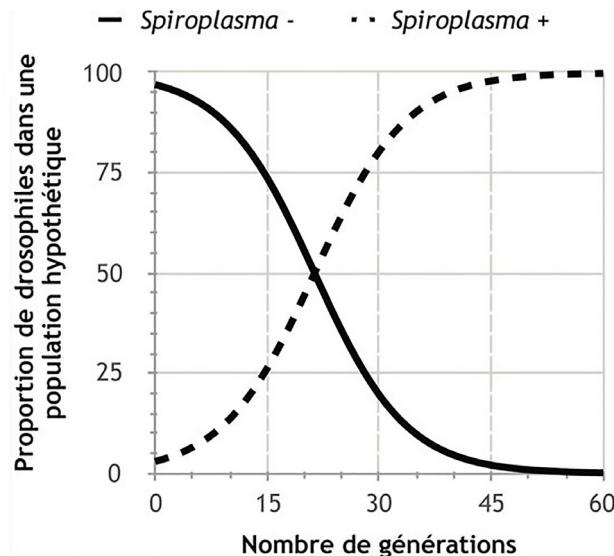


Expliquer en quoi la bactérie *Spiroplasma* confère un avantage sélectif aux drosophiles dans le cadre de la symbiose face au parasite.

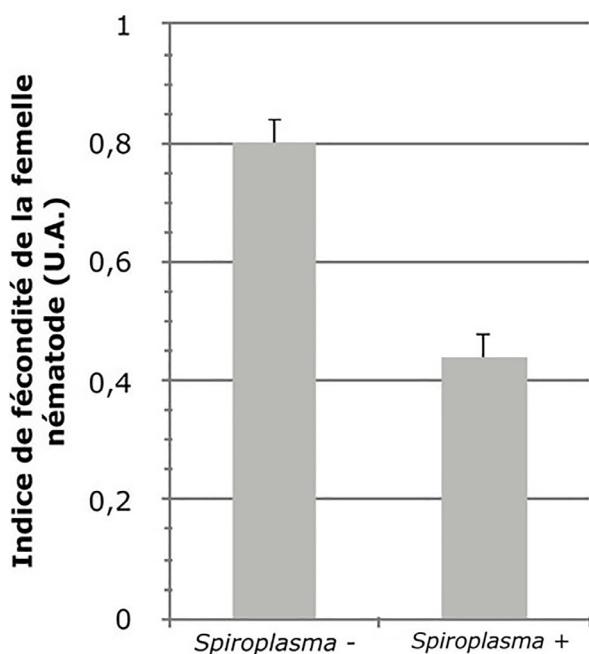
Organiser la réponse selon une démarche au choix en intégrant des données des documents et les connaissances utiles.

4 Simulation de l'évolution de la proportion de drosophiles porteuses ou non de *Spiroplasma* au sein d'une population initiale théorique parasitée à 23,3% par le nématode *Howardula*

Population initiale théorique : drosophiles d'Amérique du Nord dont 3% sont porteuses de la bactérie *Spiroplasma*.

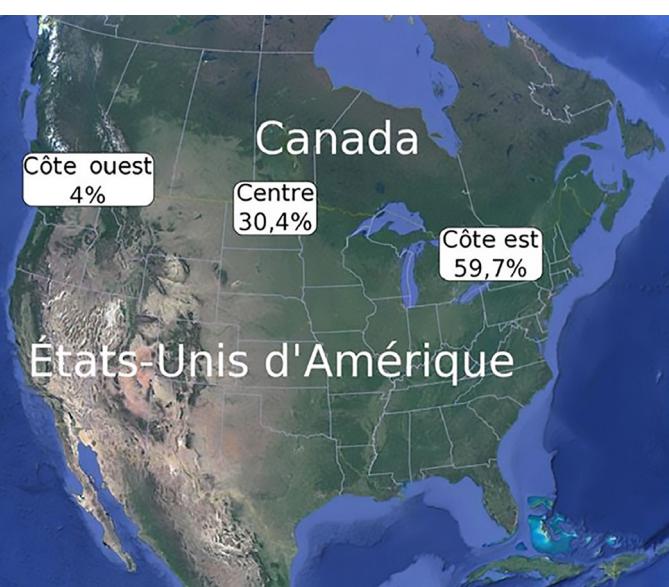
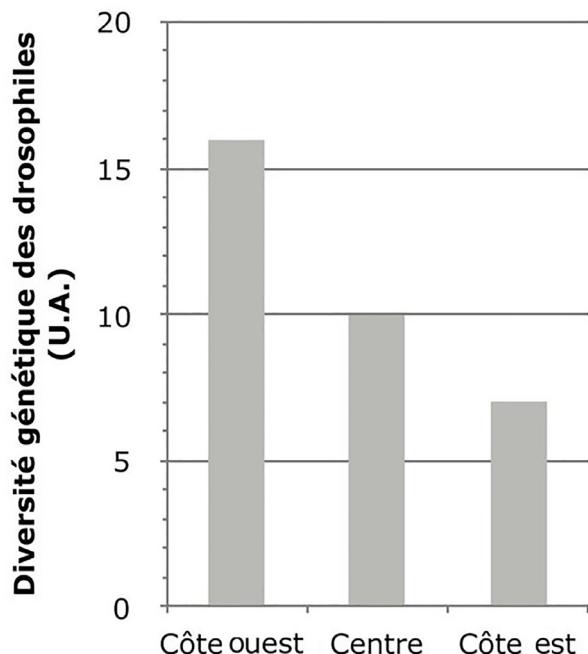


5 Impact de la présence de la bactérie *Spiroplasma* sur la fécondité du nématode *Howardula* parasitant la drosophile



6 Expansion d'est en ouest de la symbiose et conséquences génétiques chez la drosophile

6a : répartition géographique de la diversité génétique des drosophiles





L'ÉVOLUTION EN DIRECT DE LA RÉSISTANCE AUX ANTIBIOTIQUES CHEZ *Escherichia coli*

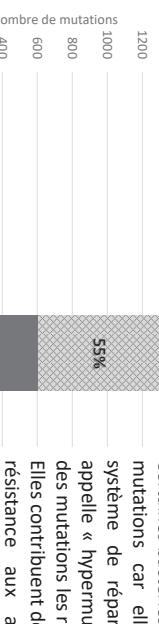
Début expérience → Passage dans Bande 2 → Passage dans Bande 3 → Passage dans Bande 4 → Passage dans Bande 5

A 1400

Nombre de mutations
1200
1000
800
600
400

Certaines bactéries accumulent beaucoup de mutations car elles sont mutées sur le système de réparation de l'ADN. On les appelle « hypermutatrices ». L'accumulation des mutations les rendent peu compétitives. Elles contribuent donc à l'évolution de la résistance aux antibiotiques à l'échelle populationnelle.

En revanche, les bactéries ayant un système de réparation de l'ADN fonctionnel montrent moins de mutations mais ces mutations sont plus souvent non-synonymes et peuvent donc contribuer à l'adaptation (Figure 5A).



Certaines bactéries accumulent beaucoup de mutations car elles sont mutées sur le système de réparation de l'ADN. On les appelle « hypermutatrices ». L'accumulation des mutations les rendent peu compétitives. Elles contribuent donc à l'évolution de la résistance aux antibiotiques à l'échelle populationnelle.

En revanche, les bactéries ayant un système de réparation de l'ADN fonctionnel montrent moins de mutations mais ces mutations sont plus souvent non-synonymes et peuvent donc contribuer à l'adaptation (Figure 5A).

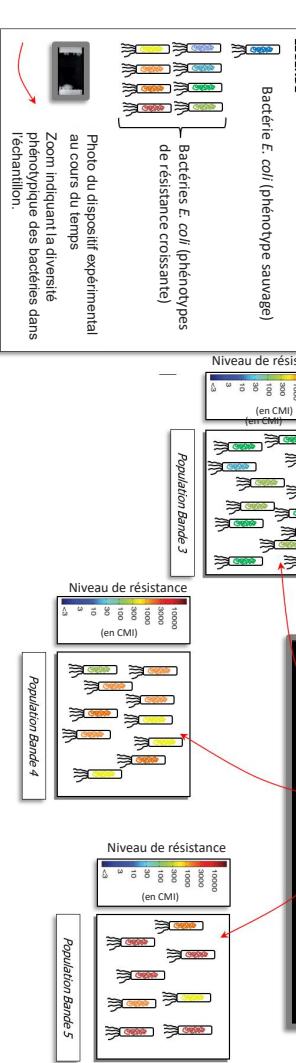
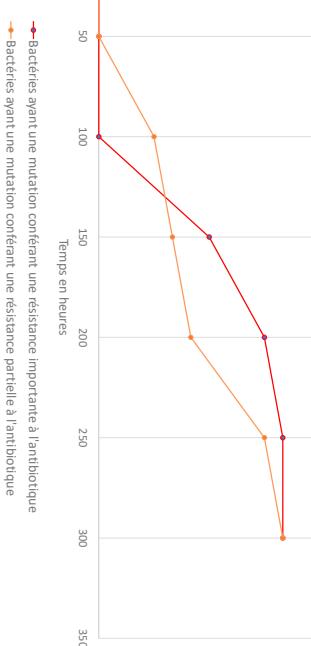


Figure 4. Une adaptation initiale des bactéries à des concentrations faibles et intermédiaires d'antibiotiques facilite l'apparition d'une adaptation à de fortes concentrations en antibiotiques.



→ Bactéries ayant une mutation conférant une résistance partielle à l'antibiotique

Conclusions

Les expériences mises en œuvre permettent l'étude en direct de l'évolution de la résistance aux antibiotiques par les mécanismes de mutations et de sélection naturelle.

En effet, la résistance observée est liée à l'apparition de **mutations au hasard** qui sont sélectionnées (donc augmentent en fréquence) lorsqu'elles confèrent un **avantage sélectif** dans des environnements de plus en plus riches en antibiotiques. Cette étude permet également de mettre en évidence la part du **hasard**, donc de la **dérive**, quand certaines lignées se voient barrer le passage par d'autres lignées pas forcément plus résistantes aux antibiotiques.

Au niveau génomique, deux grands **types de mécanismes de résistance** ont été révélés : des bactéries dont l'ultrarésistance aux antibiotiques engendre un coût (retard de croissance), d'autres partiellement résistantes aux antibiotiques mais dont la croissance est restaurée par des mutations qui compensent ce déficit de croissance.

La sélection de phénotypes adaptés à une grande concentration d'antibiotiques ne peut se faire que si les concentrations d'antibiotiques augmentent progressivement. Une forte dose d'antibiotique appliquée sur des phénotypes sauvages ne peut mener à la sélection de phénotypes résistants.

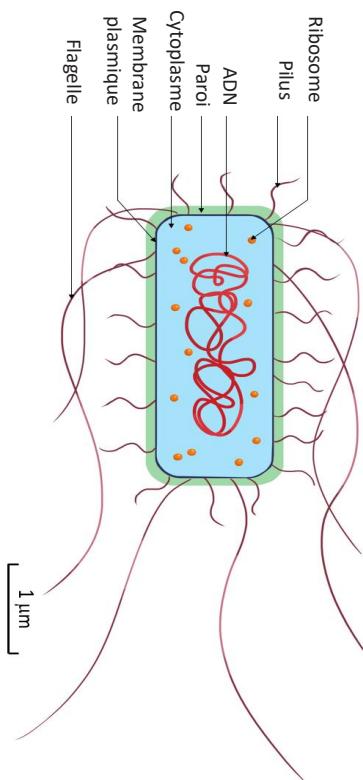
L'évolution en direct de la résistance aux antibiotiques

D'après l'article Baym et al. « Spatiotemporal microbial evolution on antibiotic landscapes » *Science*, 6304: p1147-1151 (2016)

M. Sicard¹, F. Martin², F. Giret³, S. Lohezic³, M. Michaud³, G. Robaston³,
1. ISEM, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE, Montpellier; 2. Collège Mont Duplan, Nîmes 3. Lycée Jean Vilar, Villeneuve-lez-Avignon

Le modèle d'étude : *Escherichia coli*

Figure 1. Schéma simplifié d'une cellule d'*Escherichia coli*



E. coli (Figure. 1) est une bactérie notamment présente dans le microbiote intestinal. Habituellement **bénéfique**, elle peut devenir **pathogène** dans certaines conditions.

BENEFICES

- Elle intervient dans le métabolisme de la vitamine K.
- Elle est nécessaire au bon développement et à la maturation du système immunitaire.
- Elle aide la paroi du tube digestif à jouer un rôle de barrière vis-à-vis des agents infectieux en luttant directement contre la colonisation du tube digestif par des espèces pathogènes, par phénomène de compétition et par production de substances bactéricides (bactériocines).

DANGERS

- Dans le tube digestif, certaines souches peuvent modifier l'équilibre du microbiote et causer des gastro-entérites.
- En cas de passage dans d'autres compartiments de l'organisme, elles peuvent devenir pathogènes : infections urinaires, septicémies...

Principe de l'expérience

La « MEGA-plate » correspond à une grande boîte de Petri rectangulaire remplie d'une gélose noire présentant un gradient d'antibiotique⁽¹⁾ croissant des extrémités vers le centre.

Des *E. coli* de type « sauvage » sont inoculées de chaque côté de la gélose. Puis, l'expansion bactérienne est suivie au cours du temps dans les différentes bandes (Figure 2).



Le prélèvement des bactéries dans les différentes bandes a permis une analyse de leur phénotype (en termes de résistance aux antibiotiques) ainsi que de leur génotype (par séquençage haut-débit).

La grande dimension du dispositif a l'avantage de permettre l'étude d'une grande population de bactéries et de son évolution à travers des conditions environnementales changeantes (concentration d'antibiotique croissante, Figure 2).

⁽¹⁾ Le Triméthoprime inhibe spécifiquement l'enzyme DHFR (*Dihydrofolate réductase*) qui intervient dans la synthèse des bases azotées de l'ADN.

Résultats expérimentaux

Figure 3. Changements phénotypiques dans les populations bactériennes au cours du temps dans la MEGA-plate

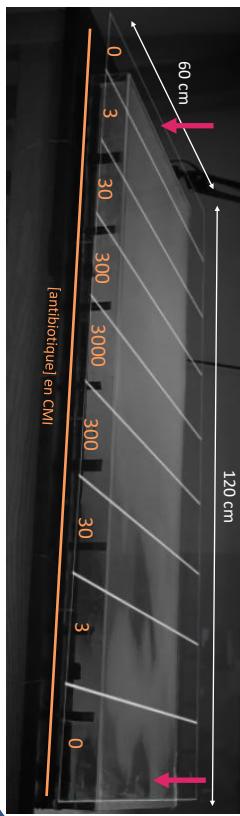


Figure 2. Photo du dispositif MEGA⁽²⁾-plate à neuf bandes

Les flèches correspondent aux points d'inoculation d'*E. coli*. 1 unité de CMU (Concentration Minimale Inhibitrice) permet d'inhiber la croissance de la souche « sauvage » initiale

⁽²⁾MEGA = Microbial Evolution Growth Arena

● Suivi de l'expansion bactérienne

Figure 5. Relation génotype/phénotype au sein du gradient croissant d'antibiotique

- A. Distribution des mutations synonymes et non synonymes
- B. Localisation des mutations adaptatives

C. Deux « stratégies » de croissance en fonction des types de mutants

[] Zone montrant que des bactéries de forte résistance aux antibiotiques peuvent voir leur progression bloquée.

[] Ce blocage est lié à une colonisation plus rapide du milieu par des bactéries de plus faible résistance aux antibiotiques.

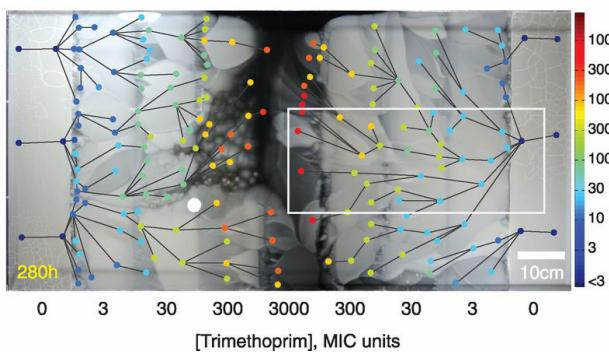
DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Présenter davantage le modèle biologique.
- Illustrer l'évolution des fréquences des phénotypes de résistance dans les populations bactériennes.
- Rendre accessibles des données génomiques complexes.

Modèle biologique et illustration à l'échelle phénotypique

Dans l'introduction, nous avons volontairement accentué les différentes conséquences possibles des interactions entre les bactéries du microbiote et leurs hôtes. C'est-à-dire que nous avons souligné les aspects bénéfiques de l'infection par *Escherichia coli* en particulier dans le tube digestif. C'est un parti pris qui permet d'insister sur la nature bénéfique voire nécessaire et non pas seulement néfaste des micro-organismes. Nous avons également ajouté une illustration d'*Escherichia coli* (figure 1 du poster) afin de montrer aux élèves qu'un organisme unicellulaire peut se déplacer grâce à des flagelles.



Nous avons par ailleurs souligné le mode d'action du Triméthoprime, antibiotique en particulier utilisé lors d'infections urinaires sévères, qui consiste à inhiber l'action de la dihydrofolate réductase qui intervient dans le métabolisme du folate.

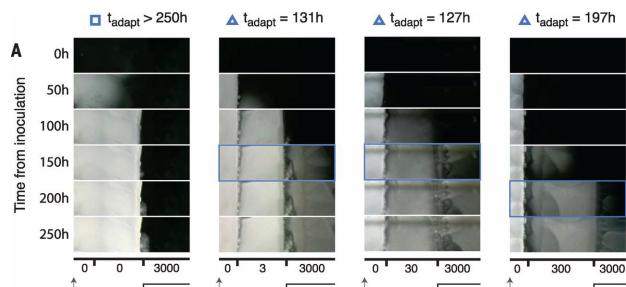
Le dispositif MEGA-Plate a été représenté de façon fidèle sans réelle adaptation car il nous semblait accessible dès le cycle 4 (figure 2 du poster inspirée de la figure 1a de l'article).

En revanche, nous avons apporté à la figure 1b de l'article beaucoup d'illustrations supplémentaires qui permettent de comprendre les résultats d'évolution des populations bactériennes dans ce dispositif. En particulier, il nous a semblé primordial de souligner que ce ne sont pas les mêmes individus bactériens qui traversent les différents paysages antibiotiques. Pour cela, dans la figure 3 du poster, nous avons illustré le polymorphisme phénotypique bactérien présent dans les différentes zones de concentra-

tions variables en antibiotique grâce à l'utilisation de différentes couleurs qui illustrent le polymorphisme de résistance mesuré par CMI (Concentration Minimale Inhibitrice). Les proportions des différents phénotypes de résistance dans les différents cartouches de l'illustration sont totalement arbitraires mais permettent de comprendre que seule une partie des individus exprime les phénotypes de résistance croissante. Ce polymorphisme permet à la population bactérienne de progresser dans un "paysage antibiotique" changeant.

A l'aide d'une MEGA-plate de « fin d'expérience » c'est-à-dire quand l'évolution a pu se dérouler pendant 12 jours, nous avons choisi de souligner la nature buissonnante des différents chemins évolutifs par lesquels la population bactérienne initiale s'adapte du fait de la pression de sélection exercée par les concentrations d'antibiotique. Nous avons souligné la part du hasard dans la progression d'une lignée bactérienne plutôt qu'une autre en montrant une situation où la progression d'un phénotype plus résistant est stoppée par celle d'un phénotype moins résistant.

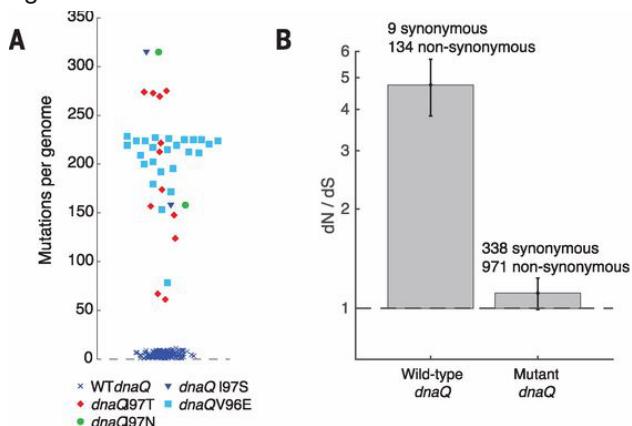
La figure 4 (que nous avons construite à partir de la figure 2a de l'article) permet de montrer aux élèves que l'évolution de la résistance n'est possible que lorsque que la pression de sélection antibiotique est progressive. Un traitement massif et durable empêche toute évolution de la résistance dans la MEGA-plate.



La partie gauche du poster (figures 3 et 4) qui s'intéresse à l'échelle phénotypique est entièrement accessible au cycle 4 et présente les prérequis nécessaires à la figure 5 dédiée au cycle terminal.

Didactisation des données génomiques

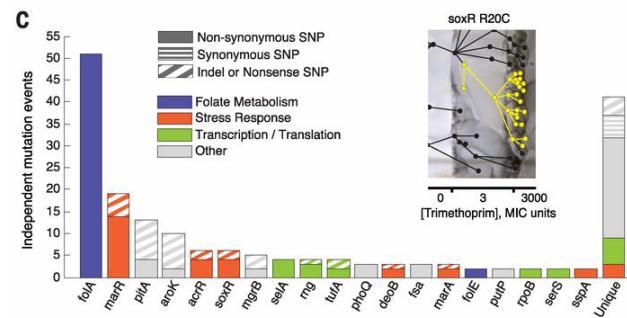
Pour aborder la diversité génétique à l'origine de des résistances, nous avons synthétisé les résultats des figure 3a et b pour construire la figure 5a.



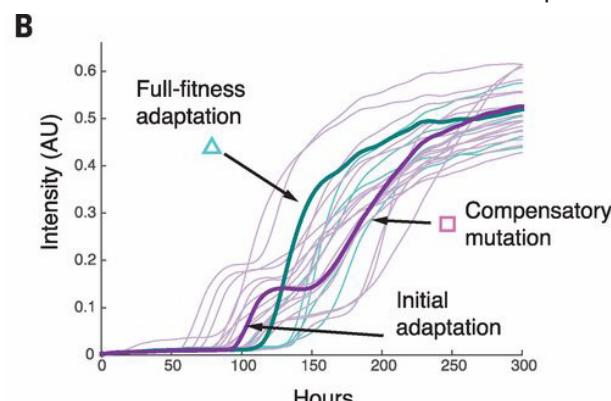
La figure 3a de l'article montre que des bactéries ayant muté sur le système de réparation de l'ADN (dnaQI97T, I97N, I97S, V96E) sont « hypermutatrices » c'est-à-dire qu'elles montrent beaucoup plus de mutations que la souche sauvage (WT_{dnaQ}). La figure 3b de l'article permet d'avoir accès au nombre de mutations chez les hypermutatrices (1309 chez les mutants dnaQ) comparé à celui des bactéries ayant un système de réparation fonctionnel (143 chez les wild-type dnaQ). C'est pour la proportion de mutations synonymes (que l'on peut également appeler silencieuses) au sein de l'ensemble des mutations que nous avons fait la plus grosse simplification au service de la compréhension. Nous avons choisi de prendre en compte le ratio dN/dS qui est l'indicateur le plus fiable de la probabilité d'apparition de mutations non-synonymes. Cependant celui-ci nous est apparu trop complexe à expliquer à des élèves de cycle terminal. La figure 5a du poster permet donc de montrer que le nombre de mutations est plus important dans les bactéries hypermutatrices mais que c'est dans les bactéries ayant un système de réparation de l'ADN fonctionnel que la proportion des mutations non synonymes, donc potentiellement adaptatives, est la plus importante.

Pour réaliser la figure 5b nous avons simplement

rassemblé les mutations, permettant la résistance par grandes catégories alors que la figure 3c de l'article nommait les différents gènes impliqués dans les phénomènes de résistance principale (folA c'est-à-dire "métabolisme du folate") ou accessoire.



Pour construire la figure 5c nous avons retenu les valeurs moyennes de la figure 4b de l'article. Elle permet de montrer qu'une résistance similaire se met en place par des voies différentes plus ou moins rapidement grâce à des mutations qui compensent progressivement le déficit de croissance de la population bactérienne en milieu riche en antibiotique.



Ces mutations qui permettent de croître plus malgré les pressions d'antibiotique, compensent le coût de la résistance ou/et augmentent encore la résistance. Les résultats présentés dans cette figure ont été obtenus par un protocole similaire à celui décrit dans le poster mais avec un autre antibiotique (la Ciprofloxacine).

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/Ecoli/POSTER_Ecoli.pdf



Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/Ecoli/docs_Ecoli.zip



EXEMPLE D'ACTIVITÉ SPÉCIALITÉ PREMIÈRE

SÉQUENCE 1 CHOIX DU BON ANTIBIOTIQUE

Mise en situation

Maïa Folate est un bébé joufflu de 18 mois qui respire la joie de vivre. Elle vit avec ses parents dans une banlieue cosse de San Juan. Elle est reçue aujourd'hui par le chef des internes du service des urgences San José

Hospital car depuis quelques jours la petite fille ne mange pas bien, pleure beaucoup par intermittence et a beaucoup de fièvre. Il diagnostique une infection urinaire provoquée par la bactérie *Escherichia coli*.

Ressources

Liste des antibiotiques disponibles.

Matériel expérimental :

- boîte de Petri ;
- solution de gélose (support de culture neutre) ;
- solutions d'antibiotiques ;
- flacon contenant un échantillon de l'urine de Maïa ;
- matériel de laboratoire usuel.

Pour des raisons d'évitement d'acquisition de résistance aux antibiotiques et de sécurité, tous les produits proposés pour la manipulation sont de substitution.

La manipulation est donc une modélisation de la situation réelle. On peut effectuer une lecture des résultats qualitative (visuelle) ou quantitative en mesurant le diamètre de décoloration (avec une règle ou Mesurim).

Programme

- Thème : corps humain et santé, variation génétique et santé

Objectif de connaissance

- Disponibilité en antibiotiques et santé publique.
- Variation génétique bactérienne et résistance aux antibiotiques.

Compétences

- Pratiquer des démarches scientifiques : concevoir, créer, réaliser.
- Adopter un comportement éthique et responsable.

Prérequis

- Éléments de fonctionnement du système immunitaire humain.



Proposer un traitement efficace à prescrire à Maïa.

Évaluation des compétences

Compétences	Critères de réussite	Évaluation
Pratiquer des démarches scientifiques	<ul style="list-style-type: none">• La problématique est comprise et prise en compte.• La stratégie élaborée permet de répondre à la problématique.• Les ressources sont utilisées dans le but de répondre à la question.• La réponse apportée est en adéquation avec l'ensemble des informations récoltées.	Tous les critères sont validés.
		Des aides ont été nécessaires pour l'avancée de la démarche.
		Des problèmes de cohérence sont intervenus et ont été résorbés par des aides majeures.
		L'accompagnement à la résolution a été nécessaire de bout en bout de la démarche.
Concevoir, créer, réaliser	<ul style="list-style-type: none">• Le protocole proposé est en accord avec l'objectif fixé et les matériels proposés.• Le protocole est réalisable.• La réalisation s'est faite dans le respect des consignes de sécurité et de bonne utilisation du matériel.• Un résultat a été obtenu sans aide.	Tous les critères sont validés.
		Protocole et/ou manipulation obtenus avec de l'aide.
		Protocole fourni ou aide majeure à la réalisation de la manipulation.
		Protocole fourni et aide majeure à la réalisation de la manipulation.

1 Liste des antibiotiques disponibles

Informations

Sont indiqués en rose (couleur à supprimer avant de donner le document aux élèves) ceux qui sont susceptibles de pouvoir être retenus par les élèves dans le cadre d'une expérimentation et donc de donner des résultats positifs à l'antibiogramme.

Les autres (dont la liste peut être raccourcie), soit ne présentent pas d'efficacité (résultat négatif au test) soit présentent des modes d'admission ou des restrictions d'usages incompatibles avec le cas présenté.

Molécule (classe antibiotique)	Principales indications
Amoxicilline (Pénicilline)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> • aérobies à Gram positif : <i>Corynebacterium diphtheriae</i>, <i>Enterococcus faecalis</i>, <i>Erysipelothrix rhusiopathiae</i>, <i>Listeria monocytogenes</i>, <i>Nocardia asteroides</i>, <i>Streptococcus bovis</i>, <i>Streptococcus pneumoniae</i> ; • aérobies à Gram négatif : <i>Actinobacillus actinomycetemcomitans</i>, <i>Bordetella pertussis</i>, <i>capnophaga</i> spp. (1), <i>Eikenella</i> spp., <i>Escherichia coli</i>, <i>Haemophilus influenzae</i>, <i>Haemophilus parainfluenzae</i>, <i>Helicobacter pylori</i>, <i>Neisseria gonorrhoeae</i>, <i>Neisseria meningitidis</i>, <i>Pasteurella multocida</i>, <i>Proteus mirabilis</i>, <i>Salmonella</i> spp., <i>Shigella</i> spp., <i>Streptobacillus moniliformis</i>, <i>Vibrio cholerae</i> ; • anaérobies : <i>Actinomyces</i> spp., <i>Clostridium</i> spp., <i>Enterobacterium</i> spp., <i>Fusobacterium</i> spp., <i>Peptostreptococcus</i> spp., <i>Porphyromonas</i> spp., <i>Prevotella</i> spp., <i>Prevotella</i>, <i>Propionibacterium acnes</i>, <i>Veillonella</i> spp. ; • autres : <i>Bartonella</i> spp., <i>Borrelia</i> spp., <i>Leptospira</i> spp., <i>Treponema</i> spp. <p>Mode d'admission : oral.</p>
Imipénem (Carbapénem)	<p>Espèces sensibles : bactéries essentiellement à Gram négatif.</p> <p>Utilisation réservée à l'hôpital - Mode d'admission : intraveineuse.</p>
Aztréonam (Monobactam)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> • aérobies à gram négatif : <i>Branhamella catarrhalis</i>, <i>Citrobacter freundii</i>, <i>Citrobacter koseri</i>, <i>Enterobacter</i> spp., <i>Escherichia coli</i>, <i>Haemophilus influenzae</i>, <i>Klebsiella</i>, <i>Morganella morganii</i>, <i>Neisseria</i> spp., <i>Proteus mirabilis</i>, <i>Proteus vulgaris</i>, <i>Providencia</i> spp., <i>Pseudomonas aeruginosa</i>, <i>Salmonella</i> spp., <i>Serratia</i> spp., <i>Shigella</i> spp., <i>Versinia</i> spp. <p>Utilisation réservée à l'hôpital. Mode d'admission : intraveineuse.</p>
Ceftriaxone (Céphalosporine)	<p>Utilisé dans le traitement des méningites bactériennes et de certaines infections graves, notamment des poumons, des oreilles, de l'abdomen, des voies urinaires et des reins, des os et des articulations, de la peau et du cœur ; pour traiter des infections sexuellement transmissibles (gonococcie, syphilis). Ce médicament ne doit pas être mélangé ou co-administré avec des solutions contenant du calcium.</p> <p>Mode d'admission : intramusculaire.</p>
Tobramycine (Aminoside)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> • aérobies à Gram positif : <i>Corynebacterium</i> spp., <i>Listeria monocytogenes</i>, <i>Staphylococcus aureus</i> ; • aérobies à Gram négatif : <i>Acinetobacter baumanii</i>, <i>Branhamella catarrhalis</i>, <i>Campylobacter</i> spp., <i>Citrobacter freundii</i>, <i>Citrobacter koseri</i>, <i>Enterobacter aerogenes</i>, <i>Enterobacter cloacae</i>, <i>Escherichia coli</i>, <i>Haemophilus influenzae</i>, <i>Klebsiella</i> spp., <i>Morganella morganii</i>, <i>Proteus mirabilis</i>, <i>Proteus vulgaris</i>, <i>Pseudomonas aeruginosa</i>, <i>Salmonella</i> spp., <i>Serratia</i> spp., <i>Shigella</i> spp., <i>Yersinia</i> spp. <p>Le mode d'admission est par voie injectable sauf :</p> <ul style="list-style-type: none"> • dans la prise en charge d'infections de l'œil ou de ses annexes → voie locale ; • dans la prise en charge d'infections pulmonaires dues à <i>Pseudomonas aeruginosa</i> → voie inhalée.
Vancomycine (Glycopeptide)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> • aérobies à Gram positif : <i>Bacillus</i> spp., <i>entérocoques</i> spp., <i>Listeria</i> spp., <i>Rhodococcus equi</i>, <i>Staphylococcus non aureus</i>, <i>Streptococcus pneumoniae</i> ; • anaérobies : <i>Clostridium</i> spp., <i>Eubacterium</i> spp., <i>Peptostreptococcus</i> spp., <i>Propionibacterium acnes</i>.

Métacycline (Cycline)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> aérobies à Gram positif : <i>Bacillus</i> sp., <i>Enterococcus</i> sp., <i>Staphylococcus méti-S</i>, <i>Staphylococcus méti-R</i>, <i>Streptococcus A</i>, <i>streptococcus B</i>, <i>Streptococcus pneumoniae</i> ; aérobies à Gram négatif : <i>Branhamella catarrhalis</i>, <i>Brucella</i> spp., <i>Escherichia coli</i>, <i>Haemophilus influenzae</i>, <i>Klebsiella</i> spp., <i>Neisseria gonorrhoeae</i>, <i>Pasteurella</i> spp., <i>Vibrio cholerae</i> ; anaérobies : <i>Propionibacterium acnes</i> ; autres : <i>Borrelia burgdorferi</i>, <i>Chlamydia</i> spp., <i>Coxiella burnetti</i>, <i>leptospira</i> spp., <i>Mycoplasma pneumoniae</i>, <i>Rickettsia</i> spp., <i>Treponema pallidum</i>, <i>Ureaplasma urealyticum</i>. <p>Les cyclines ne doivent pas être utilisées à partir du 4^{ème} mois de la grossesse et chez l'enfant de moins de huit ans, en raison d'un risque de coloration des dents.</p> <p>Mode d'admission : oral.</p>
Ciprofloxacine (Quinolone)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> aérobies à Gram positif : <i>Bacillus anthracis</i>, <i>Enterococcus faecalis</i>, <i>Staphylococcus</i> spp. ; aérobies à Gram négatif : <i>Aeromonas</i> spp., <i>Brucella</i> spp., <i>Citrobacter koseri</i>, <i>Francisella tularensis</i>, <i>Haemophilus ducreyi</i>, <i>Haemophilus influenzae</i>, <i>Legionella</i> spp., <i>Moraxella catarrhalis</i>, <i>Neisseria meningitidis</i>, <i>pasteurella</i> spp., <i>Salmonella</i> psp., <i>Shigella</i> spp., <i>vibrio</i> spp., <i>Yersinia pestis</i>, <i>Acinetobacter baumannii</i>, <i>Burkholderia cepacia</i>, <i>Campylobacter</i> spp., <i>Citrobacter freundii</i>, <i>Enterobacter aerogenes</i>, <i>Enterobacter cloacæ</i>, <i>Escherichia coli</i>, <i>Klebsiella oxytoca</i>, <i>Klebsiella pneumoniae</i>, <i>Morganella morganii</i>, <i>Neisseria gonorrhoeæ</i>, <i>Proteus vulgaris</i>, <i>Providencia</i> spp., <i>Pseudomonas aerigosa</i> ; <i>Proteus aeruginosa</i>, <i>Pseudomonas fluorescens</i>, <i>Serratia marcescens</i> ; anaérobies : <i>Mobiluncus</i> spp., <i>Peptostreptococcus</i> spp., <i>Propionibacterium acnes</i> ; autres : <i>Chlamydia trachomatis</i>, <i>Chlamydia pneumoniae</i>, <i>Mycoplasma hominis</i>, <i>Mycoplasma pneumoniae</i>. <p>Mode d'admission : oral.</p>
Azithromycine (Macrolide)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> aérobies à Gram positif : <i>Bacillus cereus</i>, <i>Corynebacterium diphtheriae</i>, <i>Enterococcus</i> spp., <i>Rhodococcus equi</i>, <i>Staphylococcus</i> spp., <i>Streptococcus</i> spp. ; aérobies à Gram négatif : <i>Bordetella pertussis</i>, <i>Branhamella catarrhalis</i>, <i>Campylobacter</i> spp., <i>Legionella</i> spp., <i>Moraxella</i> spp. ; anaérobies : <i>Actinomyces</i> spp., <i>Eubacterium</i> spp., <i>Mobiluncus</i> spp., <i>Peptostreptococcus</i> spp., <i>Porphyromonas</i> spp., <i>Prevotella</i> spp., <i>Propionibacterium acnes</i> ; autres : <i>Borrelia burgdorferi</i>, <i>Chlamydia</i> spp., <i>Coxiella</i> spp., <i>Leptospires</i> spp., <i>Mycoplasma pneumoniae</i>, <i>Treponema pallidum</i>. <p>Il s'agit des traitements de référence des germes intracellulaires qui sont indiqués dans les infections ORL, de la peau, des organes génitaux.</p> <p>Mode d'admission : oral</p>
Cotrimoxazole (Sulfamid)	<p>Infection à <i>Pneumocystis jiroveci</i> ; infections urogénitales, prostatite, cystite ; otite, sinusite, Infection bronchopulmonaire, infection digestive ; fièvre typhoïde.</p> <p>Ce médicament ne convient pas à l'enfant de moins de 12 ans.</p> <p>Mode d'admission : oral</p>
Triméthoprime (Diaminopyrimidine)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> aérobies à Gram positif : <i>Corynebacterium</i> spp., <i>Enterococcus</i> spp., <i>Listeria</i> spp. <i>Staphylococcus aureus</i>, <i>Streptococcus pneumoniae</i> ; aérobies à Gram négatif : <i>Citrobacter freundii</i>, <i>Enterobacter</i>, <i>Escherichia coli</i>, <i>Haemophilus</i> spp., <i>Klebsiella</i> spp., <i>Morganella</i> spp., <i>Pasteurella</i> spp., <i>Proteus</i> spp., <i>Salmonella</i> spp., <i>Shigella</i> spp. ; anaérobies : <i>Peptostreptococcus</i> spp. ; autres : <i>Mycobacterium</i> spp., <i>Borrelia</i> spp., <i>Isospora belli</i>, <i>Pneumocystis carinii</i>, <i>Spirochètes</i>, <i>toxoplasma</i> spp. <p>Mode d'admission : oral.</p>
Ornidazole (Nitro-5-imidazolé)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> anaérobies : <i>Bacteroides fragilis</i>, <i>Bifidobacterium</i> spp., <i>Bilophila</i> spp., <i>Clostridium difficile</i>, <i>Clostridium perfringens</i>, <i>Eubacterium</i> spp., <i>Fusobacterium</i> spp., <i>Peptostreptococcus</i> spp., <i>Prevotella</i> spp., <i>Porphyromonas</i> spp., <i>Veillonella</i> spp. <p>Mode d'admission : oral.</p>
Nitrofurantoïne (Nitrofurane)	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> aérobies à Gram positif : <i>Enterococcus faecalis</i>, <i>Staphylococcus epidermidis</i>, <i>Staphylococcus saprophyticus</i>, <i>Streptococcus</i> spp. ; aérobies à Gram négatif : <i>Escherichia coli</i>, <i>Enterobacter</i> spp., <i>Klebsiella</i> spp. <p>Mode d'admission : oral.</p>

Thiamphénicol <i>(Phénicolé)</i>	<p>Espèces sensibles</p> <ul style="list-style-type: none"> • aérobies à Gram positif : <i>Corynebacterium</i> spp., <i>Enterococcus</i> spp., <i>Erysipelothrix</i> spp., <i>Staphylococcus</i> spp., <i>Streptococcus pneumoniae</i> ; • aérobies à Gram négatif : <i>Aeromonas</i> spp., <i>Brucella</i> spp., <i>Burkholderia pseudomallei</i>, <i>Campylobacter</i> spp., <i>Citrobacter</i> spp., <i>Enterobacter</i> spp., <i>Escherichia coli</i>, <i>Haemophilus influenzae</i>, <i>Klebsiella</i> spp., <i>Morganella morganii</i>, <i>Neisseria gonorrhoeae</i>, <i>Neisseria meningitidis</i>, <i>Pasteurella</i> spp., <i>Proteus mirabilis</i>, <i>Proteus vulgaris</i>, <i>Salmonella</i> spp., <i>Shigella</i> spp., <i>Stenotrophomonas maltophilia</i> ; • anaérobies : <i>Bacteroides</i> spp., <i>Clostridium</i> spp., <i>Fusobacterium</i> spp. ; • autres : <i>Chlamydia</i> spp., <i>Mycoplasma hominis</i>, <i>Mycoplasma pneumoniae</i>, <i>Rickettsia</i> spp., <i>Ureaplasma urealyticum</i>. <p>Mode d'admission : oral.</p>
--	---

(1) spp. est une abréviation qui signifie « plusieurs espèces » (appartenant à ce groupe).

- D'après la base de données publiques des médicaments : <https://base-donnees-publique.medicaments.gouv.fr/index.php> ;
- D'après Vidal : <https://www.vidal.fr/medicaments/utilisation/antibiotiques/familles/autres-antibiotiques.html> ;
- D'après le manuel MSD <https://www.msmanuals.com/fr/professional>.

2 Réalisation d'un antibiogramme

Préparation au laboratoire

En cohérence avec la suite de l'activité, c'est le Trimethoprime qui devra fournir les meilleurs résultats (l'établissement des différentes concentrations de solutions factices d'antibiotiques permet de déterminer celui retenu par les élèves).



Exemple de tableau de préparation de solutions d'antibiotiques (gélose contenant du rouge de créosol) :

Produits modélisés	Trimethoprime	Positivité élevée	Positivité faible	Témoin négatif (ou antibiotique totalement inefficace)
Réalisation solutions (pipette jetable 3 ml pour compter les gouttes)	100 % HCl 1 mol	8 gouttes HCl 3 gouttes eau	2 gouttes HCl 9 gouttes eau	100% eau

Aide à la conception du protocole

Un antibiogramme est une technique de laboratoire permettant de tester la sensibilité d'une bactérie vis-à-vis de plusieurs antibiotiques. Les bactéries d'une souche se multiplient sur un milieu gélosé, en donnant un clone qui envahit toute la boîte de Petri. Le principe consiste à placer cette culture de bactéries en présence de pastilles imprégnées d'antibiotiques. On dépose sur le milieu de culture des pastilles contenant des antibiotiques. Les molécules d'antibiotiques diffusent tout autour de la pastille, dans la gélose, de façon rayonnée.



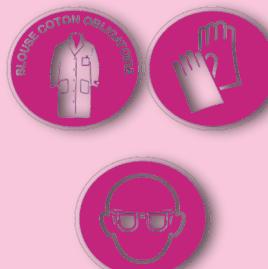
Aide à la mise en oeuvre du protocole

- Coulер la gélose dans la boîte de Petri, laisser durcir la gélose.
- Identifier sur chaque pastille l'antibiotique (noter l'initiale au crayon à papier).
- Tremper la première pastille dans le tube contenant l'antibiotique qui lui correspond.
- Égoutter la pastille sur le rebord du tube et poser délicatement cette dernière sur la gélose.
- Appuyer légèrement sur la pastille pour qu'elle adhère bien à la gélose.
- Rincer la pince et bien l'essuyer.
- Recommencer avec les autres pastilles et antibiotiques correspondants.



Résultats (exemple)

Ici, l'antibiotique noté « T » est celui qui devra être choisi par les élèves. Le support gélosé contient du rouge de créosol et les antibiotiques sont des solutions plus ou moins concentrées d'HCl (élevée pour T, moyenne pour NA et faible pour A).



EXEMPLE D'ACTIVITÉ SPÉCIALITÉ PREMIÈRE

SÉQUENCE 2 UN TRAITEMENT ADAPTÉ

Compétences

- Pratiquer des démarches scientifiques : pratiquer des langages.
- Adopter un comportement éthique et responsable.

Mise en situation

Une semaine est passée, Maïa est ramenée à l'hôpital par ses parents car les symptômes sont de retour après une courte période d'amélioration.

Le médecin, surpris : « Monsieur, Madame Folate que faites-vous ici ? »

La mère de Maïa, entre deux sanglots : « C'est pour notre Maïa, alors qu'elle semblait aller mieux ces derniers jours, elle a de nouveau la fièvre... Nous sommes très inquiets docteur...»

Le médecin, perplexe : « Je ne comprends pas, avec l'antibiotique

prescrit tout aurait dû rentrer dans l'ordre depuis longtemps... Avez-vous bien suivi la prescription ? »

Le père de Maïa, gêné : « bien, comme elle allait mieux, on a arrêté au bout de trois jours... »

La mère de Maïa : « Et comme elle a recommencé à hurler, nous avons repris le traitement, sans succès... mais cela ne passe pas cette fois ».

Le médecin : « Ah ! Bon on va voir comment régler cela mais il va falloir respecter entièrement la prescription cette fois, même si vous trouvez que Maïa va mieux. En effet... »



Rédiger la suite du monologue dans lequel le médecin explique aux parents de Maïa les raisons probables de l'amélioration de l'état de santé, de la rechute de leur fille et la nécessité qu'il y a à suivre scrupuleusement une prescription médicale d'antibiotiques.

Ressources

Pour réussir à rédiger la suite du monologue, vous disposez :

- du poster "L'évolution en direct de la résistance aux antibiotiques" ;
- de photographies des résultats de l'article présentés dans le poster à analyser grâce au logiciel Mesurim et sa fiche technique ;
- de fichiers de séquences (souche sauvage et souche résistante) d'un fragment du gène de la DHFR (correspondant aux acides aminés 20 à 78) ;

- du logiciel GénieGen ou Anagène et sa fiche technique ;
- des modèles moléculaires de la Dihydrofolate réductase :
 - DHFR avec son substrat et le NADPH (nécessaire à la réaction de réduction du substrat) : DHFR-DAF-NADPH.pdb ;
 - DHFR avec antibiotique Trimethoprime : DHFR-TMP-NADPH.pdb ;
 - DHFR mutée avec antibiotique Trimethoprime : DHFR L28R –TMP-NADPH.
- du logiciel Rastop ou Libmol et sa fiche technique.

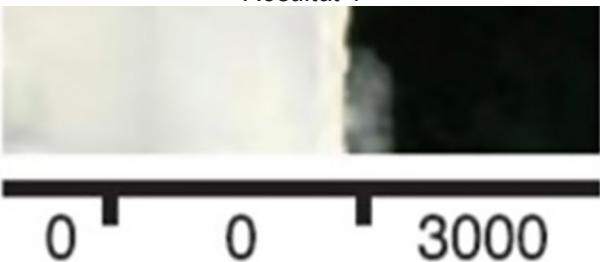
Évaluation des compétences

Compétences	Critères de réussite	Évaluation
Pratiquer des langages (expliquer)	<ul style="list-style-type: none">Les informations présentes sont complètes/suffisantes (issues des connaissances et de l'ensemble des documents) et précises.Les informations présentes sont en relation avec le problème posé.L'organisation générale est cohérente au regard du problème posé.La rédaction respecte les règles grammaticales et syntaxiques.	Tous les critères sont validés.
		L'explication est globalement claire, cohérente et complète.
		L'explication manque de cohérence ou les informations sont lacunaires.
		L'explication manque de cohérence et les informations sont partielles.

Pratiquer des langages (numérique)	<ul style="list-style-type: none"> Les fonctionnalités du logiciel nécessaires à l'obtention ont été utilisées. Les résultats sont complets. Le mode de communication est adapté aux résultats obtenus. Les codes d'écriture scientifique sont respectés. 	Tous les critères sont validés.	
		Des aides ponctuelles ont été nécessaires dans l'usage des outils ou la communication est incomplète/ incorrecte.	
		Une assistance à l'utilisation des outils a été nécessaire ou la communication ne permet pas l'exploitation des résultats.	
		Une assistance à l'utilisation des outils a été nécessaire et la communication ne permet pas l'exploitation des résultats.	

1 Photographies des résultats de l'expérience citée dans l'article

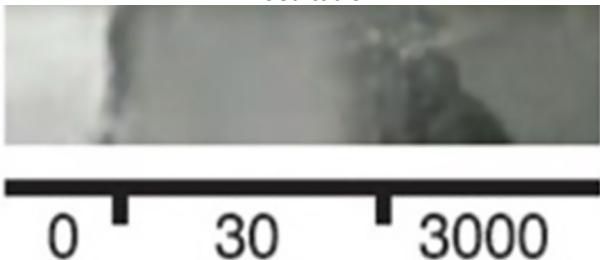
Résultat 1



Résultat 2



Résultat 3



Résultat 4



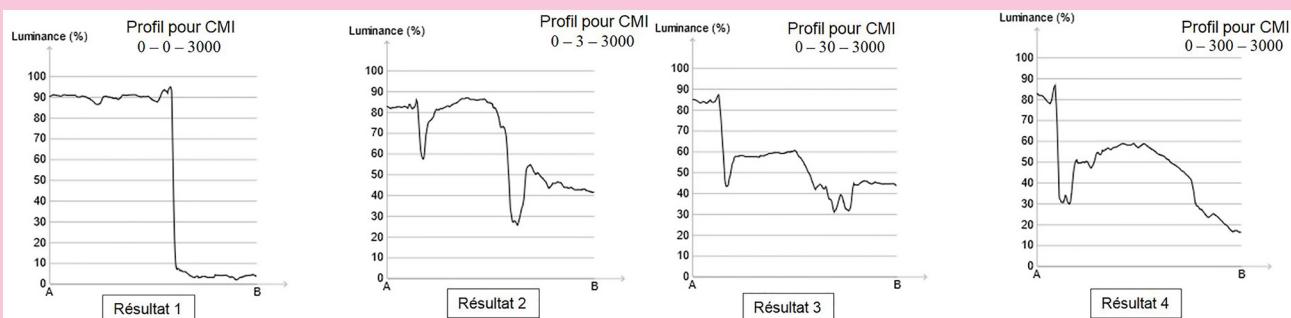
L'intensité lumineuse des photographies mesurée par Mesurim est fonction de la densité bactérienne : plus la bande est blanche plus elle contient de bactéries. On n'obtient jamais une intensité de 0%, on considère qu'une intensité <10% correspond à une absence d'intensité donc de développement bactérien.

Aide à l'utilisation de Mesurim

- Mesurer la luminance, témoin de la quantité de bactéries dans des diverses bandes sur les 4 profils.
- Créer un graphique montrant la croissance bactérienne en fonction de la quantité d'antibiotique pour chacun de ces profils.



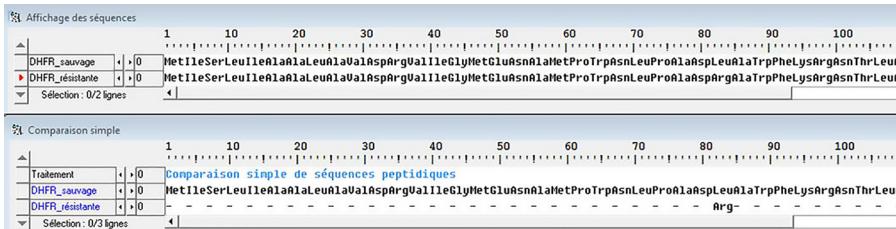
Résultats des mesures de luminance avec Mesurim



Exploitation attendue

Dans les situations où le traitement antibiotique n'est pas respecté et que des doses trop faibles sont ingérées, la population bactérienne diminue mais réaugmente rapidement. Par la suite même des doses "normales" d'antibiotiques (ici 3000 CMI) ne suffisent pas à faire disparaître la bactérie.

2 Traitement des séquences du gène de la Dihydrofolate réductase



Information

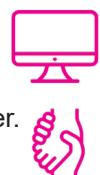
Une seule différence peptidique est visible : en position 28, la leucine est remplacée par l'arginine.

3 Exploitation des modèles moléculaires de la Dihydrofolate réductase

L'enzyme DHFR permet à la bactérie *E. coli* la réduction du dihydrofolate (le substrat) en tétrahydrofolate (le produit) en présence du NADPH qui fournit les hydrogènes nécessaires à cette réduction. Cette réduction du dihydrofolate en tétrahydrofolate est nécessaire à la survie de la bactérie.

Aide à l'exploitation

- Comparer les séquences ADN.
- Convertir en séquences protéiques et les comparer.



Aide à l'utilisation de Libmol

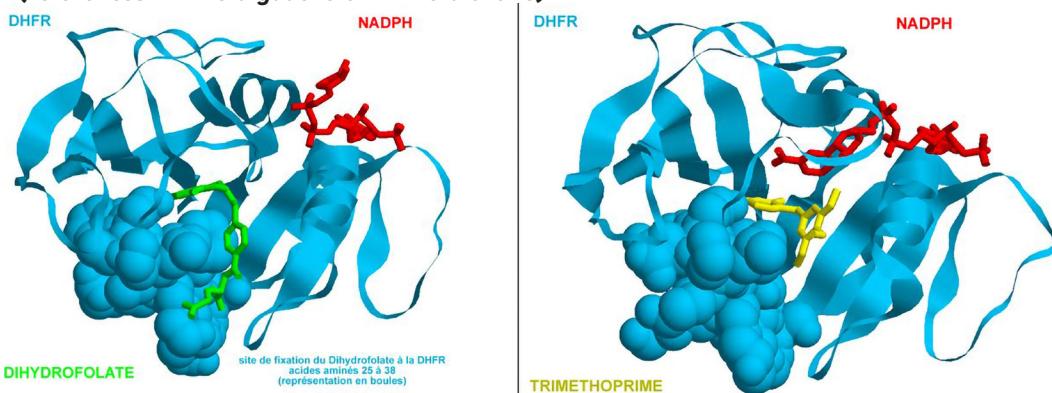
Pour identifier le rôle du Triméthoprime, mettre en évidence les interactions de la DHFR avec :

- le NADPH (identifié NAP ou NDP dans les fichiers) ;
- le dihydrofolate (DDE) ;
- le Triméthoprime (TOP).



Pour identifier les conséquences de la ou des mutations, mettre en évidence le ou les acides aminés modifiés par cette ou ces mutations en comparaison de la DHFR initiale.

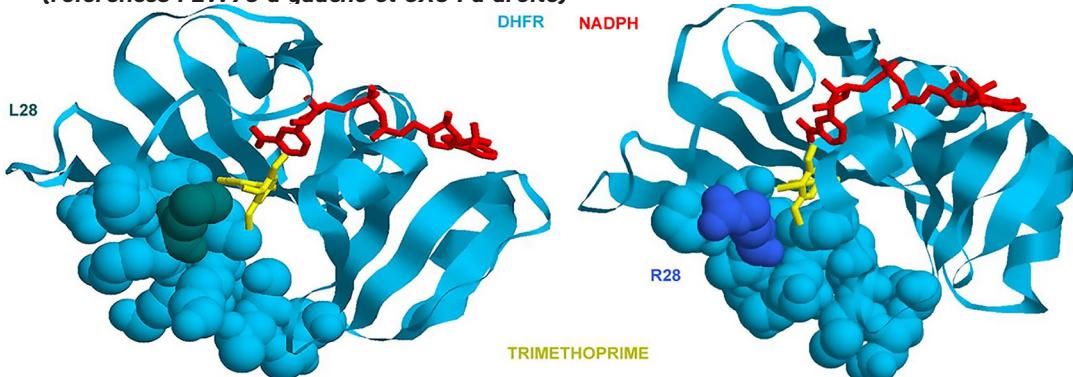
(références : 1RX6 à gauche et 2W9G à droite)



Exploitation attendue

La DHFR possède deux sites d'attaches : l'un pour le substrat (acides aminés 25 à 38) et un pour le NADPH (acides aminés 44 à 78). Au niveau de l'enzyme DHFR, on observe la fixation du Triméthoprime sur le site de fixation du dihydrofolate.

(références : 2W9G à gauche et 6XG4 à droite)



Exploitation attendue

Le changement d'acide aminé en position 28 (la leucine pour la molécule L28 « sauvage » remplacée par l'arginine pour la molécule R28 « mutée ») se situe au niveau du site de fixation du Triméthoprime semblant ainsi gêner/empêcher sa liaison à la Dihydrofolate réductase.



VIRULENCE DU VIH : QUEL RÔLE POUR LA SÉLECTION NATURELLE ?

Figure 3. Le taux de transmission annuel augmente avec la charge virale. Ce taux correspond au nombre de nouvelles infections par an par personne porteuse. Il a été mesuré en Zambie (points) et en Ouganda (tirets).

Le taux atteint un plateau pour des charges virales élevées.

taux de transmission annuel

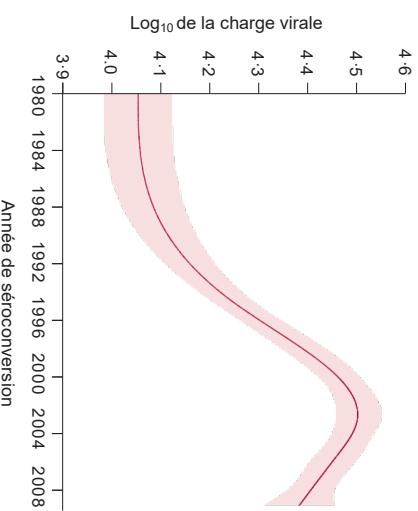


Figure 4. La durée de la phase asymptomatique diminue avec la charge virale. Cette durée est mesurée ici dans la cohorte d'Amsterdam.

Les infections avec une charge virale élevée durent moins longtemps car les patients entrent en phase SIDA plus rapidement.

durée de l'infection

Accès à l'article sur l'héritabilité



Pour que la sélection naturelle agisse sur un trait, il faut que celui-ci soit héritable.

Dans le cas de la charge virale du VIH, héritabilité signifie qu'il existe un lien entre la charge virale du « donneur » et celle du « receveur », donc que le génome du virus a un rôle. Ceci n'était pas démontré dans l'article de Fraser et al. (2007).

Accès à l'article de Fraser et al. (2007).

Figure 7. En moyenne, la charge virale a augmenté en Europe. Le virus semble être devenu plus virulent et avoir évolué vers une charge virale maximisant son R_0 . La diminution observée depuis 2004 pourrait être liée aux pressions de sélection liées aux traitements.

Source : Pantazis et al. (2014, Lancet HIV)

potentiel de transmission (R_0)

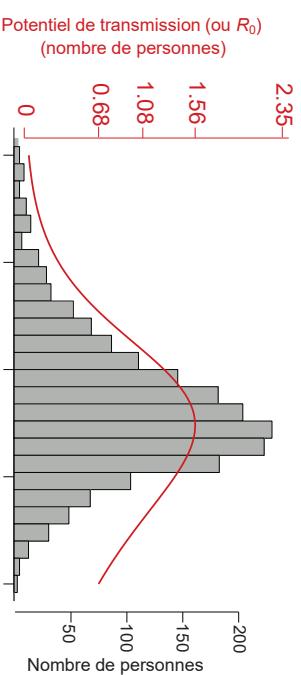


Figure 6. Les charges virales observées (histogramme gris) correspondent aux valeurs optimisant le R_0 (courbe rouge).
Les charges virales sont celles de la cohorte d'Amsterdam.

Le potentiel de transmission, ou la valeur sélective du virus, observé dans la figure 6 est similaire à celui de la figure 5.

Figure 7. En moyenne, la charge virale a augmenté en Europe. Le virus semble être devenu plus virulent et avoir évolué vers une charge virale maximisant son R_0 . La diminution observée depuis 2004 pourrait être liée aux pressions de sélection liées aux traitements.

Source : Pantazis et al. (2014, Lancet HIV)

Figure 5. Le potentiel de transmission (ou R_0) est maximal pour des charges virales intermédiaires. Le potentiel est calculé comme le produit du taux de transmission (cohorte de Zambie) et durée de l'infection (cohorte d'Amsterdam). Le R_0 est aussi le nombre d'infections secondaires. S'il est supérieur à 1, il y a risque d'épidémie.

Les études plus récentes estiment que la variabilité de la charge virale est expliquée à 22 % par le génome humain et à 33 % par celui du virus (le reste étant attribué à l'environnement).

Conclusions

Les charges virales les plus couramment observées dans deux populations humaines pendant la phase asymptomatique sont celles conférant un plus grand potentiel de transmission. Il ne faut cependant pas écarter le rôle des hôtes sur les variations de virulence. Toutefois, les recherches plus récentes sur l'héritabilité ont confirmé l'évolution adaptative du VIH optimisant son potentiel de transmission.

Cet exemple illustre l'idée que la sélection naturelle peut agir sur les populations virales au cours d'une épidémie.

Virulence du VIH :

quel rôle pour la sélection naturelle ?

D'après l'article Fraser et al., *Variation in HIV-1 set-point viral load: Epidemiological analysis and an evolutionary hypothesis* Proc. Natl. Acad. Sci. 104 : 17441-17443 (2007).

S. Alizon¹, J. Giner², J-M. Spinazze², M. Galtier³, F. Soulier⁴, A. Jacquet⁵

1. MIVEGEC, CNRS, IRD, Université de Montpellier 2. Lycée Jean-Baptiste Dumas, Alès, 3. Collège Alphonse Daudet, Alès, 4. Lycée Albert Einstein, Bagnols sur Cèze 5. Lycée Emile Peyravie, Mende

Hypothèse : les charges virales intermédiaires sont sélectionnées

Les mesures de quantité de virus de l'immunodéficience humaine (VIH) par unité de sang (charge virale) démontrent une grande variabilité au cours d'une infection, et aussi entre individus infectés.

En estimant le potentiel de transmission de souches du VIH-1, Fraser et ses collaborateurs avancent l'hypothèse que celles présentant une charge virale intermédiaire au cours de la phase asymptomatique ont été sélectionnées au fil du temps.

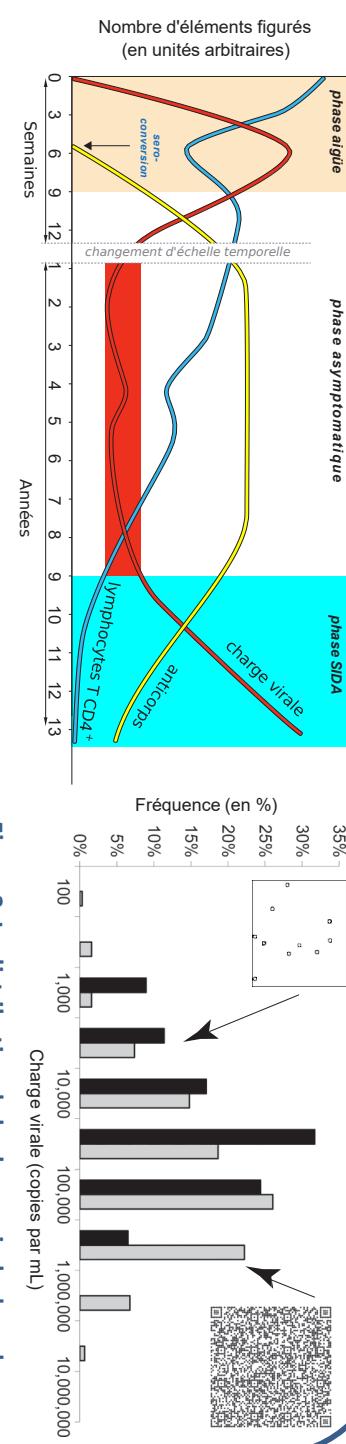


Figure 1. L'infection par le VIH se déroule en trois phases chez un patient. En l'absence de traitement, l'infection est toujours fatale. Variation de la charge virale (courbe rouge), des lymphocytes T CD4+ (infectés par le virus, courbe bleue) et du taux d'anticorps (courbe jaune). Le cadre rouge indique la charge virale en phase asymptomatique. Cette charge est relativement constante au cours du temps chez un patient mais très variable entre patients (Figure 2).

Source : modifié d'après la banque de schémas Académie de Dijon

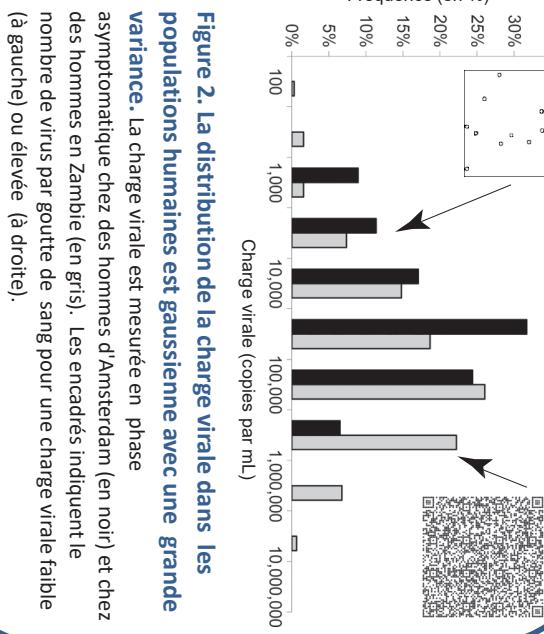
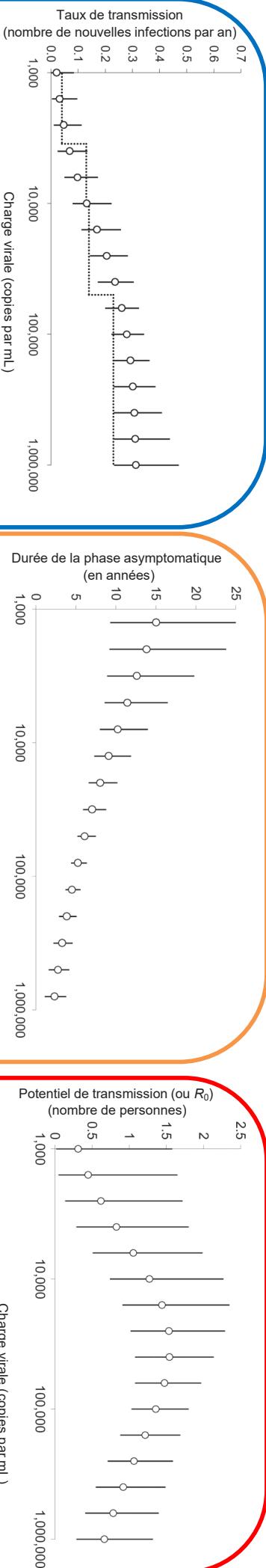


Figure 2. La distribution de la charge virale dans les populations humaines est gaussienne avec une grande variance. La charge virale est mesurée en phase asymptomatique chez des hommes d'Amsterdam (en noir) et chez des hommes en Zambie (en gris). Les encadrés indiquent le nombre de virus par goutte de sang pour une charge virale faible (à gauche) ou élevée (à droite).



DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Lire l'article et présentation par les chercheurs.
- Simplifier, adapter les figures pour permettre la compréhension par des élèves.

Compréhension de l'article

A la première lecture, certaines notions ont nécessité une présentation du chercheur, notamment pour expliquer un concept clé en épidémiologie : la notion de R_0 , notion que l'épidémie de Covid19 a mise sous les feux de l'actualité. Regarder la dynamique d'une infection, son histoire, sa transmission et la virulence de l'agent ne sont pas

habituelles pour nous et il a fallu que le chercheur nous éclaire.

L'ouvrage de Samuel ALIZON « *C'est grave Docteur Darwin ? L'évolution, les microbes et nous* » (Science ouverte, éditions du Seuil, 2016) est un excellent outil pour découvrir et aider à comprendre l'évolution et l'écologie des maladies infectieuses.

Choix et adaptation des figures

La figure 1 est extraite de la banque de schémas de l'académie de Dijon, elle permet de poser les notions essentielles de l'infection par le VIH : charge virale, phases de l'infection (aiguë, asymptomatique, SIDA).

Quelques figures de l'article initial (Fraser, 2007) ont été modifiées et l'illustration a été complétée à partir d'articles plus récents (Fraser, 2014 et Pantazis, 2014).

Figure originale de Fraser et al. (2007, Proc Nat Acad Sci USA)

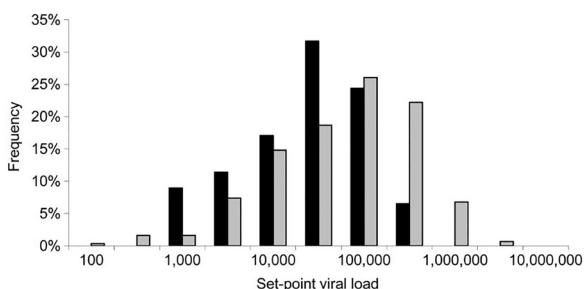


Fig. 1. The distribution of set-point viral loads. The distribution of viral loads (copies per milliliter of peripheral blood) is plotted for untreated individuals in the Amsterdam Seroconverters Cohort (black bars) and the Zambian Transmission Study (7) (gray bars). The bars represent bins 0.5 log₁₀ wide and are labeled by their midpoint viral load.

Les figures 3, 4 et 5, n'ont pas été modifiées, les légendes des axes ont été traduites.

Le texte de légende de chaque graphique a été traduit et parfois beaucoup adapté pour être accessible.

Figure 2 de notre poster

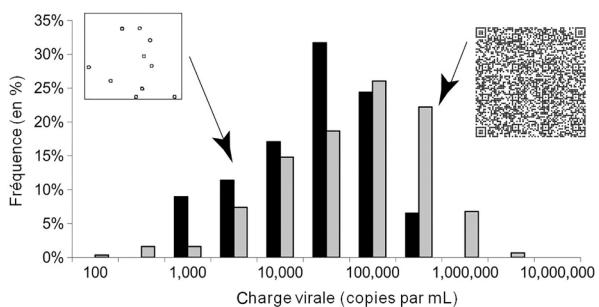


Figure 2. La distribution de la charge virale dans les populations humaines est gaussienne avec une grande variance. La charge virale est mesurée en phase asymptomatique chez des Hommes d'Amsterdam (en noir) et chez des Hommes en Zambie (en gris). Les encadrés indiquent le nombre de virus par goutte de sang pour une charge virale faible (à gauche) ou élevée (à droite).

Le travail essentiel de didactisation dans le poster a été de mettre en lien ces 3 graphiques pour rendre la définition du R_0 plus intuitive :

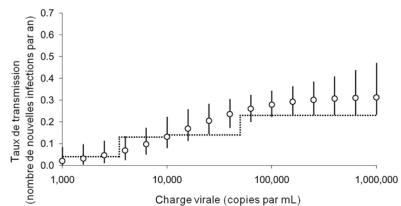


Figure 3. Le taux de transmission annuel augmente avec la charge virale. Ce taux correspond au nombre de nouvelles infections par an par personne porteuse. Il a été mesuré en Zambie (points) et en Ouganda (tirets).

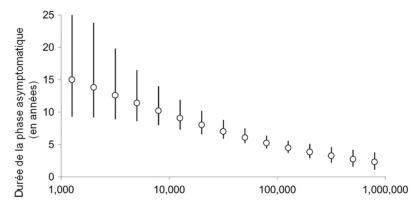


Figure 4. La durée de la phase asymptomatique diminue avec la charge virale. Cette durée est mesurée ici dans la cohorte d'Amsterdam.

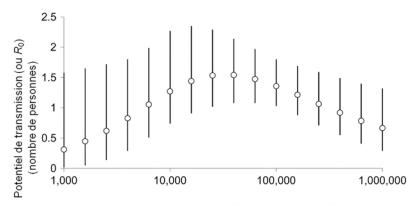


Figure 5. Le potentiel de transmission (ou R_0) est maximal pour des charges virales intermédiaires. Le potentiel est calculé comme le produit du taux de transmission (cohorte de Zambie) et durée de l'infection (cohorte d'Amsterdam). Le R_0 est aussi le nombre d'infections secondaires. S'il est supérieur à 1, il y a risque d'épidémie.

$$\text{Taux de transmission annuel} \times \text{Durée de l'infection} = \text{Potentiel de transmission (}R_0\text{)}$$

Figures originales de Fraser et al. (2014)

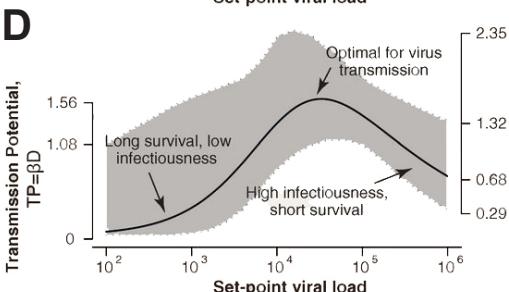
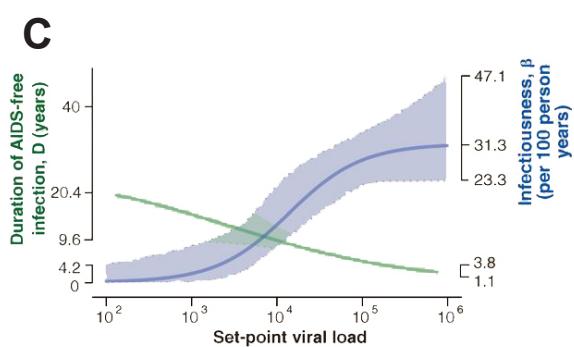
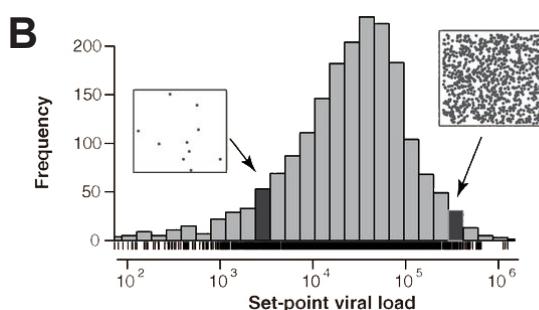
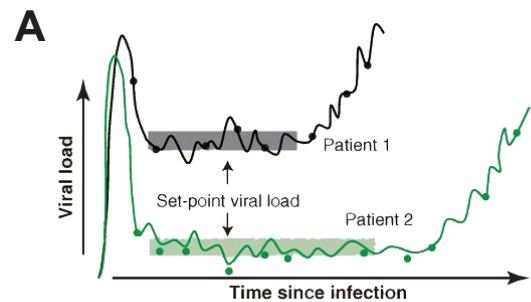
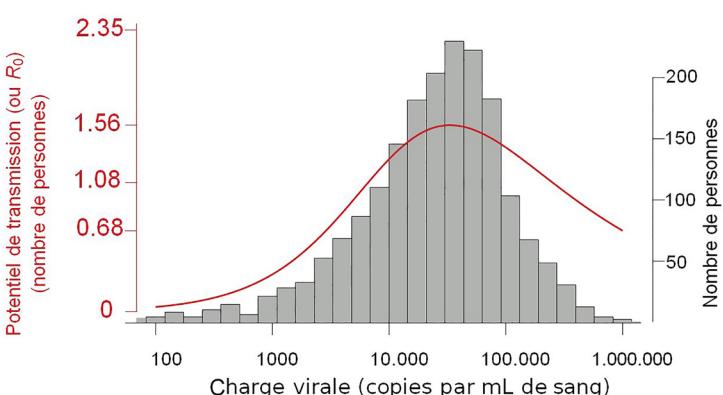


Figure 6 du poster

Ce graphique nous a été donné par Samuel Alizon qui est co-auteur de l'article. Il a été réalisé pour l'article mais n'avait pas été retenu dans la version finale.

Il s'agit de la superposition du graphique B sur le graphique D.

Enfin, la figure 7 du poster n'a pas été modifiée.



EXEMPLE D'ACTIVITÉ COLLÈGE - CYCLE 4

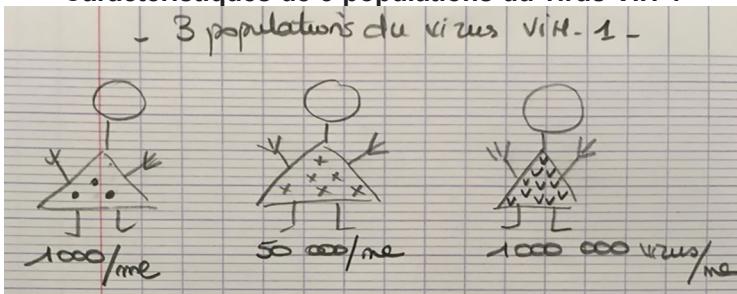
REMobilisation - Réinvestissement

EXEMPLE DE LA SÉLECTION NATURELLE DES POPULATIONS DE VIH AU COURS D'UNE ÉPIDÉMIE

Mise en situation

Il existe des différences entre populations de VIH-1 qui déterminent des variations de dynamiques épidémiques. En exploitant des données épidémiologiques concernant trois populations virales, on cherche à prédire quelle population se propagera le mieux.

Caractéristiques de 3 populations du virus VIH-1



1 Le potentiel de transmission

On définit le « potentiel de transmission » comme étant le nombre de personnes infectées par un porteur du virus pendant la durée de son infection (phase asymptomatique) en l'absence de traitement. Il se calcule ainsi :

$$\text{Potentiel de transmission} = \text{taux de transmission} \times \text{durée de l'infection}$$

2

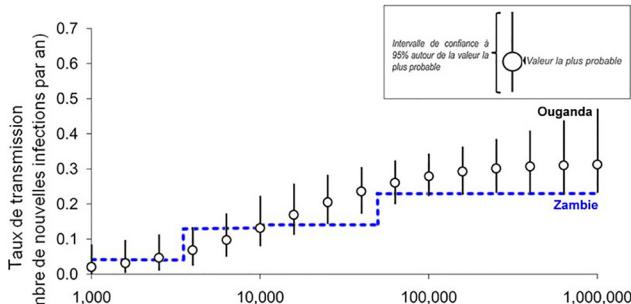


Figure 1. Le taux de transmission annuel augmente avec la charge virale. Ce taux correspond au nombre de nouvelles infections par an par personne porteuse. Il a été mesuré en Zambie et en Ouganda.

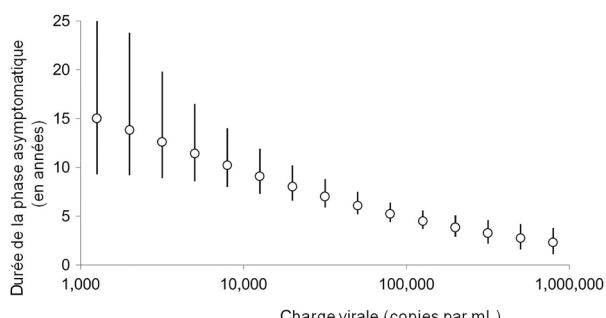


Figure 2. La durée de la phase asymptomatique en l'absence de traitement adapté diminue avec la charge virale. La phase asymptomatique est le temps sans signes visibles de la maladie et précédant la phase SIDA déclaré. Cette durée est mesurée ici dans la cohorte d'Amsterdam.

Programme

- Etablir des relations de causalité entre différents faits pour expliquer l'évolution des êtres vivants.
- Mettre en évidence des faits d'évolution des espèces et donner des arguments en faveur de quelques mécanismes de l'évolution.

Compétence

- Pratiquer des démarches scientifiques.
- Lire et exploiter des données présentées sous différentes formes.

Parcours éducatifs

- Éducation à la santé ; éducation à la vie sexuelle affective ; lutte contre la LGBTphobie.

Prérequis

- Cycle du VIH.
- Différents types de lymphocytes
- Notions de dynamique des populations.



Calculer, pour chacune des 3 personnes présentées, le potentiel de transmission pour déterminer laquelle de ces populations peut s'assurer la meilleure transmission possible et identifier ainsi les conditions permettant aux virus de s'assurer cette transmission optimale.

Production attendue

Le virus qui se propage le plus – qui est sélectionné – est celui qui est à la fois le plus transmis par unité de temps chez les individus porteurs, sans doute déterminé par la quantité de virus (charge virale) et qui produit les infections les plus durables (durée d'infection).

Aides - niveau 1

1. Calculer le taux de transmission pour les 3 populations virales.
2. Relever quelle population de virus se propagera le mieux.
3. En déduire les conditions permettant au virus de se propager le plus efficacement.

**Aides - niveau 2**

1. Pour les charges virales correspondant aux 3 personnes présentées dans l'introduction, relever, dans les graphiques, la valeur du taux de transmission et la valeur de la durée de la phase asymptomatique.
2. Repérer la formule donnant le potentiel de transmission et faire le calcul. Rappel : la durée de la phase asymptomatique = la durée de l'infection.
3. Relever laquelle des 3 populations de virus est celle qui a le plus fort taux de transmission.
4. En déduire, d'après vos relevés précédents, les conditions qui permettent d'obtenir ce plus fort taux de transmission.

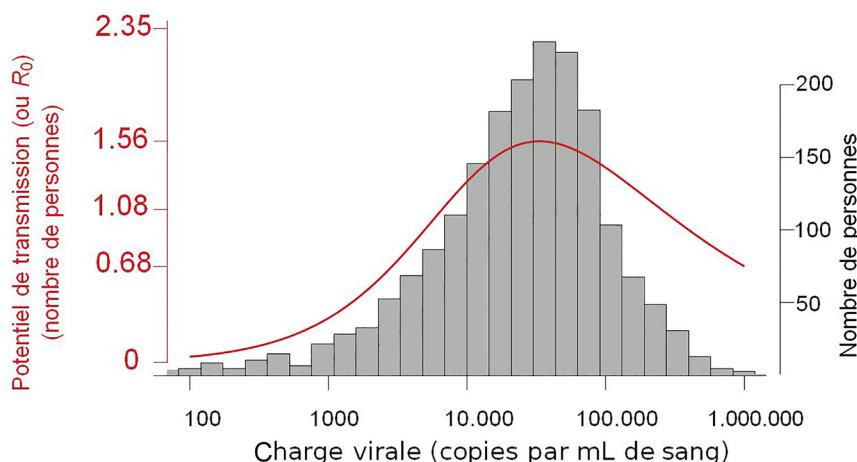
**Production attendue**

Les calculs du potentiel de transmission. Un tableau pourra être fourni par le professeur en substitution des graphiques, ou construit par les élèves.

Population virale	1	2	3
Charge virale (virus / mL de sang)	1 000	50 000	1 000 000
Taux de transmission (nombre de nouvelles infections par an)	~ 0,025	~ 0,2	~ 0,25
Durée de la phase asymptomatique (années)	~ 15	~ 7	~ 2,5
Potentiel de transmission (nombre de personnes infectées)	~ 0,375	~ 1,4	~ 0,625

Conclusion : la population virale 2, ayant la charge virale et la durée de phase asymptomatique intermédiaires devrait mieux se propager.

3

Évolution des charges virales observées

À partir du document 3, argumenter sur l'avantage sélectif pour un le virus du VIH-1 de maintenir une charge virale intermédiaire.

Les charges virales observées (en gris) correspondent aux valeurs optimisant le R_0 (en rouge).

Les mesures ont été effectuées chez un grand nombre de personnes appelé « cohorte d'Amsterdam ».

Production attendue

Ces données montrent que les populations de virus ayant une charge virale intermédiaire (entre 10 000 et 100 000 copies par mL) sont présentes chez le plus de personnes et ont le potentiel de transmission le plus élevé. Ces résultats sont conformes aux observations relevées pour la population 2 du VIH-1 précédente.

Il semble donc que les populations de VIH-1 développant une charge virale intermédiaire soient avantagées et donc sélectionnées, devenant ainsi les plus fréquentes dans les populations humaines.

EXEMPLE D'ACTIVITÉ SPÉCIALITÉ PREMIÈRE

CALCUL DU TAUX DE COUVERTURE VACCINALE

1 Méthode de calcul

Le taux de couverture vaccinale efficace correspond à la partie de la population qui doit être vaccinée pour qu'une épidémie ne puisse pas se propager dans cette population. Cette valeur évolue de 0 à 1 selon que personne ou 100% de la population est vaccinée.

Pour calculer ce taux de couverture vaccinale efficace d'un vaccin, il faut connaître le R_0 ou potentiel de transmission de l'agent pathogène.

- si $R_0 < 1$: l'épidémie s'éteint
- si $R_0 = 1$: le nombre de personnes infectées reste constant
- si $R_0 > 1$: l'épidémie croît au cours du temps.

Le taux de couverture vaccinale est dit efficace quand le R_0 devient < 1.

Calcul du R_0 pour le VIH

R_0 correspond au taux de transmission annuel du VIH (nombre de nouvelles infections par an et par personne porteuse) x la durée de l'infection (en années).

Remarque : le R_0 varie en fonction de la charge virale de la personne porteuse, il est maximal pour des charges virales intermédiaires.

Calcul du taux de couverture vaccinale

Si on considère un vaccin efficace à 100% alors les personnes vaccinées ne transmettent pas l'agent pathogène donc le R_0 de cette population vaccinée est de 0. Le R_0 de la population devient donc égal au R_0 de la partie de la population non vaccinée, soit : $R_0 = R_0 \times (1 - P)$.

Pour que la couverture vaccinale soit efficace, que l'épidémie s'éteigne, il faut que $R_0 < 1$

$$\begin{aligned} \text{Calcul : } R_0 (1 - P) &< 1 \\ R_0 - R_0 \times P &< 1 \\ R_0 - 1 &< R_0 \times P \\ P &> 1 - 1 / R_0 \end{aligned}$$

2 Évolution des charges virales observées (document 3 de la page précédente)

Exemple de calcul à partir des données de la figure 6 du poster

Le R_0 maximal est de 1,56, alors $1 - 1/R_0 = 0,36$. Il faut donc vacciner au minimum 36% de la population pour obtenir une efficacité vaccinale empêchant la propagation du VIH-1, avec un vaccin efficace à 100%, ce dont nous ne disposons pas à ce jour.

Compléments : des vaccins contre le VIH sont en cours d'essais cliniques.

Par exemple l'essai clinique « HVTN 702 » avec 5400 personnes en Afrique du sud d'octobre 2016 à juillet 2021.

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/VIH/POSTER_VIH.pdf



Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/VIH/docs_VIH.zip



Programme

- Dans une population, une vaccination n'offre une protection optimale qu'au-delà d'un certain taux de couverture vaccinale, qui bloque la circulation de l'agent infectieux au sein de cette population. Cela résulte du fait que l'on peut porter et transmettre l'agent infectieux sans être soi-même malade (porteur sain).

Compétences

- Modéliser et calculer le taux de couverture vaccinale efficace pour un vaccin donné.



Dans le cas d'une propagation optimale du VIH, calculer le pourcentage de la population qu'il faudrait vacciner si on disposait d'un vaccin efficace à 100% contre le VIH-1.

ÉVOLUTION DU VIH ET SÉLECTION NATURELLE

Mise en situation

En moyenne, la charge virale du VIH (nombre de virus par ml de sang) a augmenté chez les patients depuis son apparition dans les années 1980. Cette augmentation semble être le résultat d'une sélection naturelle des virus sur leur capacité à se propager.



Montrer que les résultats expérimentaux suivants confirment cette hypothèse.

Organiser la réponse selon une démarche aux choix, en intégrant des données des documents et des connaissances utiles.

Au QCM, pour chaque question, cocher la bonne proposition de réponse.

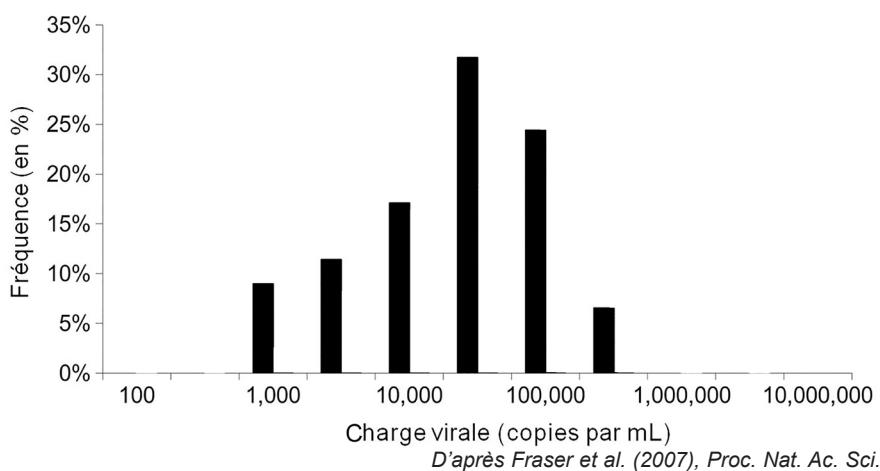
Programme

- Les populations sont soumises à la sélection naturelle. À cause de l'instabilité de l'environnement biotique et abiotique, une différenciation génétique se produit obligatoirement au cours du temps.

Compétences

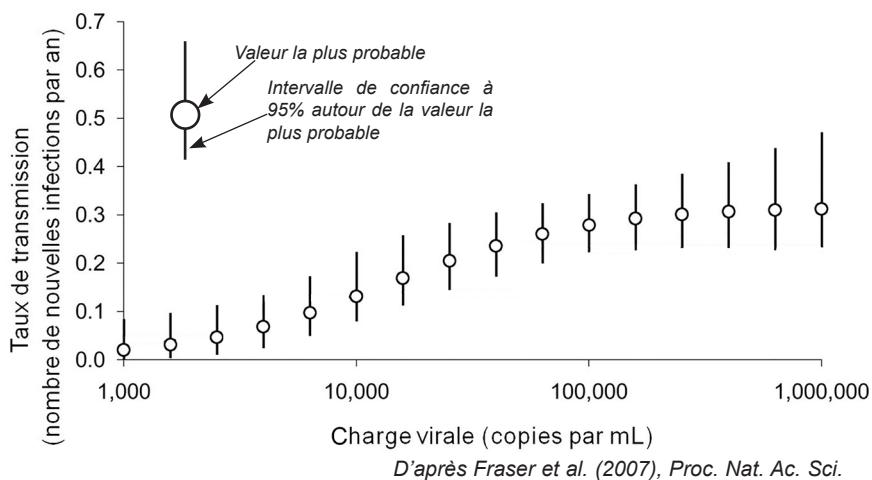
- Recenser, extraire, et exploiter des informations à partir de documents à des fins de connaissance et pas seulement d'information.

1 Fréquence des différentes charges virales dans une population d'hommes d'Amsterdam



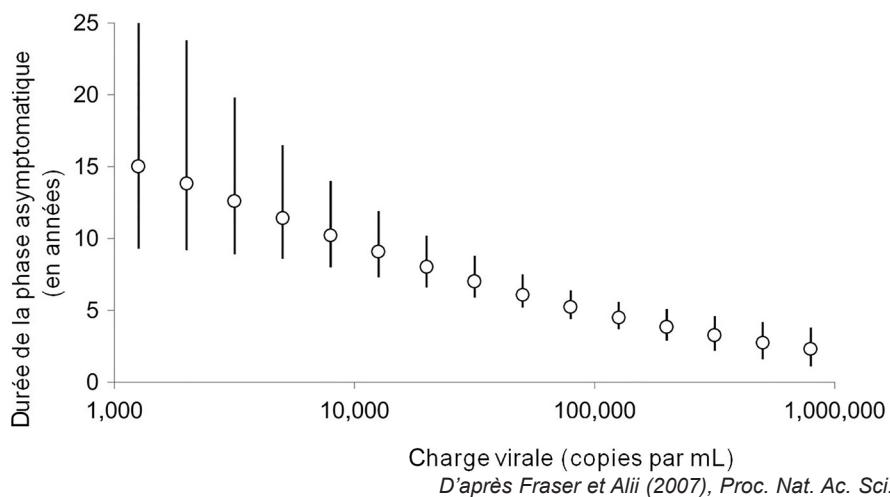
Le nombre de virus par ml de sang est mesuré au cours de la phase asymptomatique de l'infection.

2 Variation du taux de transmission du virus en fonction de la charge virale



Le taux de transmission du virus correspond au nombre de personnes nouvellement infectées par an par une personne porteuse du VIH.

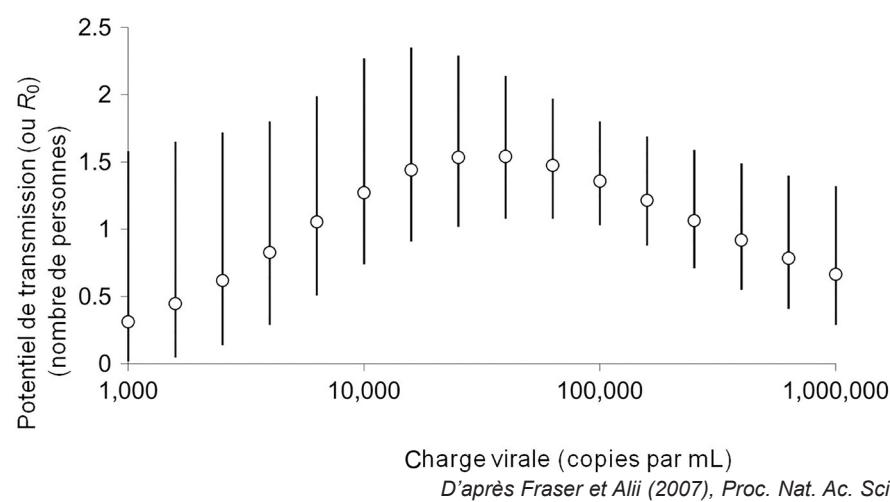
3 Variation de la durée de la phase asymptomatique en fonction de la charge virale



L'infection par le VIH se déroule en 3 phases :

- la phase de primo-infection dure quelques semaines, pendant lesquelles la charge virale augmente transitoirement ;
- la phase asymptomatique peut durer plusieurs années : la personne est alors séropositive, elle n'a pas de symptôme et sa charge virale est relativement stable ;
- la phase de SIDA déclarée est courte car les malades n'ont plus de défenses immunitaires et meurent en quelques mois en l'absence de traitement.

4 Variation du potentiel de transmission du virus en fonction de la charge virale



Le potentiel de transmission (R_0) est calculé comme le produit du taux de transmission par la durée de la phase asymptomatique. Il correspond au nombre d'infections causées par une personne infectée.

Si $R_0 > 1$ il y a un risque d'épidémie.

QCM

1- La fréquence de la charge virale pendant la phase asymptomatique dans une population

- est homogène.
- connaît un maximum pour les charges virales maximales.
- connaît un maximum pour les charges virales faibles.
- connaît un maximum pour les charges virales intermédiaires.

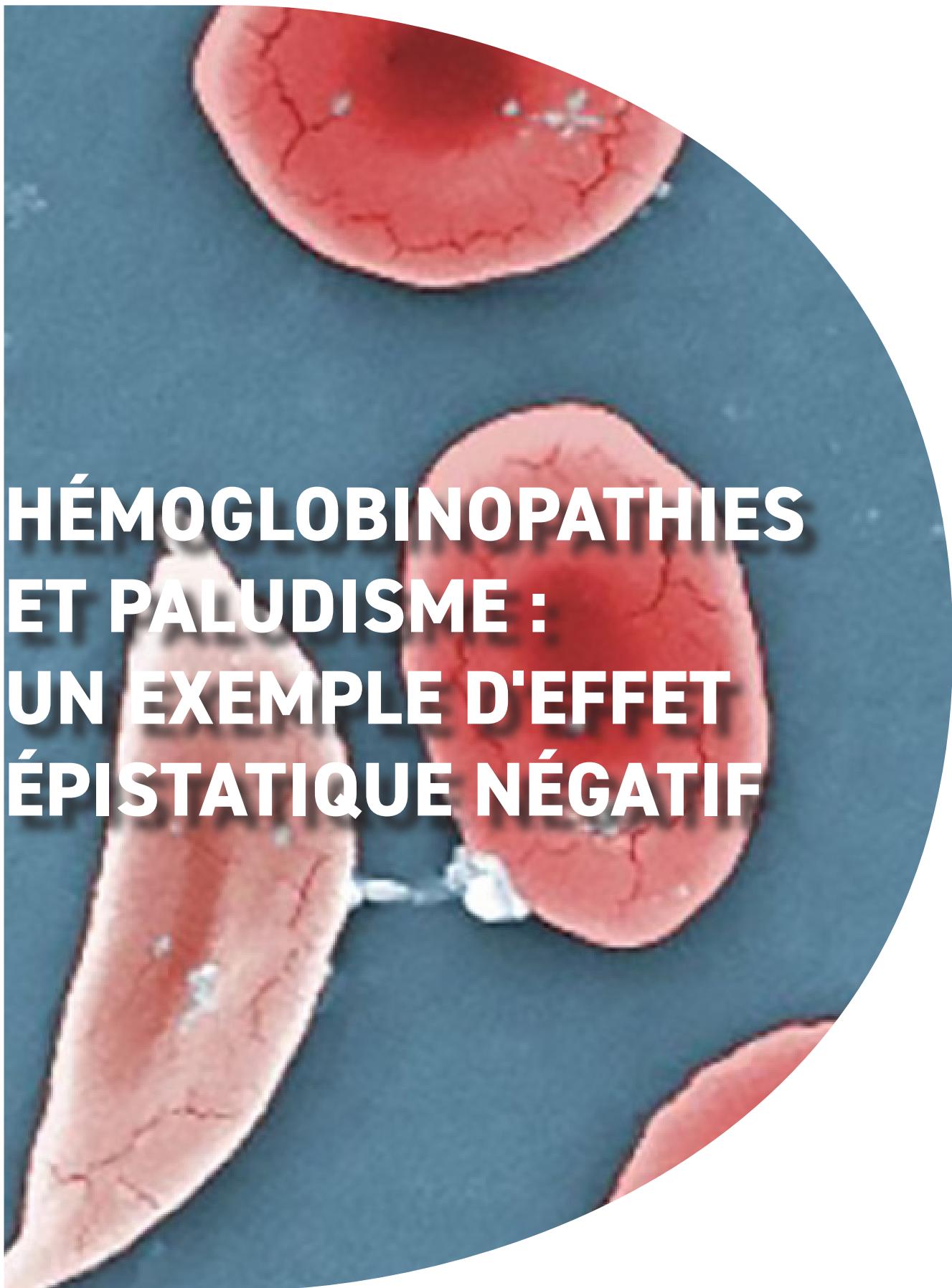
2- Le potentiel de transmission (R_0) du VIH

- dépend uniquement de la durée de la phase asymptomatique.
- dépend uniquement du taux de transmission annuel du virus.
- dépend à la fois de la durée de la phase asymptomatique et du taux de transmission annuel.
- est aléatoire.

3- La charge virale la plus fréquente dans la population étudiée à Amsterdam

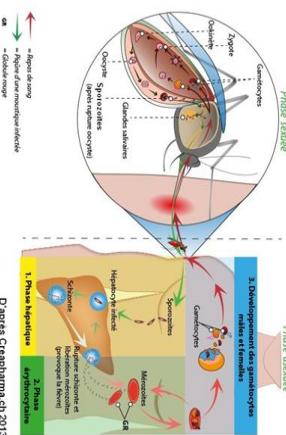
- est celle qui permet d'obtenir un potentiel de transmission maximal.
- est celle qui permet le taux de transmission annuel maximal.
- est celle qui permet la durée minimale de la phase asymptomatique.
- est celle qui permet la durée maximale de la phase asymptomatique.

Réponses : 1d, 2c et 3a



HÉMOGLOBINOPATHIES ET PALUDISME : UN EXEMPLE D'EFFET ÉPISTATIQUE NÉGATIF

2

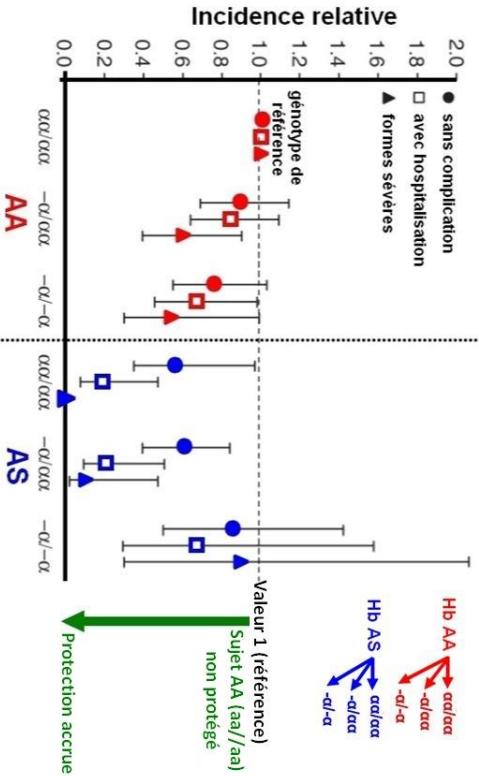


En Afrique, les zones de paludisme sévère coïncident avec celles des plus fortes fréquences de l'allèle S à l'origine de la drépanocytose (Figure 1A). Le *Plasmodium* (cycle, figure 1B) procure un avantage sélectif aux hétérozygotes AS par rapport aux homozygotes AA (les malades SS meurent de façon prématuée). Cet avantage explique la fréquence élevée de l'allèle S dans les zones impaludées (Figure 2). Les mécanismes moléculaires de la résistance des hétérozygotes aux parasites agents du paludisme impliquent notamment des microARN davantage présents dans les globules rouges (GR) des individus AS en présence du parasite. Les microARN fusionnent avec les ARN du parasite perturbant alors la traduction de ses ARN et par conséquent son cycle de développement (Figure 1B).

L'effet épistatique négatif des hémoglobinopathies

En génétique, l'**épistase** désigne l'interaction existant entre deux ou plusieurs gènes, l'un d'entre eux (ou plusieurs) masquant ou empêchant l'expression des autres. L'épistase négative réduit le bénéfice conféré par de nouvelles mutations bénéfiques, à mesure qu'elles apparaissent chez des individus de plus en plus adaptés.

Figure 4. Incidence des différents formes cliniques de paludisme en fonction du génotype.



La protection par le génotype AS ($\alpha\text{a}/\text{aa}$ et $-\text{a}/\text{aa}$) peut être supérieure à 80% ; celle du génotype AA ($-\text{a}/-\text{a}$) est entre 30 et 40%. La présence simultanée des deux génotypes se traduit par une fréquence des épisodes cliniques, bénins ou graves, qui se rapproche de celle que l'on observe chez les individus AA et ($\alpha\text{a}/\alpha\text{a}$), c'est-à-dire « non protégés » (Figure 4).

Le bénéfice, concernant la protection contre le paludisme, pour les individus à la fois AS et ($-\alpha/\alpha$) étant moindre que pour les individus AS et ($\alpha\alpha/\alpha\alpha$) ou AA et ($-\alpha/\alpha$), cela montre un **effet épistatique négatif entre ces gènes.**

La combinaison des deux hémoglobinopathies est défavorable pour la résistance au paludisme, d'où leurs distributions relativement disjointes : drépanocytose surtout africaine et alpha-thalassémie surtout eurasiatique (figures 2 et 3).

La combinaison des deux hémoglobinopathies est défavorable pour la résistance au paludisme, d'où leurs distributions relativement disjointes : drépanocytose surtout africaine et alpha-thalassémie surtout eurasiatique (figures 2 et 3).

Dots • Phenotype–genotype relationships in monogenic disease: lessons from the thalassasmas

David J. Weatherall

Nature Reviews Genetics

Les données épidémiologiques concernant les **alpha-thalassémies** montrent que les formes mineures (Tableau 1 et Figure 3), hétérozygotes ($\text{-}\alpha/\alpha\alpha$) et homozygotes ($\text{-}\alpha/\text{-}\alpha$) sont protectrices contre les formes graves de paludisme. En revanche, elles ne le sont pas vis-à-vis des formes plus bénignes. Cette protection est due à une taille réduite des GR, à une augmentation du nombre de GR et à une concentration plus basse en hémoglobine des GR.

Hémoglobinopathies et paludisme : un exemple d'effet épistatique négatif

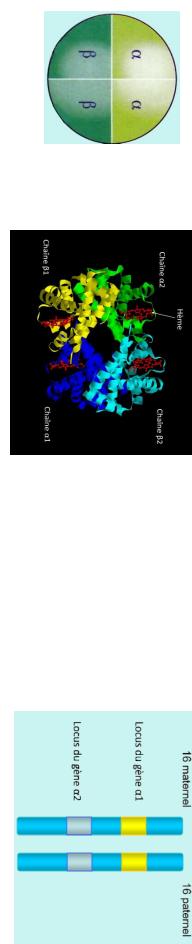
D'après l'article de Dominique Labie « Hémoglobinopathies et paludisme à Plasmodium falciparum : un exemple d'effet épistatique négatif ? », *Hématologie*, 12 : 146-147 (2006).

B. Godelle¹, L. Danjou², S.A Pécol², M. Tartière³, P. Cazes³

1. Institut des sciences de l'évolution, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE 2. Cité scolaire Paul Valéry, Sète 3. Lycée J. Vallot, Lodève

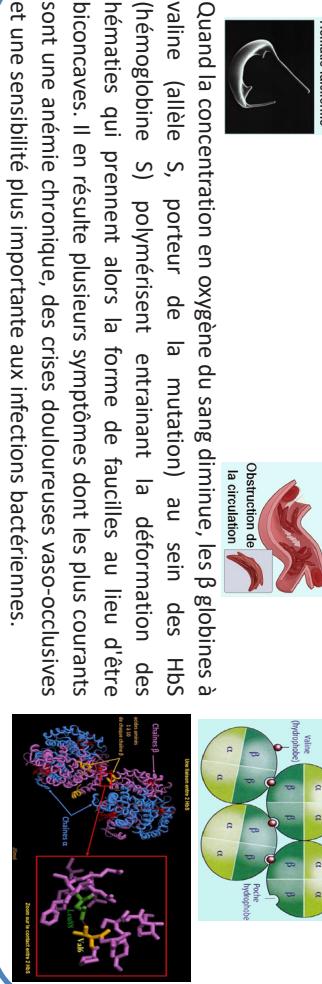
L'hémoglobine est une protéine présente dans les hématies

Elle est constituée chez l'adulte de 4 chaînes polypeptidiques : 2 chaînes α et deux chaînes β . Chaque chaîne porte un groupement hème permettant la fixation d'une molécule de dioxygène. Elle a donc un rôle essentiel dans le transport d'oxygène par le sang.



La synthèse des chaînes α est codée par les gènes $\alpha 1$ et $\alpha 2$ localisés sur le [chromosome 16](#) alors que les deux chaînes β sont codées par un seul gène localisé sur le [chromosome 11](#).

La drépanocytose ou anémie falciforme



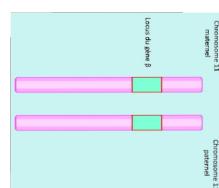
Quand la concentration en oxygène du sang diminue, les β globines à valine (allèle S , porteur de la mutation) au sein des HbS (hémoglobine S) polymérisent entraînant la déformation des hématies qui prennent alors la forme de fauilles au lieu d'être biconvexes. Il en résulte plusieurs symptômes dont les plus courants sont une anémie chronique, des crises douloureuses vaso-occlusives et une sensibilité plus importante aux infections bactériennes.

L'alpha-thalassémie et ses conséquences

La plupart des alpha-thalassémies n'entraînent pas ou très peu de symptômes, elles sont dites silencieuses ou mineures. Ces alpha-thalassémies mineures se caractérisent pas un manque de globules rouges et d'hémoglobine (anémie).

Tableau 1 : Les différents génotypes responsables d'alpha-thalassémie

Silencieuse	Thalassémie mineure	Hémoglobine H	Hydrops fétalis de Baer
Asymptomatique	Asymptomatique	α^+ - thalassémie homozygote	Anémie hémolytique chronique
α^+ - thalassémie hétérozygote	α^+ - thalassémie hétérozygote	α^+ - thalassémie hétérozygote	α^+ - homozygote
1 allèle déficient	- α/α	2 allèles déficients	3 allèles déficients
- α/α	- α/α	- $/\alpha\alpha$	- $/\alpha\alpha$
$\alpha 1$	$\alpha 1$	$\alpha 1$	$\alpha 1$
$\alpha 2$	$\alpha 2$	$\alpha 2$	$\alpha 2$
$\alpha 1$	$\alpha 1$	$\alpha 1$	$\alpha 1$
$\alpha 2$	$\alpha 2$	$\alpha 2$	$\alpha 2$
$\alpha 1$	$\alpha 1$	$\alpha 1$	$\alpha 1$
$\alpha 2$	$\alpha 2$	$\alpha 2$	$\alpha 2$



Répartitions mondiales du paludisme et des hémoglobinopathies

Figure 1. Paludisme : carte de distribution mondiale en 2014 (A) et cycle parasitaire (B)

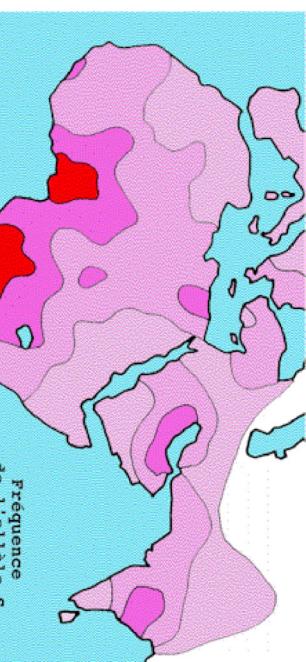
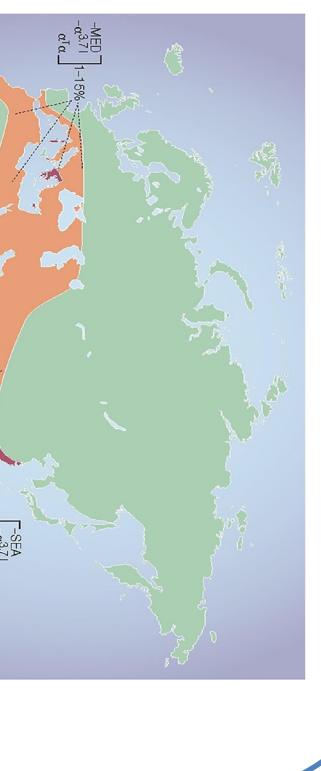
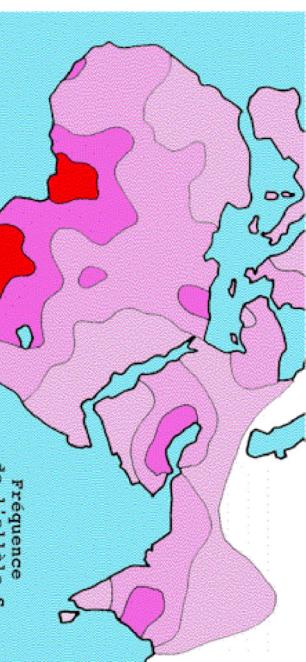


Figure 2. Carte de distribution de l'hémoglobine S



A

Figure 3. Carte de distribution mondiale des alpha-thalassémies



DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Lecture de l'article et présentation par les chercheurs.
- Simplification et adaptation des figures pour permettre la compréhension par des élèves.

Construction du poster

Après lecture de l'article de référence, nous avons d'abord cherché à définir les termes clés que le chercheur ne définissait pas dans sa publication, par exemple : α -thalassémie.

Une fois les termes définis, la recherche de documents complémentaires a pu commencer.

Cette recherche a été réalisée suivant deux axes :

- le thème proposé « les hémoglobinopathies » : drépanocytose et α -thalassémies ;
- l'auteur de l'article D. Labe.

Les deux axes se sont souvent rejoints lors de recherche puisque D. Labe a publié de nombreuses brèves et articles concernant les hémoglobinopathies.

Après cette bibliographie, un axe de travail s'est avéré être évident. Il fallait :

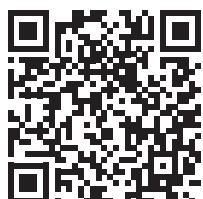
- expliquer les conséquences phénotypiques des hémoglobinopathies (on commence toujours par observer) puis leur origine génétique ;
- expliquer la concordance des zones impaludées avec les zones de fortes fréquences des allèles mutés à l'origine des hémoglobinopathies ;
- expliquer les raisons de la sélection positive de chacune des hémoglobinopathies (si elles étaient connues) ;
- revenir vers l'article pour montrer en quoi consiste l'effet épistatique négatif lorsque les deux hémoglobinopathies coexistent.

Le poster est construit de manière à fournir au lecteur les clés pour comprendre en quoi consiste l'effet épistatique négatif c'est à dire l'effet néfaste de la combinaison des deux hémoglobinopathies et ses conséquences sur la répartition mondiale des allèles mutés : drépanocytose en Afrique essentiellement, α -thalassémie surtout en Eurasie.

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

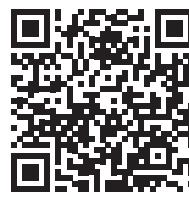
Accès au poster

[http://ent-apbg.org/evolution_action/drepano/
POSTER_drepa.pdf](http://ent-apbg.org/evolution_action/drepano/POSTER_drepa.pdf)



Accès aux documents

[http://ent-apbg.org/evolution_action/drepano/docs_
drepa.zip](http://ent-apbg.org/evolution_action/drepano/docs_drepa.zip)



UN EXEMPLE DE SÉLECTION NATURELLE : LA DRÉPANOCYTOSE

Fil directeur / Problématique

Les êtres vivants présentent des adaptations à leur milieu et mode de vie. Ces adaptations sont le produit de l'évolution. Or certaines de ces caractéristiques se traduisent par des maladies qui dégradent fortement la qualité de vie personnes atteintes. Comment expliquer que des caractéristiques apparemment inadaptées persistent dans la population humaine ?

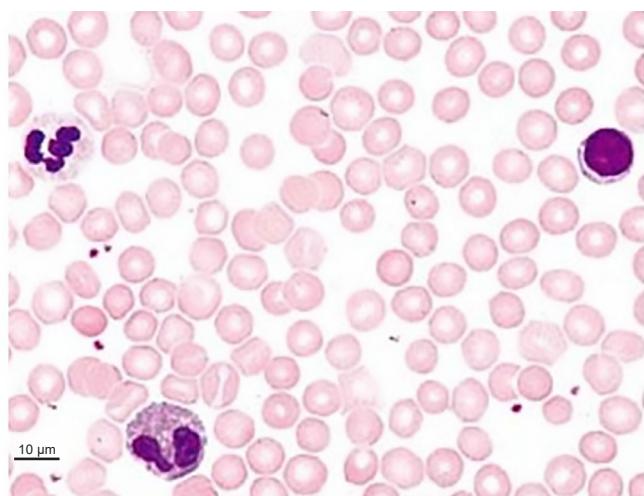
PREMIÈRE PARTIE : PHÉNOTYPE DE LA DRÉPANOCYTOSE

Mise en situation

La drépanocytose est une maladie que l'on rencontre essentiellement dans des populations humaines originaires des zones tropicales, particulièrement en Afrique.

L'individu Z âgé de 14 ans est hospitalisé pour toux et fièvre. Suite à l'entretien médical et une analyse sanguine, le médecin diagnostique que l'individu Z est atteint de drépanocytose.

Document de référence : qu'est-ce qu'un frottis sanguin ?



Un frottis sanguin est une goutte de sang étalée sur une lame de microscope, dans le but d'observer des cellules. Le frottis est coloré pour révéler la présence de certaines cellules qui sans cela seraient transparentes, donc invisibles au microscope. On peut distinguer plusieurs types de cellules sanguines qui baignent dans un liquide clair, le plasma :

- de très nombreuses petites cellules sont sans noyau, ce sont les globules rouges ou hématies. Elles apparaissent de couleur rosée. Leur rôle principal est le transport du dioxygène ;
- d'autres sont plus grandes et on distingue dans leur cytoplasme un noyau coloré en violet, ce sont les globules blancs ou leucocytes. Ils participent aux défenses immunitaires.

www.hematocell.fr

Programme

- Expliquer l'organisation du monde vivant, sa structure et son dynamisme à différentes échelles d'espace et de temps.
- Mettre en relation différents faits et établir des relations de causalité pour expliquer la diversité génétique des individus, l'évolution des êtres vivants.

Parcours éducatifs

- Éducation à la santé, EDD : impacts possibles du changement climatique sur la répartition du paludisme.

Prérequis

- ADN support de l'information génétique, stabilité génétique des individus.

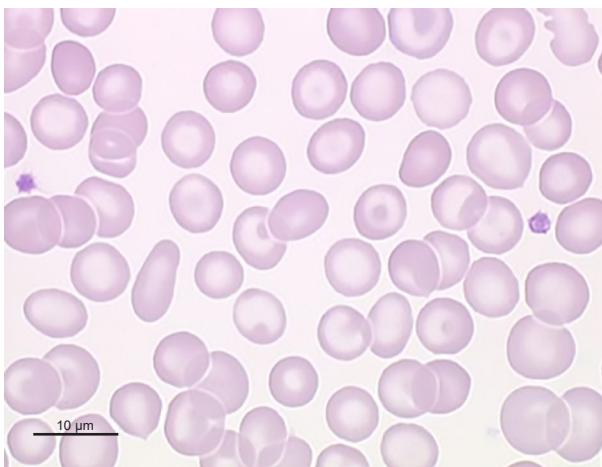


À partir des ressources à votre disposition, déterminer les indices qui ont permis au médecin de diagnostiquer la maladie de son patient.

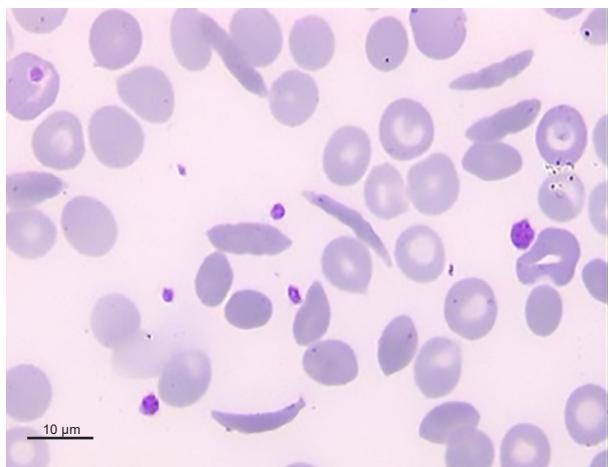
La production se présentera sous la forme d'un texte accompagné d'un dessin d'observation ou d'une image numérique annotée.

1 Frottis sanguins d'un individu sain ainsi que de l'élève Z

Frottis sanguin d'un individu sain (MO X 600)



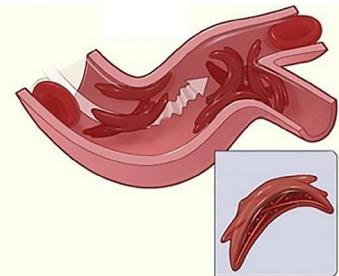
Frottis sanguin de l'individu Z (MO X 600)



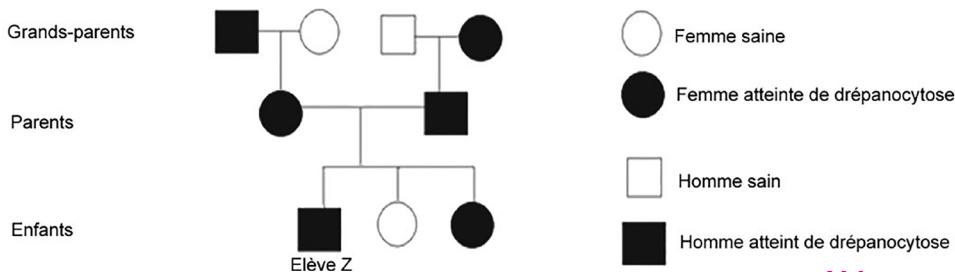
2 Symptômes de la drépanocytose et de la maladie de l'élève Z

L'élève Z est faible et souffre de vertiges et de maux de tête. Depuis un an, il ressent des palpitations (battements très rapides du cœur) et un essoufflement comme certains membres de sa famille. Ces symptômes sont ceux d'une maladie, la drépanocytose. Elle n'est pas rare et atteint plus les populations africaines.

Les globules rouges ou hématies de ces individus se bloquent dans les capillaires sanguins (schéma ci-contre), ralentissent la circulation, provoquent des lésions dans les organes mal irrigués et sont ainsi à l'origine de douleurs et de fièvres. Ces hématies sont fragiles et ont une courte durée de vie.



3 Arbre généalogique de la famille de Z



Production attendue

Une photographie annotée ou un dessin d'observation montrant la présence d'hématies falciformes (en forme de faucille) chez Z.

L'association des hématies falciformes aux symptômes :

- leur forme provoque des troubles de la circulation sanguine qui peuvent expliquer des fièvres et des douleurs diffuses;
- les troubles de la circulation sanguine et la faible durée de vie des hématies falciformes peuvent expliquer un essoufflement, des vertiges et des palpitations puisque l'approvisionnement des organes en dioxygène est diminué.

L'arbre généalogique suggère que la maladie de Z est héréditaire.

Transition

Bilan sur le phénotype aux différentes échelles ; hypothèse d'une cause génétique, retour sur la notion de génotype.

Comment établir le lien entre génotype et phénotype ? Comment se fait la transmission de ces caractères héréditaires ?

Aides

1. Fournir les clichés des frottis sanguins d'un individu non atteint et de l'élève Z.
2. Pour faciliter l'analyse des frottis sanguins, proposer de comparer les hématies des deux individus.
3. Pour construire la réponse, utiliser le second paragraphe et le schéma du document 2 pour expliquer comment la forme des hématies est à l'origine des symptômes de Z.

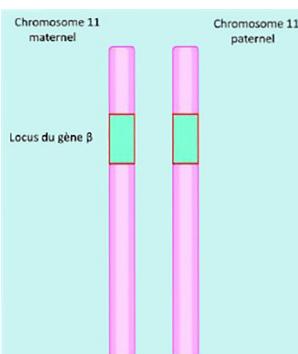
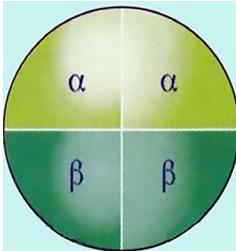


DEUXIÈME PARTIE : RELATION GÉNOTYPE PHÉNOTYPE

1 L'hémoglobine, une protéine présente dans les hématies

L'hémoglobine est une protéine présente en solution dans le cytoplasme des hématies. Elle est constituée de deux chaînes protéiques α et deux chaînes protéines β . Chacune de ces chaînes peut transporter une molécule de dioxygène.

La fabrication des chaînes α est codée par les gènes α_1 et α_2 localisés sur le chromosome 16 alors que les deux chaînes β sont codées par un seul gène localisé sur le chromosome 11.



Programme

- Expliquer sur quoi reposent la diversité et la stabilité génétique des individus.
- Expliquer comment les phénotypes sont déterminés par les génotypes et par l'action de l'environnement.

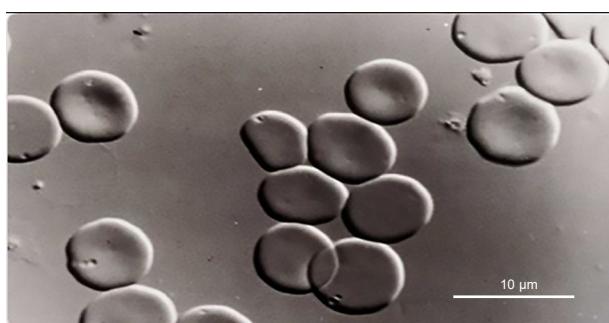
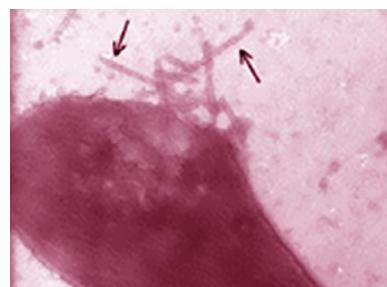


A partir des ressources à disposition, proposer une explication de la forme particulière des globules rouges de Z.

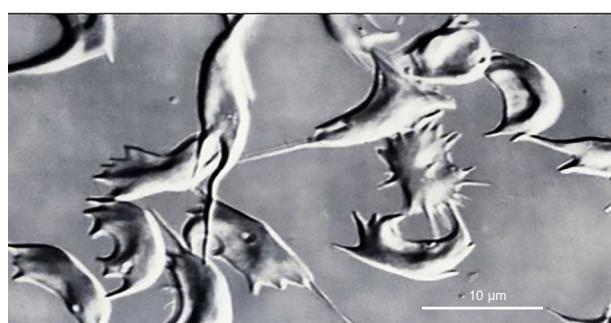
2 Une forme anormale de l'hémoglobine

On connaît un allèle muté du gène β , appelé HbS. L'hémoglobine formée chez des individus possédant cet allèle HbS devient insoluble dans le cytoplasme des hématies dans les régions où la concentration en dioxygène est faible.

Les hémoglobines s'accrochent entre elles et forment ainsi des baguettes rigides (flèches sur la photographie ci-contre). Ces baguettes, en s'allongeant, peuvent déformer les hématies.



Hématies de forme normale (microscope optique)

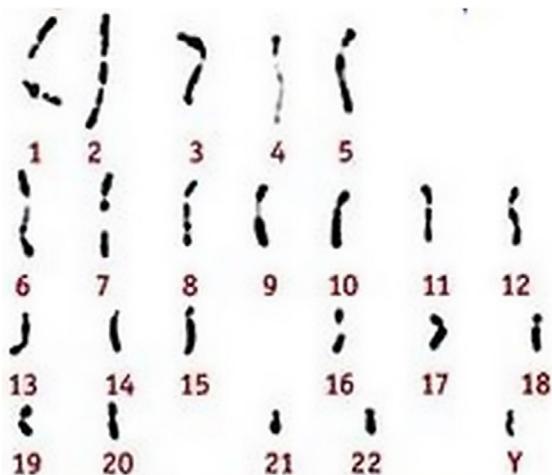
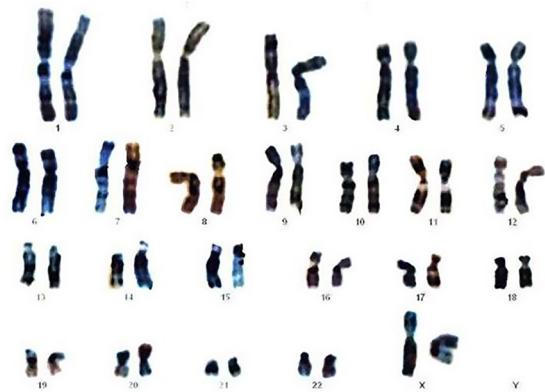


Hématies falciformes (microscope optique)

TROISIÈME PARTIE : TRANSMISSION DE LA DRÉPANOCYTOSE

Mise en situation

Voici le caryotype d'une cellule œuf (en haut) et d'un gamète (en bas) résultat de la division cellulaire appelée "Méiose".



Programme

- Expliquer sur quoi reposent la diversité et la stabilité génétique des individus.
- Expliquer les mécanismes à l'origine de la diversité et de la stabilité génétique des individus.
- Brassage, méiose et fécondation.

Prérequis

- La cellule œuf est issue de la fusion d'un ovule et d'un spermatozoïde.



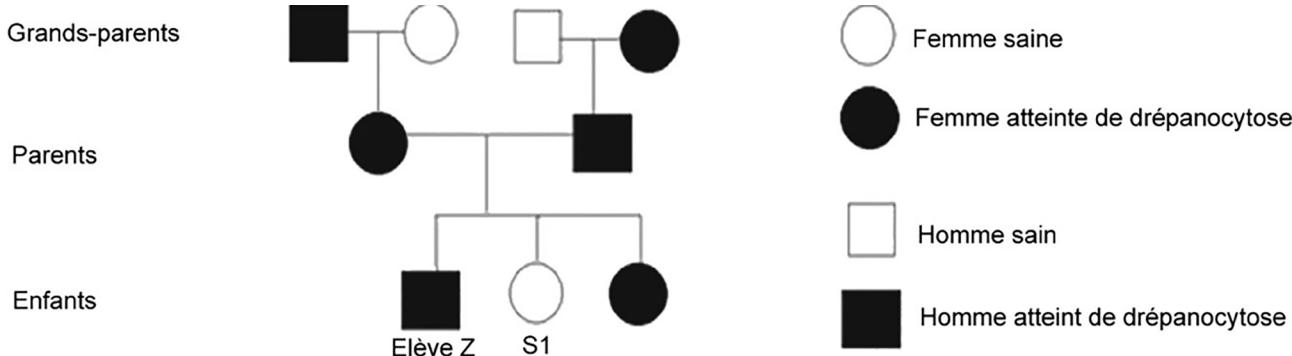
À partir du document 1 et du schéma de la méiose, expliquez pourquoi l'élève Z est atteint alors que sa sœur (S1) ne l'est pas.

Document ressource

Donner un schéma de la méiose avec des cellules $2n = 4$ ou le construire avec les élèves ou en donner une trame et compléter la garniture chromosomique en positionnant les allèles des gènes α_1 et β .

1 La drépanocytose dans la famille de Z

La famille de Z est durement touchée par la drépanocytose : ses parents et deux de ses grands-parents sont atteints, ainsi qu'une de ses sœurs alors que son autre sœur (S1) n'est pas atteinte.



QUATRIÈME PARTIE : DRÉPANOCYTOSE ET SÉLECTION NATURELLE

1 Carte de la répartition du paludisme en 2014



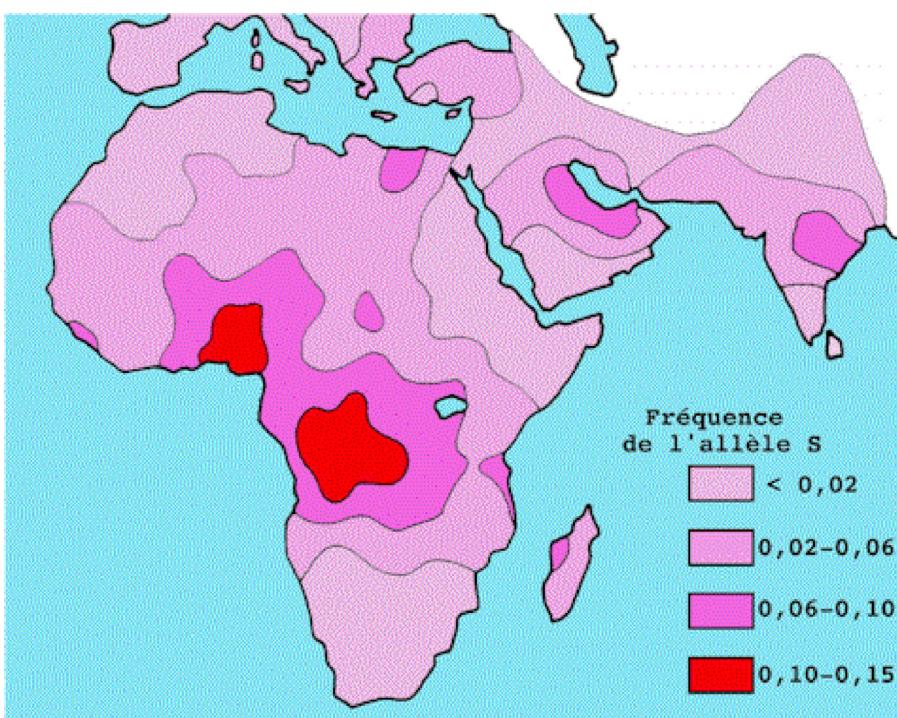
Programme

- Expliquer comment les phénotypes sont déterminés par les génotypes et par l'action de l'environnement.
- Relier, comme des processus dynamiques, la diversité génétique et la biodiversité.



A l'aide de l'ensemble des documents, rechercher une explication au fait que la drépanocytose est fréquente en Afrique et plus rare en Europe. Présenter la réponse sous la forme d'un texte argumenté.

2 Carte de fréquence de l'allèle HbS dans les populations

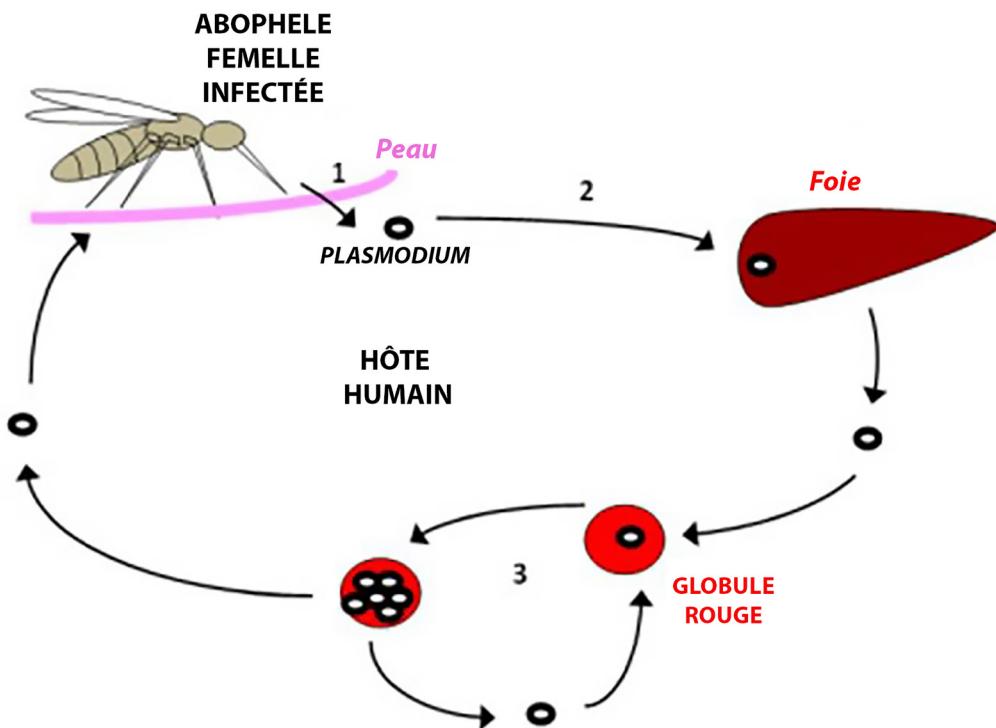


Carte de fréquence de l'allèle HbS

Malgré le handicap que représente l'allèle HbS pour les personnes qui en sont porteuses, celui-ci est particulièrement répandu dans le continent africain ; on le trouve également en Inde, en Arabie saoudite et dans d'autres régions du bord de la Méditerranée, en Italie (surtout en Sicile), en Grèce et en Anatolie.

D'après <https://acces.ens-lyon.fr>

3 Cycle du parasite responsable du paludisme



Le paludisme est une maladie causée par un parasite nommé *Plasmodium*, transmis à l'Homme par des moustiques lors de piqûres (1). Le parasite gagne alors le foie (2) où il se multiplie lentement. Puis de nouvelles formes du parasite sont libérées dans le sang où elles infectent les hématies. Le parasite s'y multiplie activement et détruit les hématies lorsqu'il s'en échappe (3). Les parasites libérés dans le sang réinfectent d'autres hématies, ils peuvent être absorbés par un moustique lors d'une piqûre (repas sanguin).

D'après <http://unt-ori2.crihan.fr>

Production attendue

Mise en lien la phase érythrocytaire du cycle du paludisme avec les anomalies des hématies des drépanocytaires.

Identification des deux pressions de sélection :

- celle de la drépanocytose sur les hétérozygotes porteurs de l'allèle HbS ou d'une mortalité prématuée pour les homozygotes ;
- celle du paludisme sur les non porteurs de l'allèle HbA.

Conclure sur l'avantage sélectif conféré aux hétérozygotes HbS//HbA en zone de paludisme.

Pour aller plus loin

- discuter les fréquences élevées d'HbS en Europe du Sud, liées à la présence du paludisme jusqu'à la fin de la première moitié du XX^e siècle ;
- discuter les impacts possibles du réchauffement climatique sur la répartition du paludisme et de la distribution de l'allèle HbS ;
- discuter l'effet épistatique négatif entre allèles β-thalassémiques et HbS.



LES DIFFICULTÉS LIÉES À LA VIE EN HAUTE ALTITUDE... ET L'ORIGINE GÉNÉTIQUE DE L'ADAPTATION DES TIBÉTAINS

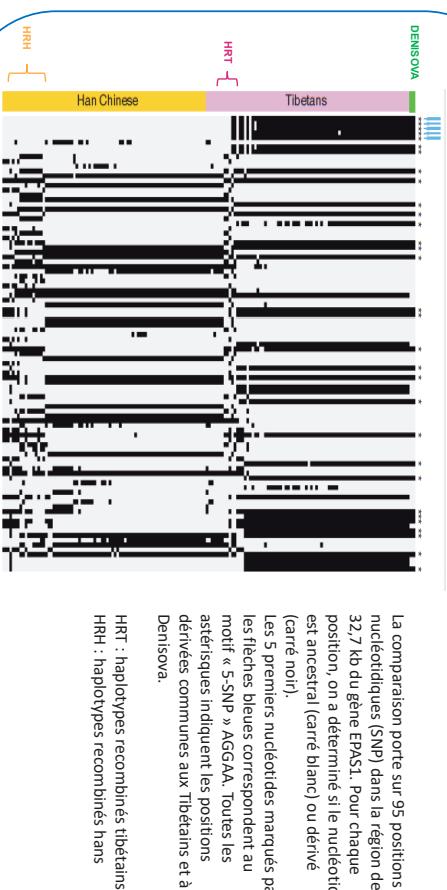
Différenciation maximale sur l'ensemble du génome pour 325 paires de populations ($F_{ST} = 0$ pour des populations où les fréquences des polymorphismes SNP seraient identiques et 1 pour des populations qui seraient fixées à chaque position SNP pour des nucléotides différents)

Quelle origine pour cet haplotype particulier aux Tibétains ?

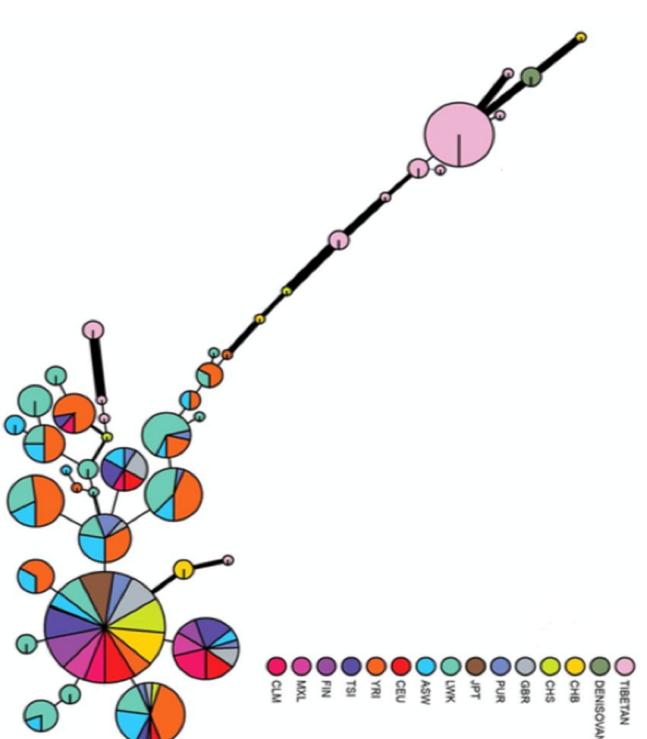
Figure 6. Relations de parenté entre haplotypes EPAS1 présents dans différentes populations

Les modèles théoriques montrent que la probabilité d'obtenir 5 SNP regroupés sur le même haplotype sous l'effet des mutations, de la dérive génétique et de la sélection naturelle s'exerçant à l'intérieur d'une population de taille limitée, est quasi nulle. En revanche quand on analyse la distribution des variants SNP tout au long du gène, on s'aperçoit que les Tibétains partagent 31 positions dites « dérivées » avec l'haplotype d'un Homme archaïque (figure 5) dont le génome a été séquencé à partir d'une phalange trouvée dans la grotte de Denisova en Sibérie.

Figure 5. Haplotypes comparés des 40 Tibétains, 40 chinois Hans et de Denisova



Les haplotypes tibétains et Denisoviens ont donc une origine commune. Cette proximité génétique se retrouve clairement dans l'arbre qui décrit la fréquence des différents haplotypes présents dans l'ensemble des populations humaines (figure 6).



La longueur et l'épaisseur des traits reliant chaque camembert sont proportionnelles aux nombres de différences observées dans l'haplotype.

La taille des camemberts correspond aux nombres d'individus porteurs de l'haplotype.

ASW : Afro-américains du Sud-Ouest ; CEU : résidents de l'Utah ayant pour ancêtres des Européens du Nord et de l'Ouest ; CHB et HAN : Chinois Hans de Pékin ; CHS : Chinois Hans du Sud ; CLM : Colombiens ; FIN : Finlandais ; GBR : Britanniques ; IBS : Espagnols ; JPT : Japonais ; MXL : Mexicains ; PUR : Portoricains ; LWK : Luhyas ; TSI : Italo-Brazilians ; TIB : Tibétains ; YRI : Yorubas.

Il apparaît donc qu'un haplotype dont l'origine n'est pas à chercher dans les populations d'Homme moderne confère un avantage sélectif à certaines populations de haute altitude. On ne sait rien de sa fonction initiale dans les populations ancestrales où il est originellement apparu. Néanmoins dans son contexte génomique actuel, cet haplotype, que la sélection naturelle a élevé en très forte fréquence chez les Tibétains, contribue à leur adaptation à la haute altitude.

Conclusion

Certains haplotypes de populations d'Hommes archaïques ont contribué à la diversité génétique des Hommes modernes. Il y a donc eu des flux de gènes du fait des nombreuses migrations humaines qui se sont échelonnées tout au long de l'histoire de l'espèce, comme il y en a encore à l'heure actuelle. D'autres exemples existent pour les gènes de pigmentation de la peau dont les formes eurasiatiques codant pour des peaux claires seraient héritées de Néandertal, un autre Homme archaïque ayant peuplé l'Eurasie. Ce peut être aussi le cas pour les mécanismes de thermorégulation chez les esquimaux Inuits. Mais beaucoup de choses restent encore probablement à découvrir dans ce domaine.

Ces recherches illustrent la puissance de l'analyse génomique moderne pour retracer l'histoire évolutive de nos gènes et de nos adaptations et soulignent l'importance des contacts entre populations, qui permettent la diffusion de gènes favorables à tout ou partie de l'espèce.

Les difficultés liées à la vie en haute altitude... et l'origine génétique de l'adaptation des Tibétains

D'après l'article de Huerta-Sánchez et al. « Altitude adaptation in Tibetans caused by introgression of Denisovan-like DNA », *Nature*, 512 : 194-197 (2014).

1. Institut des sciences de l'évolution, Université de Montpellier, CNRS, IRD, EPHE 2. Collège La Gardonne, Brignac 3. Lycée général et technologique P. Lamour, Nîmes 4. Lycée polyvalent G. De Gaulle-Anthonioz, Mihaud

L'origine de l'adaptation à l'altitude est génétique ☺

Il ne suffit pas de vivre en haute altitude pour s'y adapter. A cause de la faible pression en dioxygène, les individus originaires de basse altitude souffrent de différents maux. Ceci n'est pas une simple question d'accoutumance, car l'augmentation de la quantité d'hématies circulantes constatée lors de l'acclimatation à l'altitude entraîne de nombreuses complications. Ce n'est pas le cas des Tibétains qui montrent des quantités de globules rouges normales malgré l'altitude. Ils possèdent donc un patrimoine génétique qui permet cette adaptation.

Sur quel(s) gène(s) est basée cette adaptation ?

Cette adaptation repose sur un allèle particulier du gène EPAS1

Le gène EPAS1 contrôle la quantité d'hématies via un facteur de transcription impliqué dans la production des cellules sanguines (figure 1).

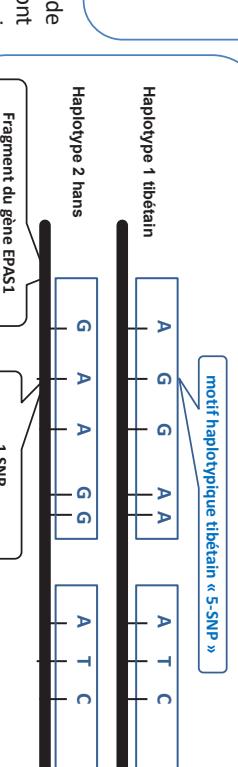
Figure 1. Localisation dans le génome et fonction du gène EPAS1



Une région de 32,7 kb du gène EPAS1 contient la majeure partie des SNP (single nucleotide polymorphism) qui diffèrent les Tibétains et les Hans.

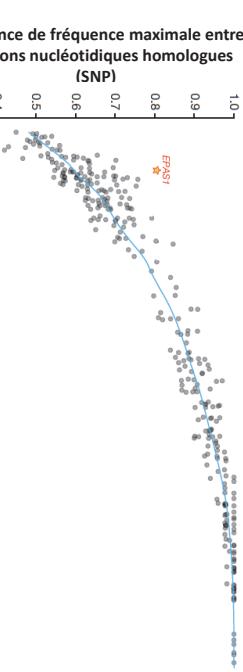
Dans cette région génomique, les Tibétains montrent des haplotypes (ou allèles) spécifiques comme présentés sur la figure 3.

Figure 3. Haplotypes du gène EPAS1



Les chercheurs ont entièrement séquencé ce gène chez 50 Tibétains vivant à une altitude de 4300 mètres et 40 Hans originaires de Pékin (à une altitude de moins de 50 mètres). Ils ont constaté que ces Tibétains étaient très différents pour ce gène, tant des populations Hans, qui leur sont par ailleurs génétiquement très proches, que des populations humaines du reste du monde. Ceci se voit sur la figure 2, qui montre que le gène EPAS1 s'écarte largement de la moyenne des autres gènes chez les Tibétains alors qu'il n'existe pas d'écart comparable dans les autres populations humaines.

Figure 2. Comparaison deux à deux des génomes des 26 populations étudiées



Un motif haplotypique de 5 SNP « AGGAA » (dans une sous-région de 2,5 kb) semble spécifique à une majorité de Tibétains alors que les Hans relativement proches des Tibétains possèdent quant à eux un motif différent « GAAGG » (figures 3 et 4).

Figure 4. Fréquence du motif haplotypique « 5-SNP » dans différentes populations



DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Rendre accessible des notions complexes.
- Définir un haplotype.
- Simplification de la lecture du "code barre" de la figure 5.

Cette étude met en évidence la présence d'une séquence génétique issue d'une espèce d'Hommes archaïques (*H. denisova*) dans le génome des populations tibétaines actuelles. Cette séquence est associée à un gène contrôlant la production d'hématies et pourrait ainsi expliquer l'adaptation des Tibétains à la vie en hypoxie chronique en haute altitude.

Le titre et le texte de l'article utilisent le terme d'introgression pour désigner le transfert d'une information génétique entre deux espèces suffisamment proches pour que les individus soient interféconds et leur descendance fertile. Ce type de croisements aboutit au transfert d'un ou de plusieurs gène(s) d'une espèce au « pool génétique » d'une autre, après une hybridation suivie de rétrocroisements répétés avec l'une des espèces parentes. Un tel processus aboutit à des individus génétiquement très proches de

l'espèce parente avec laquelle les rétrocroisements ont lieu, mais disposant de certaines séquences d'ADN émanant de l'autre espèce parente. Ces séquences acquises sont soumises aux forces évolutives. Le terme d'introgression n'a pas été retenu au niveau lycée.

L'essentiel du travail a consisté à rendre accessible aux élèves les notions de *Single Nucleotide Polymorphism* ou SNP et définir celle d'haplotype (voir document d'aide ci-dessous). Il en découle une généralisation de la notion d'allèle.

Une autre difficulté était de simplifier la lecture du « code barre » (figure 5 du poster) en proposant une légende suffisamment détaillée pour en guider la lecture. Cette figure 5 a fait l'objet d'une explicitation des axes et de l'ajout d'un code couleur.

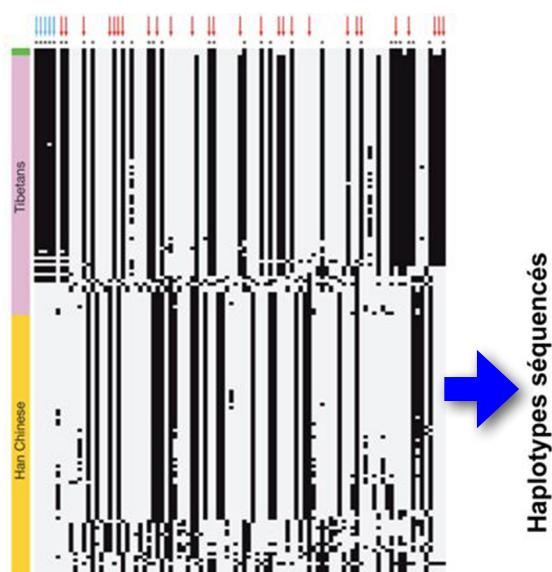
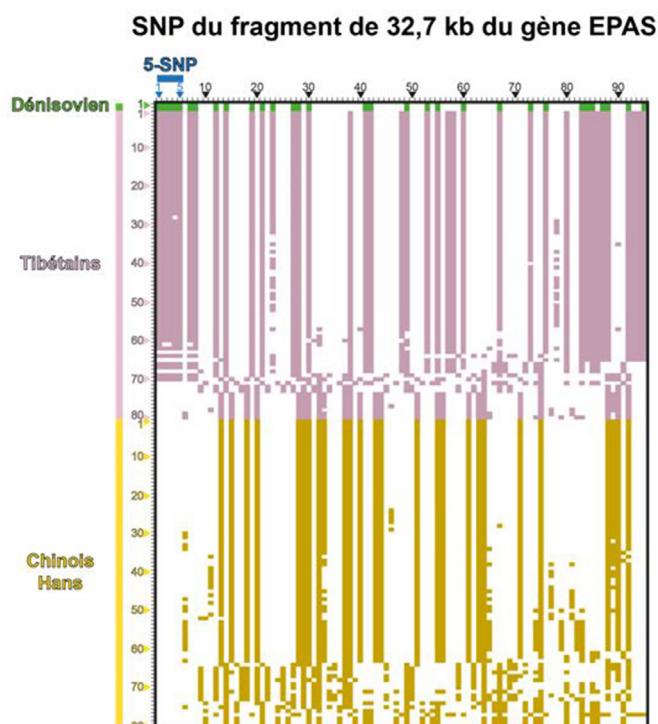


Figure 2 | Haplotype patterns in a region defined by SNPs that are at high frequency in Tibetans and at low frequency in Han Chinese. Each column is a polymorphic genomic location (95 in total), each row is a phased haplotype (80 Han and 80 Tibetan haplotypes), and the coloured column on the left denotes the population identity of the individuals. Haplotypes of the Denisovan individual are shown in the top two rows (green). The black cells represent the presence of the derived allele and the grey space represents the presence of the ancestral allele (see Methods). The first and last columns correspond to the first and last positions in Supplementary Table 3, respectively. The red and blue arrows indicate the 32 sites in Supplementary Table 3. The blue arrows represent a five-SNP haplotype block defined by the first five SNPs in the 32.7-kb region. Asterisks indicate sites at which Tibetans share a derived allele with the Denisovan individual.



LES DIFFICULTÉS LIÉES À LA VIE EN HAUTE ALTITUDE... ET L'ORIGINE GÉNÉTIQUE DE L'ADAPTATION DES TIBÉTAINS

Mise en situation

L'environnement de haute altitude est un milieu hostile pour l'Homme, et il ne suffit pas de vivre en haute altitude pour s'y adapter. Les contraintes physiologiques les plus importantes sont liées à l'hypoxie c'est-à-dire la raréfaction du dioxygène (O_2) dans l'atmosphère. La quantité d' O_2 transportée par l'hémoglobine du sang artériel est alors plus faible, et il en résulte un moindre apport d' O_2 aux tissus. Les individus originaires de basse altitude souffrent fréquemment de différents symptômes lorsqu'ils se rendent en altitude, désignés sous le nom de « mal des montagnes » : maux de tête, vomissements, essoufflement, grande fatigue...

Cependant au bout de quelques jours de séjour en altitude, ces symptômes disparaissent généralement, en raison de modifications physiologiques, en particulier une polyglobulie, c'est-à-dire une augmentation de la production d'hématies (globules rouges) par la moelle osseuse, et donc de la concentration d'hémoglobine du sang. Le transport de l' O_2 est ainsi amélioré, ce qui compense la baisse de la pression de ce gaz dans l'air.

Néanmoins il s'agit d'une simple acclimatation à court terme, et ce mécanisme pose des problèmes à long terme, car si le nombre de globules rouges est trop élevé, le sang devient trop visqueux et s'écoule avec difficultés dans les petits vaisseaux. Il s'ensuit une augmentation de la pression sanguine (hypertension) qui accroît à son tour le travail du cœur, ce qui augmente le risque d'accidents cardiaques comme on l'observe chez les populations vivant dans les Andes.

Ce n'est pas le cas chez les Tibétains qui présentent des quantités de globules rouges et d'hémoglobine normales, voire inférieures à la normale, bien qu'ils vivent en permanence à haute altitude. Le plateau tibétain est en effet situé à une altitude moyenne supérieure à 4000 m.

On pense que cette adaptation à long terme est liée à leur patrimoine génétique, à l'échelle de la population. Les chercheurs ont étudié l'implication du gène EPAS1, connu pour s'exprimer en fonction de la quantité d' O_2 présente dans le sang et contrôler la production des globules rouges.



En étudiant les génomes de différents groupes actuels et fossiles d'*Homo*, reconstituer l'histoire évolutive permettant d'expliquer l'origine génétique de l'adaptation à l'altitude chez les Tibétains.

Objectifs notionnels

- La diversité allélique entre les génomes humains individuels permet de les identifier et, par comparaison, de reconstituer leurs relations de parentés.
- Grâce aux techniques modernes d'extraction et de séquençage, on peut connaître les génomes d'êtres humains disparus à partir de restes fossiles. En les comparant aux génomes actuels, on peut ainsi reconstituer les principales étapes de l'histoire humaine récente.
- Certaines variations génétiques résultent d'une sélection actuelle (tolérance au lactose, résistance à la haute altitude) ou passée (résistance à la peste).

Compétences

- Recenser et exploiter des informations sur la diversité allélique au sein des populations (par exemple humaine).
- Explorer quelques stratégies et outils informatiques de comparaisons de séquences entre génomes individuels.
- Rechercher et exploiter des documents sur les génomes de néandertaliens et/ou de denisoviens.

Objectifs méthodologiques

- Savoir distinguer, dans la complexité apparente des phénomènes observables, des éléments et des principes fondamentaux.
- Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents en citant ses sources, à des fins de connaissance et pas seulement d'information.
- Communiquer sur ses démarches, ses résultats et ses choix, en argumentant.

Prérequis notionnels

- Forces évolutives, sélection naturelle.

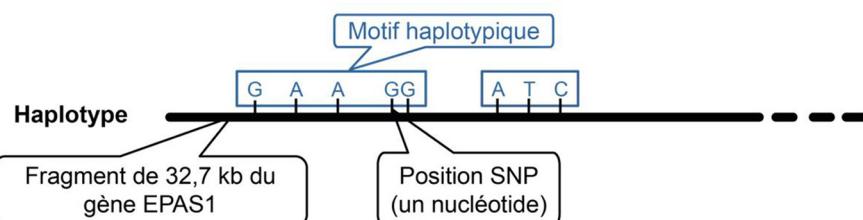
Prérequis Méthodologiques

- Alignements et comparaisons de séquences.
- Mise en relation d'informations extraites de divers documents.

Document de référence - SNP et haplotypes, des concepts pour l'étude de génomes individuels et la reconstruction de l'histoire évolutive du genre *Homo*.

On peut envisager le polymorphisme génétique entre individus et populations humaines à différentes échelles. La variabilité génétique prise en compte par les chercheurs dont les résultats sont présentés par les documents qui suivent est celle des « SNP » (pour *Single Nucleotide Polymorphism*), c'est-à-dire la variabilité nucléotidique existant pour une position bien précise dans une séquence d'ADN étudiée. Un SNP est donc un site de cette séquence pour lequel il existe au moins deux variants (cas le plus fréquent, car la probabilité qu'une mutation touche deux fois exactement la même position dans le génome, créant ainsi un SNP à trois variants, est très faible) chez les individus comparés : par exemple, un nucléotide à guanine et un nucléotide à adénine. À cette échelle d'étude, on peut alors définir les deux variants comme deux « allèles » SNP (par extension de la définition du terme « allèle », initialement utilisé pour les différentes versions d'un gène).

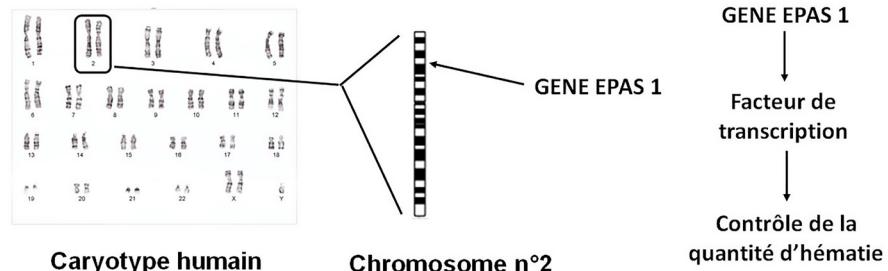
Par ailleurs, on définit un haplotype comme un fragment de chromosome suffisamment court – ici un fragment de 32,7 kb du gène EPAS1 – pour que la recombinaison entre chromosomes soit rare, de sorte que les variants alléliques portés par ce fragment sont généralement transmis ensemble. On peut définir, au sein d'un haplotype, des associations particulières de SNP, formant un « motif » caractéristique d'un haplotype donné (voir l'illustration ci-contre).



1ÈRE ÉTAPE IMPLICATION DU GÈNE EPAS1 ET PARTICULARITÉ GÉNÉTIQUE DES TIBÉTAINS

1 Localisation et fonction du gène EPAS1

L'expression du gène EPAS1 entraîne la synthèse d'un facteur de transcription (HIF2A) qui contrôle l'expression d'autres gènes, en particulier le gène EPO. Ce dernier s'exprime dans le rein et code une hormone (l'érythropoïétine) qui stimulate la prolifération des cellules souches d'hématies dans la moelle osseuse, et donc la production de ces cellules sanguines.



Exploitation attendue

Le gène EPAS1 porté par le chromosome n° 2 est impliqué dans la production d'hématies. A ce titre, il est important pour l'adaptation à l'altitude, qui repose en particulier sur des quantités différentes d'hématies et d'hémoglobine selon la population d'origine de l'individu. On peut donc s'attendre à ce que les Tibétains, par rapport aux autres populations humaines, présentent une version différente du gène EPAS1.

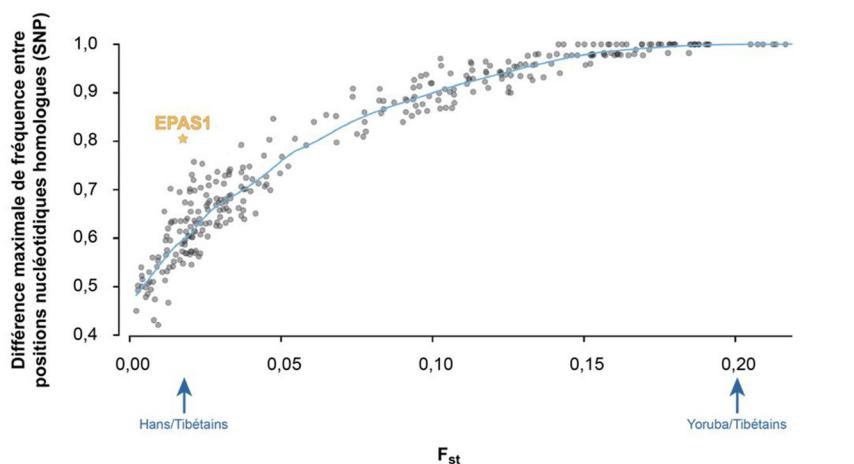
2 Différenciation génétique entre populations et différence maximale de fréquence d'allèle SNP

Les chercheurs ont comparé deux à deux les génomes de 26 populations humaines différentes, afin de déterminer leur plus ou moins grande différence génétique, quantifiée par une grandeur nommée indice de fixation ou F_{st} sur l'axe des abscisses.

L'axe des ordonnées présente la différence maximale de fréquence d'« allèles SNP » entre deux populations. Par exemple, si le SNP le plus différencié entre les deux populations est présent à 80 % dans une population et à 20 % dans une autre, la différence de fréquence maximale est alors de 0,6 (ou 60 %).

Le graphique met en relation ces deux paramètres : chaque point correspond au SNP le plus différencié, pour un F_{st} donné entre deux populations. La courbe bleue quant à elle donne la tendance générale.

NB : les Yorubas constituent une ethnie du bassin du fleuve Niger en Afrique de l'Ouest.



Différenciation moyenne sur l'ensemble du génome pour 325 paires de populations différentes
($F_{st} = 0$ pour des populations où les fréquences des polymorphismes SNP seraient identiques et 1 pour des populations qui seraient fixées à chaque position SNP pour des nucléotides différents)

Exploitation attendue

La courbe bleue montre que (de façon logique) les populations les plus différencieront génétiquement (exemple : Tibétains et Yorubas, population du Sud de l'Afrique) tendent à présenter des mutations avec les plus grandes différences de fréquence entre allèles SNP.

On constate par ailleurs que la différence génétique entre Tibétains et Chinois Hans, évaluée pour l'ensemble du génome sur l'abscisse, est relativement faible, quantifiée par une valeur de F_{st} de 0,02 environ.

Si l'on considère la courbe bleue, la différence maximale de fréquence entre allèles SNP devrait être, pour une telle proximité génétique, inférieure à 0,6. Or la valeur maximale approximative relevée est de 0,8, pour un SNP appartenant au gène EPAS1, marqué par une étoile, ce qui s'écarte nettement de la tendance générale.

Par cette méthode de l'étude du polymorphisme des SNP, les auteurs montrent ainsi que le gène EPAS1 présente des SNP très différenciés entre les Tibétains et les Chinois Hans, bien plus que la moyenne F_{st} à l'échelle du génome entre ces deux populations. On trouve donc chez ces deux populations, pour ce gène, des mutations présentes à des fréquences bien supérieures à celles attendues compte tenu de l'importante proximité génétique globale entre Chinois Hans et Tibétains. La (les) position(s) nucléotidique(s) présentant les différences maximales de fréquences d'allèles SNP apparaissent alors comme un (de) « bon(s) candidat(s) » pour être impliqués dans les particularités de l'adaptation des Tibétains à l'altitude, et à ce titre pour avoir été soumis à une sélection positive.

3 Exploitation d'un fichier de séquences nucléotidiques du gène

EPAS chez des individus actuels

Le fichier TIB1-TIB2-Han.edi contient les séquences nucléotidiques d'un fragment du gène EPAS obtenus à partir de différents individus actuels Tibétains ou Chinois de l'ethnie Han. Il peut être exploité avec un logiciel de traitement des séquences (Anagène ou GénieGen). *Le protocole ci-dessous correspond à l'analyse des séquences avec Géniegene2.*

Exploitation attendue

La longueur totale de comparaison est de 2 427 nucléotides. La comparaison simple avec le Tibétain n°1 montre cinq différences aux positions 1, 765, 1 102, 1 855 et 2 427, formant un motif AGGAA chez le Tibétain n°1, au lieu de GAAGG chez le Chinois Han de référence.

On n'observe pas de différences entre le Chinois Han et le Tibétain n°2 ; ce qui montre une variabilité au sein même de la population de Tibétains.

NB : il s'agit ici de séquences formant des haplotypes ; le statut homozygote ou hétérozygote des individus ayant donné les deux séquences des Tibétains n'est pas connu.

Protocole

<https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/geniegen2/?load=EXT-EPAS1-TIBET>

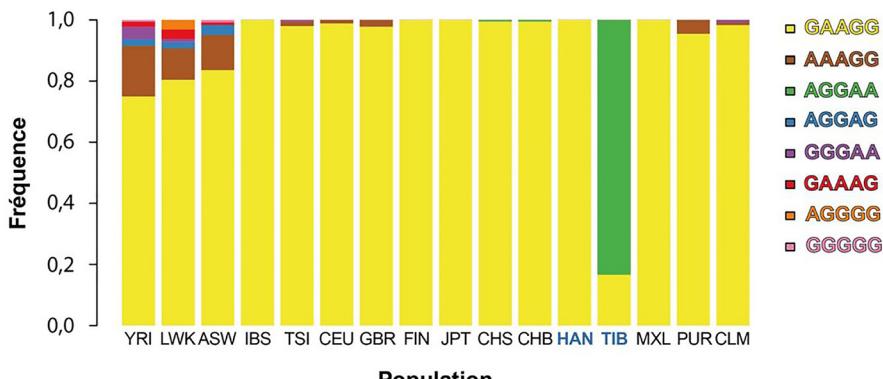
1. Ouvrir Géniegene2
2. Cliquer sur "Actions" puis "Aligner les séquences"
3. Faire la comparaison



4

Fréquence d'un motif haplotypique de cinq SNP chez différentes populations humaines

Dans le gène EPAS1, une région de 32,7 kb a été plus particulièrement étudiée car elle contient les 32 positions SNP les plus différencierées entre les Tibétains et les Hans. Au sein de cette région, les chercheurs se sont par la suite concentrés sur une sous-région de 2500 paires de bases (2,5 kb), porteuse de cinq sites SNP remarquables par leur polymorphisme, et transmis ensemble (haplotype). On étudie alors le « motif » formé par ces cinq sites, chez différentes populations.



ASW : Afro-américains du Sud-Ouest / CEU : résidents de l'Utah ayant pour ancêtres des Européens du Nord et de l'Ouest / CHB et HAN : Chinois Hans de Pékin / CHS : Chinois Hans du Sud / CLM : Colombiens / FIN : Finlandais / GBR : Britanniques / IBS : Espagnols / JPT : Japonais / MXL : Mexicains / PUR : Portoricains / LWK : Luhyas / TSI : Italiens / TIB : Tibétains / YRI : Yorubas.

Exploitation attendue

On constate que le motif 5-SNP AGGAA mis en évidence précédemment est très caractéristique des Tibétains, chez lesquels il est présent à une fréquence très élevée, supérieure à 80 %. Il est absent chez les Chinois Hans, pour lesquels on trouve un haplotype GAAGG, et absent également chez toutes les autres populations humaines entrant dans la comparaison effectuée ici.

Cela confirme l'exploitation des séquences réalisée avec le logiciel de traitement de séquence.

Bilan de la première étape

Ainsi on a pu mettre en évidence qu'une majorité de Tibétains présentent dans leur génome, pour le gène EPAS1, une particularité génétique qui les différencie nettement d'une population pourtant génétiquement très proche par ailleurs, celle des Chinois Hans. Cette particularité consiste notamment en une région de 32,7 kb assez différenciée du gène, et au sein de celle-ci en une sous-région de 2,5 kb porteuse d'un haplotype caractéristique des Tibétains, constitué des cinq nucléotides AGGAA.

Sachant que le gène EPAS1 contrôle, par l'intermédiaire d'un facteur de transcription, la quantité d'hématoxyline produites, soit une caractéristique physiologique impliquée dans l'adaptation à l'altitude, cet haplotype particulier est suspecté d'être décisif dans l'adaptation des Tibétains aux contraintes de la vie sur le plateau d'une altitude supérieure à 4000 m. A ce titre, cet haplotype aurait été sélectionné au cours du temps, dans cette population.

2ÈME ÉTAPE À LA RECHERCHE DE L'ORIGINE DE L'HAPLOTYPE SÉLECTIONNÉ

Mise en situation

Les chercheurs ont essayé de déterminer si la présence à fréquence élevée de cinq SNP différents dans un même haplotype pouvait s'expliquer en invoquant simplement les mécanismes de mutation, de dérive génétique et de sélection naturelle.

Pour cela, ils ont exploité différents modèles, pour une région de 32,7 kb et des degrés variables de l'intensité de sélection. Ils ont alors abouti à la conclusion que la probabilité d'obtenir cinq SNP

regroupés sur le même haplotype sous l'effet des mutations, de la dérive génétique et de la sélection naturelle s'exerçant à l'intérieur d'une population de taille limitée, est quasi nulle.

Les chercheurs ont alors émis l'hypothèse que les caractéristiques génétiques des Tibétains, pour le gène EPAS1, provenaient d'une population extérieure d'Hommes archaïques.



En s'appuyant sur les documents 5 à 7 et en exploitant le fichier de séquences nucléotidiques Denisovien-Neandertalien-Tibétains, tester cette hypothèse, et identifier quelle pourrait être cette population d'Hommes archaïques.

5 Des populations archaïques, candidates potentielles concernant l'apport génétique extérieur

Depuis 2010, on dispose d'une version de la séquence nucléaire de l'Homme de Néandertal, version qui a été ensuite précisée dans une publication en 2014. En outre, en 2012, une phalange a été trouvée dans la grotte de Denisova en Sibérie, dont on a réussi à extraire l'ADN nucléaire et à le séquencer. Cet ADN nucléaire est manifestement celui d'un *Homo* mais différent des *H. sapiens* et des *H. neanderthalensis*. Bien qu'on ne connaisse rien de son squelette, on a créé sur la base des caractéristiques de cet ADN fossile, un autre groupe d'*Homo*, celui des Dénisoviens, ou Hommes de Denisova, groupe aujourd'hui éteint, comme celui des néandertaliens.

Source : www.acces.ens-lyon.fr

6 Exploitation d'un fichier de séquences nucléotidiques du gène EPAS chez des individus actuels et fossiles

Le fichier de séquences nucléotidiques Dénisovien-Néandertalien-Tibétains.edi contient les séquences nucléotidiques du fragment de 2,5 kb du gène EPAS obtenus à partir de différents individus actuels (Tibétains) ou fossiles (Dénisoviens, Néandertaliens). Il peut être exploité avec un logiciel de traitement de séquences (Anagène ou Geniegen). Le protocole ci-contre correspond à l'analyse des séquences avec Géniegene2.

Exploitation attendue du fichier de séquence

On observe notamment que sur les 2 427 nucléotides comparés, il n'y a aucune différence entre l'Homme de Denisova et le Tibétain 1, quelques-unes (2 ou 3) entre Néandertal et Tibétains 1 ou 2. Un tableau en nombre de différences peut être construit. Le motif AGGAA caractéristique de la majorité des Tibétains n'est pas retrouvé chez Néandertal qui présente un motif GGGAG.

On peut proposer qu'il existe une plus grande proximité entre l'Homme de Denisova et le Tibétain 1, pour cette sous-région de EPAS1, qu'entre les Néandertaliens et les Tibétains.

Protocole

<https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/geniegen2/?load=EXT-DENISO-NEANDER-TIBET>

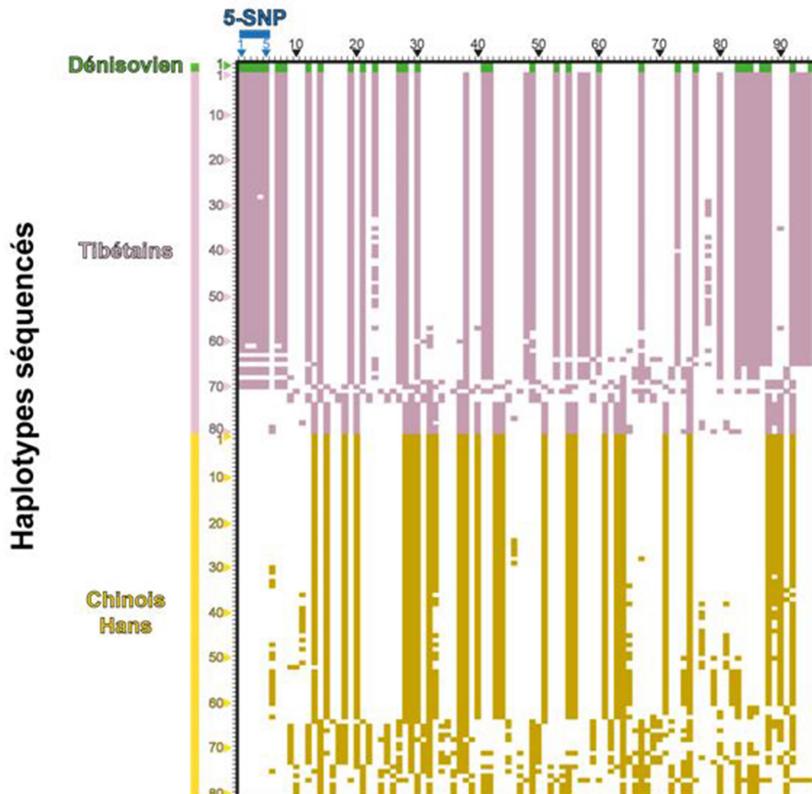


1. Ouvrir le lien Géniegene2.
2. Cliquer sur "Actions" puis "Aligner les séquences".
3. Faire la comparaison.
4. Cliquer sur "Affichage" puis "Tableau de comparaison".



7 Des « code-barres » différents dessinant une origine possible aux caractéristiques génétiques des Tibétains...

SNP du fragment de 32,7 kb du gène EPAS



Les chercheurs ont comparé 95 positions nucléotidiques dans la région de 32,7 kb du gène EPAS1 (voir document 3) et pour lesquelles un SNP a été identifié. Ces positions sont reportées en abscisse.

Les haplotypes pour ces SNP ont été analysés par séquençage de l'ADN chez un Dénisovien, 40 individus Tibétains et 40 individus Chinois Hans, reportés en ordonnée. Pour chaque individu, les 2 haplotypes ont été déterminés.

Pour chaque position on a déterminé si la version du SNP est ancestrale (carré blanc) ou dérivée (carré coloré), par comparaison avec les grands singes (Chimpanzé, Bonobo ou Orang-Outan). Les 5 premiers nucléotides délimités par les flèches bleues correspondent au motif « 5-SNP » AGGAA étudié précédemment.

Exploitation attendue

En considérant la distribution de 95 variants SNP sur la région de 32,7 kb du gène EPAS1, on s'aperçoit que les Tibétains partagent 31 positions dites « dérivées » avec l'haplotype de l'Homme de Denisova. La plupart de ces positions dérivées ne sont en revanche pas partagées avec les Chinois Hans.

En particulier, le motif 5-SNP AGGAA défini précédemment (flèches bleues) est partagé en exclusivité par les Tibétains et Denisova, alors qu'aucun Chinois Han ne le possède.

Remarque

On retrouve le motif AGGAA dans deux haplotypes de Chinois Hans (document 4, bande verte en haut des barres CHS et CHB) ; cela suggère que ce motif est apparu chez les humains modernes avant la divergence des Tibétains par rapport aux Hans. Ce motif aurait ensuite été soumis à une sélection positive chez les Tibétains lorsqu'ils se sont établis sur le plateau tibétain.

Bilan-conclusion de la 2ème étape

On peut donc conclure que les données étudiées ici sont cohérentes avec l'explication envisagée par les chercheurs : l'haplotype favorable à l'adaptation des Tibétains à l'altitude aurait pour origine une population d'Homme archaïque. Cet haplotype aurait alors été intégré aux populations à l'origine des Tibétains actuels. Il s'agit d'une nouvelle illustration de l'importance des flux de gènes entre populations, dans l'évolution humaine et dans les adaptations à de nouveaux environnements.

Remarque : les auteurs de l'article utilisent (notamment dans le titre lui-même) le terme d'introgression pour désigner le mécanisme de transfert d'une information génétique ainsi mis en évidence. Ci-après une définition simple de ce terme, non employé au lycée.

Introgression : transfert d'un ou de plusieurs gène(s) d'une espèce au « pool génétique » d'une autre, après une hybridation suivie de rétrocroisements répétés avec l'une des espèces parentes. Un tel processus aboutit à un être très proche de l'original d'un point de vue génétique, mais disposant de certaines séquences d'ADN émanant de l'autre espèce parente (définition issue de www.futura-sciences.com).

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

[http://ent-apbg.org/evolution_action/tibetain/
POSTER_tibetain.pdf](http://ent-apbg.org/evolution_action/tibetain/POSTER_tibetain.pdf)

**Accès aux documents**

[http://ent-apbg.org/evolution_action/tibetain/docs_
tibetain.zip](http://ent-apbg.org/evolution_action/tibetain/docs_tibetain.zip)





HOMME-VACHE : UN EXEMPLE DE COÉVOLUTION GÈNE-CULTURE

à montré une grande diversité allélique dans les **6 gènes codant des protéines du lait**.

Figure 3. Loci des 6 gènes codants les protéines de lait (A) et leur polymorphisme allélique inter et intra élevage (B)

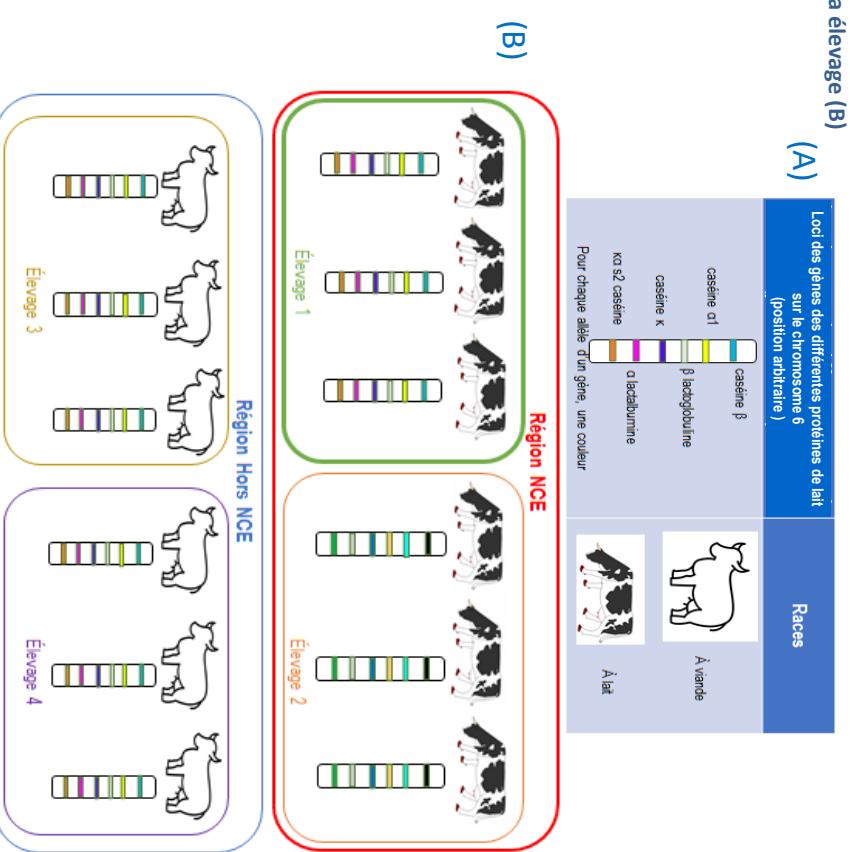
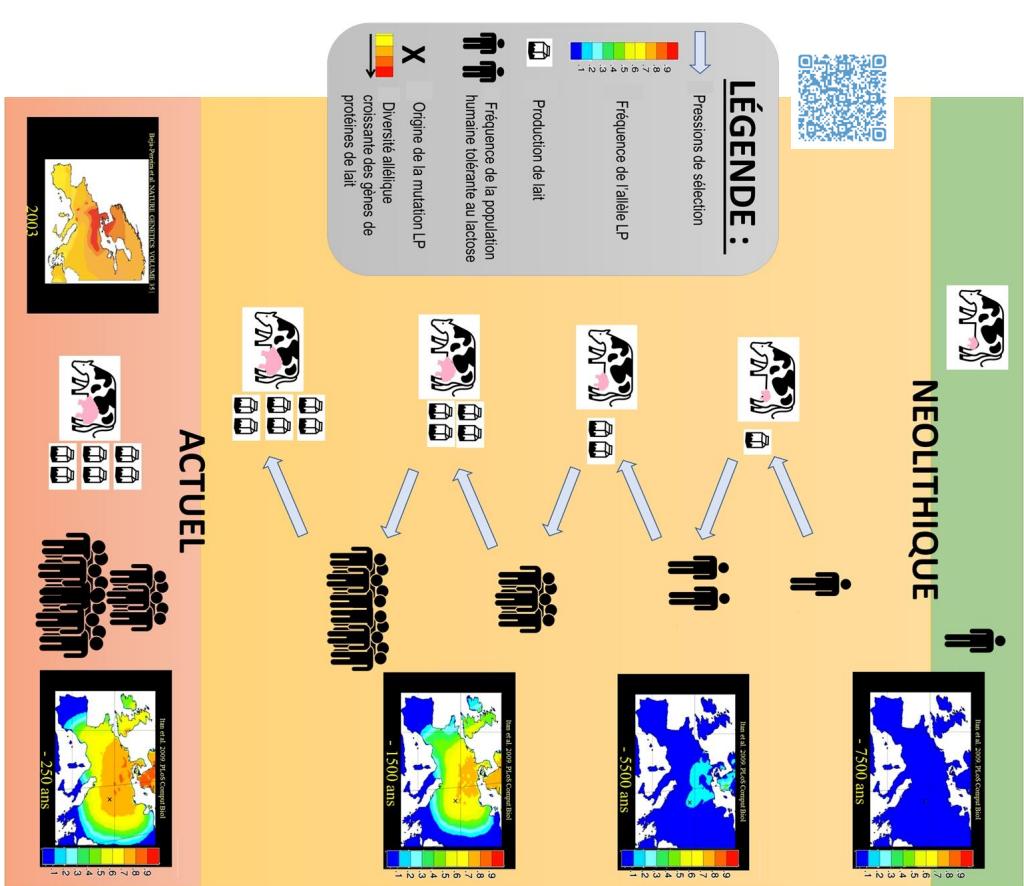


Figure 4. Co-évolution « gène-pratique culturelle » entre l'espèce humaine et vaches



Conclusion

La pratique culturelle de la consommation de lait a favorisé la présence de l'allèle de « persistance de la lactase » dans le génome humain (Figures 1 et 2). Par ailleurs, l'espèce humaine a exercé une pression de sélection sur les vaches dans le but d'augmenter leur production laitière, ce qui a, au cours des générations, modifié leur génoïde (Figure 3).

Ainsi, on explique les particularités génétiques à la fois des populations humaines (forte fréquence du phénotype LP) et des populations bovines (polymorphisme important des gènes codant les protéines du lait) du Nord de l'Europe centrale par une « coévolution gène-pratique culturelle » entre l'espèce humaine et les vaches (Figure 4).

Homme-Vache

Un exemple de coévolution gène-culture

D'après l'article de Beja-Pereira et al. : « Gene-culture coevolution between cattle milk protein genes and human lactase genes », 2003 *Nature genetics* 35: 311-313 (2003)

M. Raymond¹, C. Lapierre², A. Courty², N. Gaubé³, C. Lanet⁴ et J. Cornynck⁴

1. Institut des Sciences de l'Evolution, Université de Montpellier CNRS, IRD, EPHE 2. Lycée Général et Technologique Jean Moulin, Pézenas 3. Collège René Cassin, Agde 4. Lycée Polyvalent Marc Bloch, Sérignan

Introduction : évolution du gène de la lactase humaine

En plus de 6 protéines principales, le lait contient, en quantité, du lactose (glucide). Pour être absorbé et passer dans le sang, celui-ci doit être digéré par une enzyme intestinale, la lactase.

Les individus qui n'expriment plus cette enzyme après l'âge de 5 ans sont dits "intolérants au lactose" ou LNP (= Lactase Non Persistants), à l'inverse des individus LP (= Lactase Persistants) qui continuent à l'exprimer et restent ainsi capables de digérer le lactose. Cette capacité est plus ou moins répandue dans les différentes populations humaines.

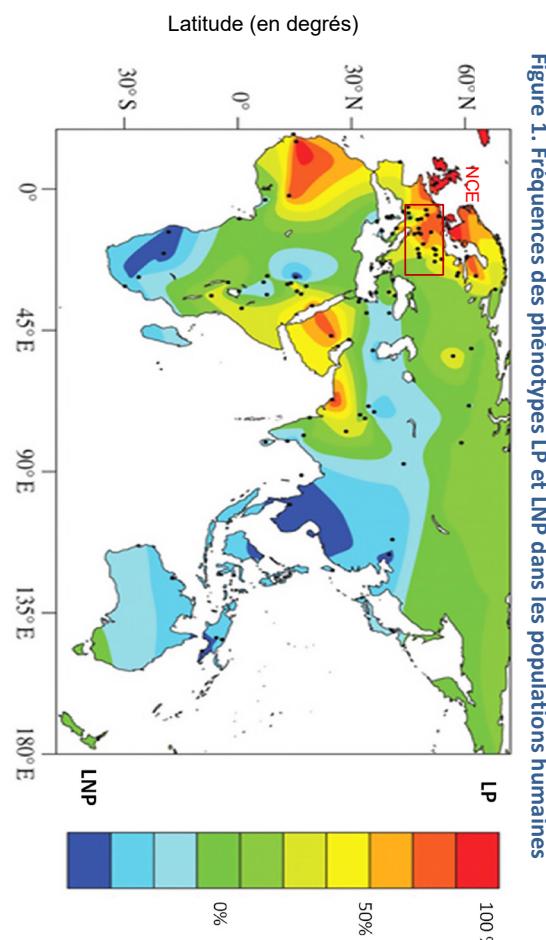


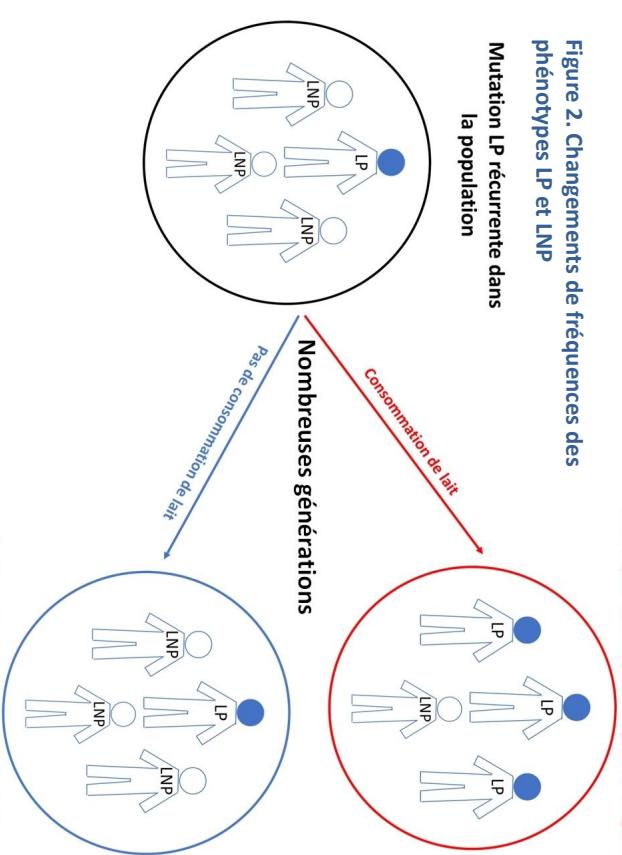
Figure 1. Fréquences des phénotypes LP et LNP dans les populations humaines

Figure 2. Changements de fréquence des phénotypes LP et LNP

Mutation LP récurrente dans la population

→ fréquence du phénotype LP augmente

Dans les populations du nord de l'Europe Centrale (NCE), on constate une forte fréquence du phénotype LP (Figure 1). Ce phénotype est lié à une **mutation unique** d'une séquence régulatrice du gène codant la lactase, datée d'il y a 7 500 ans, ce qui correspond au début de l'élevage de bovins au néolithique. La fréquence du phénotype LP a par la suite augmenté du fait de l'avantage qu'elle confère aux individus porteurs consommant du lait.



Les vaches laitières sont diversifiées

En 2003, une analyse sur 20 000 vaches de 70 races différentes de la région NCE

(D'après Gerbaill et al. Phil Trans R Soc Lond B 2011; 366:863-877)

L'évolution des vaches est liée à l'évolution de la lactase humaine : co-évolution

DIDACTISATION DE L'ARTICLE

Le travail de didactisation

- Comprendre l'article.
- Adapter sans dénaturer.
- Transformer sans trahir.
- Ajouter des références, des articles pour éclaircir le propos.

Comprendre l'article

L'article étant rédigé en anglais, nous avons choisi, dans un premier temps, de le traduire pour totalement se l'approprier.

Plusieurs écueils se sont présentés :

- un simple problème de vocabulaire, très spécifique au sujet abordé : la coévolution humain/vache. Exemples : "cattle", "calves"...
- un problème lié au vocabulaire scientifique : "directional selection", "gene flow" dont le sens est compris, mais dont la traduction précise est délicate...

Indépendamment du problème de la langue, la compréhension de l'article en lui-même fut complexe à cause de sa nature. C'est un texte d'experts adressé à des experts. Ainsi, la méthodologie d'analyse sta-

tistique employée nous est totalement inconnue : "Sperman correlation coefficient". Certaines parties de l'article font explicitement référence à d'autres articles, mais sans les expliquer. Il a donc fallu les consulter. Enfin, certaines parties échappaient à notre compréhension : par exemple, comment expliquer une augmentation du polymorphisme au sein d'une population - "high intraspecific divergence" - alors qu'elle subit la même pression de sélection ?

Dans tous les cas, la collaboration et les échanges que nous avons eus avec M. Raymond, le chercheur de notre groupe, se sont avérés indispensables. Il nous a permis de comprendre et d'appréhender l'importance des découvertes présentées par l'article.

Adapter sans dénaturer

L'e but du poster, tel que nous l'avons conçu, est d'expliquer l'article sans le dénaturer. Pour cela, nous avons dû l'adapter et le transformer.

L'article présente, outre un long texte, un tableau et des cartes.

Pour le texte, nous avions comme idée de suivre les différentes étapes de la démarche scientifique. Partir de l'observation de la persistance de la lactase chez les peuples pratiquant l'élevage des bovins et les conséquences de cet élevage sur le génome des bovins eux-mêmes. Nous pensions reprendre différentes hypothèses et les expliquer.

Nous avons finalement abandonné cette idée, car elle semblait complexifier les concepts à présenter et ne permettait pas de rendre de manière fidèle le cheminement du travail effectué par les scientifiques. D'autre part, cet article fait référence à beaucoup d'autres recherches qui nous semblaient difficiles à intégrer au poster.

Nous avons donc recentré notre propos sur la coévolution "gène-culture" et les découvertes qui ont permis de les mettre en évidence, sans évoquer les recherches annexes et les autres articles auxquels l'article fait référence.

Le tableau de l'article présente le coefficient de corrélation de Spearman en comparant différentes données. Il n'est tout simplement pas exploitable en l'état. Ce sont des données statistiques précieuses, mais difficilement appréciables par des non-spécialistes.

Les cartes présentées, seules illustrations disponibles, nous ont semblé très précieuses. Là encore, une adaptation s'est imposée. Elles représentent une gradation de couleur, mais sans l'échelle correspondante. Le texte accompagnant les cartes précisait seulement la signification des "couleurs orange foncé". Nous avons donc recherché les fichiers sources et créé une échelle de couleur pour les accompagner.

Transformer sans trahir

Une grande partie du travail a été de transformer le texte en schémas. Nous avons décidé d'illustrer les concepts abstraits ou les moins accessibles : la sélection des personnes "lactase-persistantes", les gènes codant les protéines du lait et la diversité alléliques au sein des troupeaux, la coévolution gène-culture au cours du temps. C'est un travail de vulgarisation auquel nous sommes habitués, mais plusieurs points méritent d'être soulignés.

Après avoir essayé de dessiner des vaches, nous avons préféré trouver des ressources iconographiques. Pour cela, nous avons utilisées des icônes sous licence *creative common* issues du site www.thenounproject.com. Certaines illustrations ont été réalisées intégralement avec différents logiciels tels que Powerpoint.

À chaque étape, le chercheur a validé notre travail, en corigeant, précisant le vocabulaire employé.

Ajouter des références, des articles pour éclaircir le propos

Pour préciser l'intérêt de l'élevage bovin pour l'espèce humaine et le lien avec la persistance de la lactase, nous avons consulté l'article suivant : "La génétique de la tolérance au lactose et la sélection naturelle." (aussi présent sous la forme d'un QR code sur le poster) <https://bit.ly/2F3i6JP>

Il nous semblait intéressant d'intégrer la carte de l'article montrant la persistance de la lactase dans le monde pour introduire le sujet. Cet aspect est simplement évoqué dans notre article. Si c'est une évidence pour les auteurs de l'étude, ce n'est pas le cas pour des non-spécialistes.

Dans la perspective d'une utilisation pédagogique, cet article est également une ressource précieuse.

Dans la même idée, nous avons ajouté une carte de l'évolution de la fréquence de l'allèle *Lactase Persistence* depuis le Néolithique jusqu'à nos jours. Un QR code présent sur l'affiche permet de visualiser ces cartes sous la forme d'une animation.

En synthétisant ces différentes ressources, nous avons souhaité créer un ensemble cohérent permettant d'appréhender tous les aspects de la coévolution gène-culture.

Conclusion

Ce travail de création d'un poster nous a beaucoup apporté.

Du point de vue strict des connaissances, cela nous a montré l'intérêt de se confronter aux travaux des chercheurs pour renouveler nos cours avec des exemples plus concrets, plus proches de la réalité du terrain et des préoccupations de la recherche moderne.

Le travail nécessaire d'appropriation et d'adaptation du contenu des articles nous a permis de nous confronter à des contenus bruts, plus exigeants et non simplifiés tels que présentés dans les livres. Ce travail intellectuel nous a permis de nous poser des questions et de faire un travail réflexif toujours inté-

ressant. La mise en forme sur le poster, nous a conduit à nous questionner sur la transmission des savoirs en termes de communication et d'esthétique de présentation.

Enfin, ce travail a fait émerger la nécessité de travailler en équipe autour d'un tel projet. La nécessité d'une équipe de professeurs de profils divers, venant du collège et du lycée, mais surtout, la nécessité d'un travail en étroite collaboration avec un chercheur. Son expertise est indispensable pour répondre à toutes les questions des professeurs, les conseiller, les mettre en garde contre les simplifications excessives et les abus de langage liés à l'exercice de la vulgarisation.

En cliquant sur les liens suivants, vous pourrez télécharger le poster et également l'ensemble des documents pour une exploitation facilitée.

Accès au poster

http://ent-apbg.org/evolution_action/vache/POSTER_vache.pdf



Accès aux documents

http://ent-apbg.org/evolution_action/vache/docs_vache.zip



EXEMPLE D'ACTIVITÉ SECONDE

TÂCHE COMPLEXE

TOLÉRANCE AU LACTOSE, UN PROCESSUS ÉVOLUTIF

PARTIE I – UNE ADAPTATION FAVORABLE AUX POPULATIONS HUMAINES...

Mise en situation

L'intolérance au lactose est une affection fréquente qui provoque des malaises abdominaux, de la douleur et des diarrhées. Il résulte d'une carence en lactase (hypolactasie), l'enzyme responsable de la digestion du lactose et qui est produite par les cellules intestinales. "Chez tous les mammifères, la production de lactase disparaît après le sevrage" par un mécanisme encore peu compris, explique

Benjamin Bertin, (Inserm - CHU de Lille). Les individus qui ne fabriquent plus cette enzyme après l'âge de 5 ans sont dits "intolérants au lactose" ou LNP (= Lactase Non Persistante), à l'inverse des LP (= Lactase Persistante).

Cependant certaines populations, notamment les populations du Nord de l'Europe centrale présentent une forte tolérance au lactose.

Connaissances

- La sélection naturelle résulte de la pression du milieu et des interactions entre les organismes. Elle conduit au fait que certains individus auront une descendance plus nombreuse que d'autres dans certaines conditions.

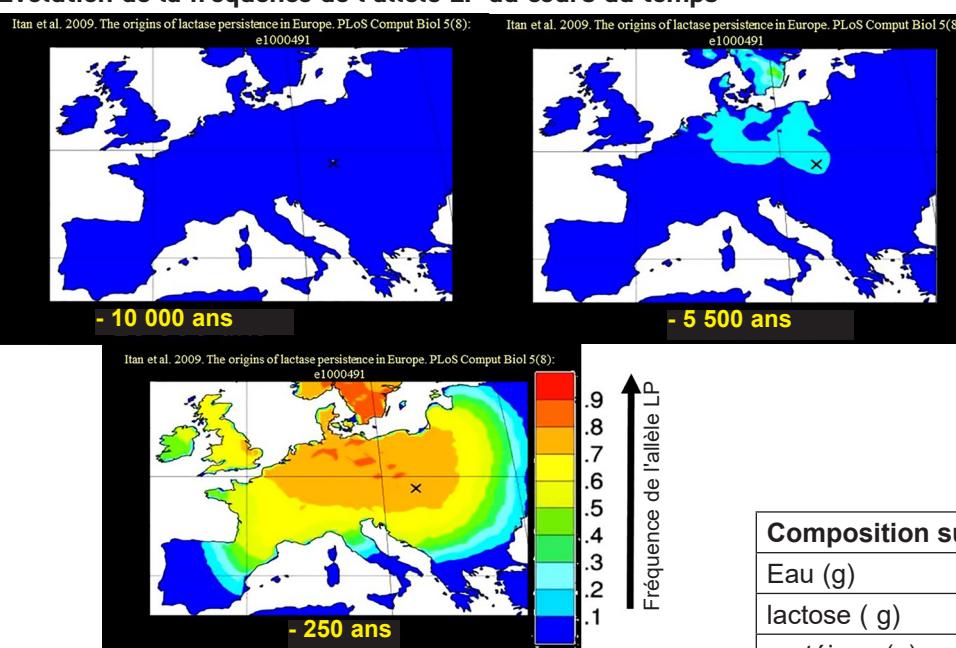
Prérequis

- Notion de sélection naturelle (cycle 4).

Compétences

- Recenser, extraire, organiser et exploiter des informations à partir de documents, à des fins de connaissance et pas seulement d'information.
- Identifier l'incidence (bénéfices et nuisances) des activités humaines sur l'environnement à différentes échelles

1 Évolution de la fréquence de l'allèle LP au cours du temps



À partir de l'ensemble des documents, expliquer l'évolution de la fréquence de l'allèle LP dans les populations du nord de l'Europe Centrale depuis 7500 ans.

2 Composition et bienfaits du lait

Le rachitisme est une maladie osseuse qui se manifeste surtout par des déformations au niveau des poignets et des chevilles, les membres inférieurs sont incurvés.

Il affecte les enfants en manque de vitamine D, laquelle joue un rôle important dans l'absorption du calcium.

Au cours du XII et XIII^e siècle 81 famines ont été enregistrées au royaume de France, soit environ 4 par décennie.

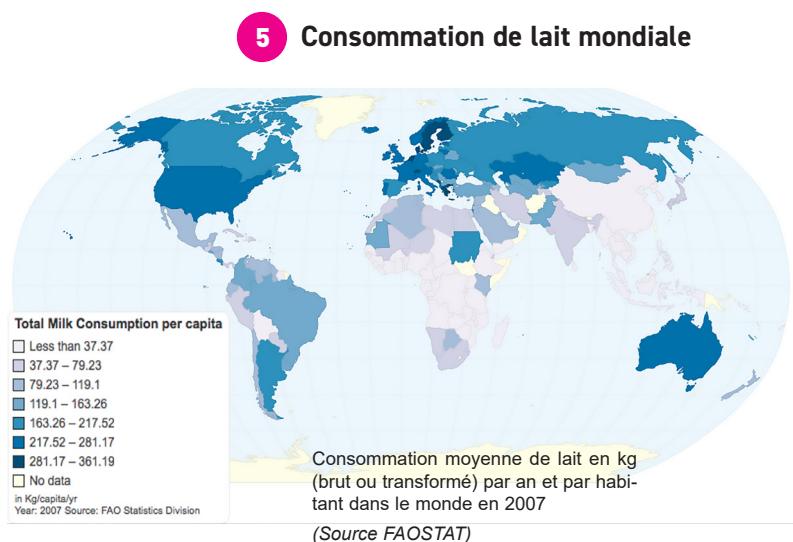
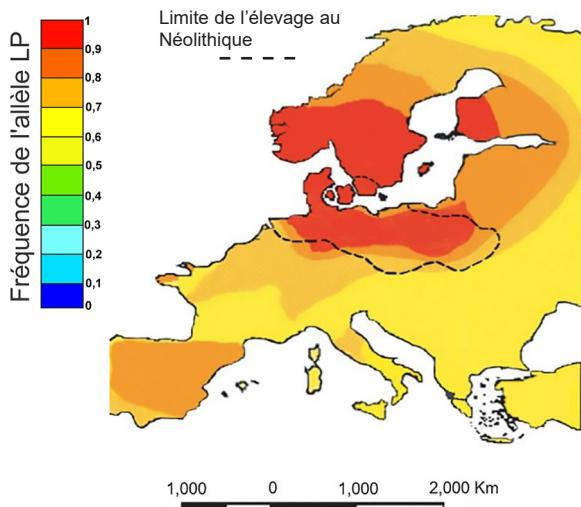
Être lactotolérant après 5 ans augmente la probabilité de survie.

Composition sur 100 g	Lait de vache
Eau (g)	88,2
lactose (g)	4,7
protéines (g)	3,3
lipides (g)	3,8
calcium (mg)	120
magnésium (mg)	12
Potassium (mg)	150
Fer (mg)	0,05
Phosphore (mg)	95
Vitamines D, B2 et A	Présentes
Valeur énergétique	293 kJ

3 Le Néolithique

Le Néolithique succédant au Paléolithique, il y a 7 500 ans, est une période de la Préhistoire marquée par de profondes mutations techniques et sociales : les groupes humains se sédentarisent et, de chasseurs-cueilleurs nomades, ils deviennent agriculteurs, éleveurs et développent l'architecture, changeant ainsi de mode de subsistance. (à partir de *Wikipédia*)

4 Fréquence actuelle de l'allèle LP dans le nord de l'Europe centrale et localisation des élevages au Néolithique



PARTIE II - ... FRUIT D'UNE COÉVOLUTION HOMME-VACHE

Exploitation attendue

- La mutation LP permet d'activer une protéine qui code la persistance de la lactase. Cette protéine confère un avantage sélectif à la digestion du lait. Cela montre comment l'humain peut conserver et accentuer cet avantage phénotypique.
- Afin de pouvoir toujours plus se nourrir de lait du fait de sa tolérance au lactose, l'humain a exercé une pression de sélection sur les vaches à forte productivité en lait. Cela montre l'impact de l'action de l'humain sur le génotype des vaches.
- L'avantage sélectif issu de la consommation de lait par les populations a permis aux allèles responsables de celle-ci de se répandre dans ces populations humaines, les faisant ainsi évoluer.



À partir des informations du poster montrer que le processus qui a permis le maintien de la consommation de lait de vache par les populations adultes d'Europe du Nord est à la fois le produit et la cause d'une évolution entre ces populations humaines et celles des vaches.

Synthèse

La pratique culturelle de la consommation de lait a favorisé l'allèle de persistance du gène de la lactase dans le génome humain.

Par ailleurs, les humains ont exercé une pression de sélection sur les vaches dans le but d'augmenter leur production laitière, ce qui a modifié leur génome. Ainsi, on explique les particularités génétiques à la fois chez les populations humaines et chez les populations bovines dans le nord de l'Europe Centrale.

Cette étude illustre un exemple de « coévolution gène-culture » entre les humains et une autre espèce.

EXEMPLE D'ACTIVITÉ SPÉCIALITÉ DE PREMIÈRE

L'HISTOIRE DE LA CONSOMMATION HUMAINE DE LAIT

Mise en situation

Les mutations de l'ADN sont à l'origine de la diversité des allèles au cours du temps. Selon leur nature elles ont des effets variés sur le phénotype et peuvent expliquer la diversification des êtres vivants.

On cherche à comprendre s'il existe d'autres mécanismes (liés à une modification du génome ou non) qui permettent la diversification du vivant.

Pour cela, nous étudierons l'exemple de la tolérance au lactose.

1 Tolérance et intolérance au lactose

Certaines populations humaines sont génétiquement capables de digérer le lactose du lait même après l'âge de 5 ans.

Le lait contient :

- le lactose qui est le principal glucide du lait ;
- 6 protéines principales codées par 6 gènes.

Pour être absorbé et passer dans le sang, le lactose doit être digéré par une enzyme intestinale appelée lactase.

Les individus qui ne fabriquent plus cette enzyme après l'âge de 5 ans sont dits "intolérants au lactose" ou LNP (= Lactase Non Persistante), à l'inverse des LP (= Lactase Persistante).

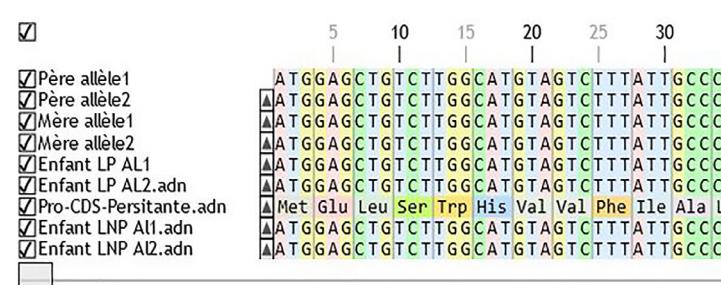
Le gène de la lactase humaine, situé sur le chromosome 2, comporte 17 exons et code un polypeptide de 1927 acides aminés. L'allèle « lactase persistante » est dominant.

2 Comparaison des séquences du fichier "Famille-LP-LNP.edi"

Les séquences sont celles de la région strictement codante du gène de la lactase chez les membres d'une famille dont les deux parents ont le phénotype LP et qui ont deux enfants l'un LP, l'autre LNP

Fichier Edition Actions Affichage Options © P.Cosentino / P.Pillot,

Séquences chargées similaires différences



Exploitation attendue

Hypothèse : il doit exister une mutation du gène de la lactase. Cette mutation récessive, ne permettrait pas aux individus homozygotes pour ce gène, de digérer le lait de la vache.

Résultat de la comparaison : la comparaison des différents allèles du gène LNP ne montre aucune différence.

Connaissances

- Certaines variations génétiques résultent d'une sélection actuelle (tolérance au lactose, résistance à la haute altitude) ou passée (résistance à la peste).
- Les génomes portent en eux-mêmes les traces de l'histoire de leurs ancêtres.
- La notion d'allèles s'applique à tout segment d'ADN codant ou non.

Compétences

- Formuler et résoudre une question ou un problème scientifique.
- Concevoir et mettre en œuvre des stratégies de résolution.
- Utiliser des logiciels d'acquisition, de simulation et de traitement de données.

Prérequis

- Mutation de l'ADN et variabilité génétique

À l'aide du document 1, proposer une hypothèse expliquant la différence entre les phénotypes LP et LNP.

Traiter les données du fichier " Famille-LP-LNP.edi" afin d'éprouver l'hypothèse.

Protocole

<https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/geniegen2/?load=EXT-LACTASE-FAM-LP-LNP>

1. Ouvrir GénieGene2.
2. Décocher Pro-CDS-Persistante.adn qui correspond à une protéine.
3. Cliquer sur "Actions" puis "Aligner les séquences".
4. Faire la comparaison.

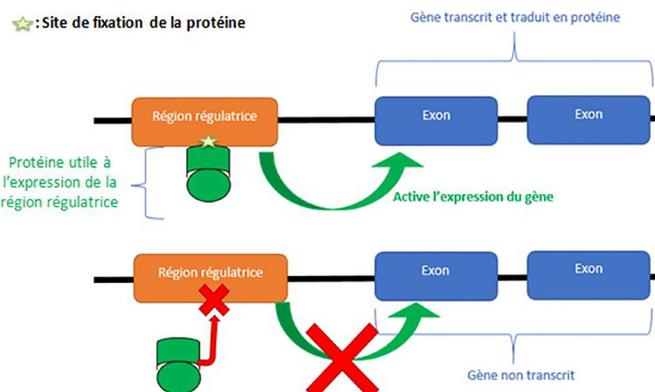


3 Rôle des régions régulatrices de gènes

Les phénotypes sont contrôlés par l'expression de gènes qui codent :

- des protéines de structure ;
- des protéines régulatrices activant ou inhibant l'expression d'autres gènes.

Au sein d'une même espèce, pour un gène donné, on distingue des individus portant différents allèles du caractère que l'on étudie.



À

l'aide du document 3, proposer une nouvelle hypothèse expliquant la différence entre les phénotypes LP et LNP.



É

prouver l'hypothèse en traitant le fichier Reg-Famille-LCT.edi. Déterminer le phénotype de chaque membre de la famille en justifiant la réponse.

4 Comparaison des séquences du fichier "Reg-Famille-LCT.edi"

Les séquences comparées sont celles de la région de régulation de l'expression du gène de la lactase chez les membres d'une famille dont les deux parents ont le phénotype LP et qui ont deux enfants l'un LP, l'autre LNP

Matrice de similarité :
(pourcentage d'identités)

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Père allèle1 (1)	100	98,73	100	98,73	100	100	98,73	98,73
Père allèle2 (2)	98,73	100	98,73	100	98,73	98,73	100	100
Mère allèle1 (3)	100	98,73	100	98,73	100	100	98,73	98,73
Mère allèle2 (4)	98,73	100	98,73	100	98,73	98,73	100	100
Enfant LP Al1 (5)	100	98,73	100	98,73	100	100	98,73	98,73
Enfant LP Al2.adn (6)	100	98,73	100	98,73	100	100	98,73	98,73
Enfant LNP Al1.adn (7)	98,73	100	98,73	100	98,73	98,73	100	100
Enfant LNP Al2.adn (8)	98,73	100	98,73	100	98,73	98,73	100	100



Protocole

<https://www.pedagogie.ac-nice.fr/svt/productions/geniegene2/?load=EXT-LACTASE-REG-LP-LNP>

- Ouvrir Géniegene2
- Cliquer sur "Actions" puis "Aligner les séquences"
- Faire la comparaison en affichant le tableau de comparaison dans "Affichage"



Proposer une synthèse expliquant l'incapacité de certaines personnes à digérer le lait.

Exploitation attendue

Hypothèse : on suppose que la mutation doit se situer sur la séquence régulatrice.

Résultat de la comparaison : la comparaison des différentes séquences régulatrices du gène de la lactase montre des différences. L'hypothèse est alors validée.

Le phénotype de chaque membre de la famille :

- les parents sont hétérozygotes : ils possèdent chacun un allèle LP de la séquence de régulation du gène de la lactase et un allèle LNP pour cette même séquence. Ils peuvent digérer le lactose ;
- l'enfant LP est homozygote : il a 2 fois l'allèle LP de la séquence de régulation du gène de la lactase (il digère le lactose) alors que l'autre enfant (LNP) est homozygote avec 2 allèles LNP pour cette même séquence : ce dernier ne digère pas le lactose.

Synthèse

Il existe bien un autre mécanisme qu'une mutation sur un gène responsable d'une fonction : certains gènes peuvent activer ou inhiber l'expression d'autres gènes. Ils sont appelés "gènes régulateurs" ou "séquences régulatrices".

Dans ce cas, c'est le gène régulateur qui est muté ; il perd son rôle dans l'activation du gène qui permet de produire la lactase expliquant ainsi la non digestion du lait.

Département Biologie - Écologie

OFFRE DE FORMATION



LICENCE BIOLOGIE - ÉCOLOGIE

Les parcours de Licence proposés par le Département de Biologie-Écologie vous permettront, en trois ans, d'acquérir les connaissances fondamentales en biologie des organismes, en écologie et en évolution. La part importante de travaux pratiques tout au long de la formation permet l'acquisition des outils techniques et méthodologiques indispensables.

3 parcours possibles

Sciences de la Vie: Biologie Ecologie (BE)

(Attention: capacité d'accueil limitée, sur dossier)

Parcours pluridisciplinaire formant à l'étude des organismes vivants (animaux, végétaux, micro-organismes) et de leur diversité, de leurs interactions entre eux et avec leur milieu (écologie scientifique), de leurs changements au cours du temps et des processus responsables de ces évolutions. Cette formation inclut les outils permettant ces études, échantillonnage, observation, et en particulier modélisation et statistiques.

Science de la Terre : Cursus Master Enseignement (CME-SVT)

(Attention: capacité d'accueil limitée, sur dossier)

Parcours renforcé visant à l'intégration du Master Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation (MEEF) pour la préparation des concours de l'éducation nationale.



Sciences de la Vie : Biologie en Approche par Problème (APP-Bio) (40 places)

Parcours intégralement en Approche Par Problème où les séances sont majoritairement des tutorats et des TP. La vocation de ce parcours est d'acquérir un socle de compétences en Biologie tout en développant et valorisant les compétences transversales telles que : la résolution de problème, la pensée critique et réflexive, l'usage du multimédia, la créativité et le travail d'équipe collaboratif.

1 Licence Professionnelle

Métiers de la protection et gestion de l'environnement : Étude et Développement des Espaces Naturels (EDEN)

(Attention: capacité d'accueil limitée, sur dossier)

Licence professionnelle offrant une préparation intensive aux métiers de technicien supérieur de l'environnement pour les secteurs public et privé.

17 MASTERS DANS 3 MENTIONS :

- **B2E** (Biodiversité, Écologie, Évolution)
- **GE** (Gestion de l'Environnement)
- **Eco-Epi** (Éco-Épidémiologie)

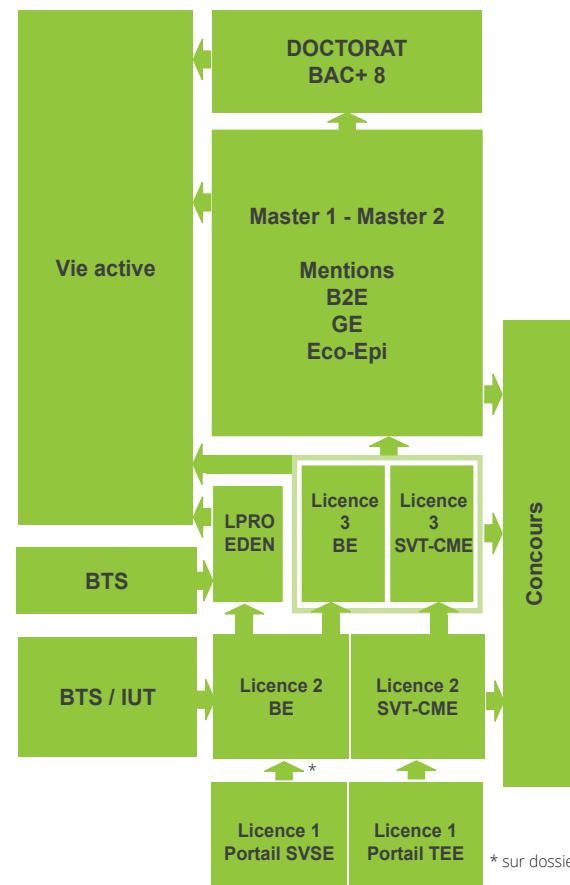
Les grandes thématiques

- Biodiversité
- Écologie
- Évolution
- Paléobiologie
- Maladies parasitaires et infectieuses
- Territoires et développement durable
- Éco-Epidémiologie
- Animation et communication

Pour plus d'informations sur les masters :

www.biologie-ecologie.com

SCHÉMA DES ÉTUDES



* sur dossier





UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER



UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

Depuis 8 siècles, nous inventons l'avenir

L'Université de Montpellier propose une offre de formation pluridisciplinaire, des sciences de l'ingénieur à la biologie et de la chimie à la sciences politique, l'agro-environnement, les sciences de l'entreprise, la santé, le droit ou encore l'économie.

En partenariat étroit avec les acteurs de l'emploi, l'Université de Montpellier vous accompagne tout au long de la vie et vous aide à construire votre projet universitaire et professionnel.

Dans un monde où les champs d'applications du savoir sont en perpétuelle évolution, étudier à l'Université de Montpellier, c'est l'opportunité de se former aux métiers de demain.

> UMONTPELLIER.FR



UNIVERSITÉ
DE MONTPELLIER

apbq



ACADEMIE
DE MONTPELLIER

Liberté
Égalité
Fraternité

