

France



L'Île Nexus

Une ressource pédagogique ludique
sur l'exploration des écosystèmes



Enseignement des sciences et mobilisation
du public de l'EMBL



À propos de l'EMBL

L'EMBL est le principal laboratoire européen pour les sciences de la vie. Nous sommes une organisation intergouvernementale soutenue par plus de 25 États membres et opérants sur six sites en Europe. L'EMBL effectue des recherches fondamentales en biologie moléculaire tout en étudiant l'histoire de la vie. Nos recherches stimulent le développement de nouvelles technologies et méthodes dans le domaine des sciences de la vie, et nous nous efforçons de transférer ces connaissances au profit de la société.

À propos de l'enseignement des sciences et de la mobilisation du public

Le bureau de l'EMBL chargé de l'enseignement des sciences et de la mobilisation du public (SEPE, Science Education and Public Engagement) dirige et coordonne les programmes d'éducation scientifique et les efforts de mobilisation du public de l'institut.

Anciennement connu sous le nom de Laboratoire européen d'apprentissage des sciences de la vie, (ELLS, European Learning Laboratory for the Life Sciences), nous nous appuyons sur la longue tradition de l'EMBL en matière d'enseignement des sciences et de mobilisation du public, et nous soutenons l'engagement de l'EMBL à partager et à discuter de nos recherches avec les jeunes apprenants, les enseignants et des publics variés.

Nos activités d'éducation scientifique permettent de partager les découvertes scientifiques de l'EMBL à travers des expériences pédagogiques inspirantes avec des enseignants de sciences et des jeunes de toutes origines âgés de 10 à 19 ans.

Nos programmes abordent des thèmes complexes et pointus de la recherche en sciences de la vie de manière passionnante et instructive, favorisant la découverte des tendances actuelles de la recherche, de la méthode scientifique et des parcours professionnels dans le domaine scientifique. Nos activités sont développées et menées en étroite collaboration avec les scientifiques de l'EMBL.

Visitez notre site web pour plus d'informations sur les activités d'éducation scientifique de l'EMBL : embl.org/ells

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude aux scientifiques de l'EMBL Thomas George Beavis, Soraya Marie Zwahlen, Leslie Pan et Kiley Seitz pour les discussions fructueuses qui nous ont aidés à élaborer les fiches d'information de cette ressource.

Conditions d'utilisation

Cette ressource éducative est placée sous la licence Creative Commons (Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale - Partage des Conditions Initiales à l'Identique 4.0) internationale (CC BY-NC-SA 4.0). Pour consulter une copie de cette licence, visitez le site <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Clause de non-responsabilité pour les liens

Les liens vers des sites web n'appartenant pas à l'EMBL sont fournis à titre indicatif et à des fins d'information uniquement. Ils ne constituent en aucun cas une recommandation ou une approbation de la part de l'EMBL. L'EMBL n'a aucune affiliation avec les propriétaires du contenu de ces sites externes et n'assume aucune responsabilité quant à l'exactitude, la légalité ou le contenu des sites externes ou des liens qui y sont mentionnés.

Retour d'information pour les développeurs

Nous espérons que vous apprécierez cette ressource ludique ! Nous attendons avec impatience vos commentaires et ceux de vos élèves sur « Île Nexus », que vous pouvez partager avec nous à l'adresse emblog-ells@embl.org.



Table des matières

Guide de l'enseignant	6
Introduction	7
TRaversing European Coastlines.....	8
Contenu du dossier de ressources.....	9
Présentation.....	10
Récit, histoire et structure du jeu	12
Histoire.....	12
Récit et structure du jeu.....	12
Adapter le jeu à votre classe	15
Préparation et mise en place.....	17
Préparer le matériel de jeu	17
Explications et mise en place du matériel de jeu	20
Guide des symboles du jeu	24
Déroulement du jeu	25
Histoire	33
Histoire	34
Fiches d'information.....	35
Posidonies	37
<i>P. australis</i>	42
<i>A. catenella</i>	47
<i>E. coli</i>	53
Platynereis	59



Table des matières

<i>Nitrososphaera</i>	66
Pseudomonas	72
Fiche élève	77
Clé de correction	83

Guide de l'enseignant

L'île Nexus

Une ressource pédagogique ludique sur l'exploration des écosystèmes



Introduction

Les écosystèmes sont des unités biologiques composées d'organismes et de l'environnement physique dans lequel ils vivent. Au sein d'un écosystème, les organismes interagissent entre eux et avec leur environnement de manière équilibrée, ce qui garantit la santé de cette unité. À ce titre, les écosystèmes participent à la production alimentaire et énergétique ainsi qu'à la régulation du climat.

Les activités anthropiques entraînant une perte de biodiversité à un rythme sans précédent, de nombreux écosystèmes sont confrontés à des défis majeurs pour maintenir leur équilibre. La compréhension de l'interaction complexe entre les composantes vivantes et non vivantes d'un écosystème est essentielle à la préservation et à la restauration de ces habitats et, par conséquent, au maintien de la santé de notre planète.

La ressource pédagogique « Île Nexus », inspirée d'une expédition scientifique menée par l'EMBL et intitulée « TRaversing European Coastlines - TREC (Traverser les côtes européennes) », invite les élèves à réévaluer leur perception de l'environnement dans lequel nous vivons en se concentrant sur l'interaction entre les organismes vivants, les facteurs environnementaux non vivants et les humains, ainsi que sur leurs dépendances et leurs stratégies d'adaptation. L'approche ludique met particulièrement l'accent sur la biodiversité de nos écosystèmes, notamment au niveau microscopique, et sur la vulnérabilité des micro-organismes face à la dynamique d'un environnement en mutation. De plus, le rôle de la recherche dans l'apport de données, qui constituent la base de toutes discussions et actions ultérieures, est mis en évidence dans le cadre de l'analyse de chaque élément et organisme présent dans l'environnement.

Nous espérons que le jeu vous inspirera et que vous prendrez plaisir à découvrir l'écosystème de l'« Île Nexus » avec vos élèves.

Conception : Eva Klose/EMBL



TRaversing European Coastlines

« TRaversing European Coastlines - TREC (Traverser les côtes européennes) » est une expédition scientifique internationale hautement collaborative qui étudie les effets des changements environnementaux sur les organismes et les communautés aux niveaux cellulaire et moléculaire. Les données collectées permettront de relever des défis environnementaux et sociétaux urgents tels que le changement climatique, la pollution et la perte de biodiversité.

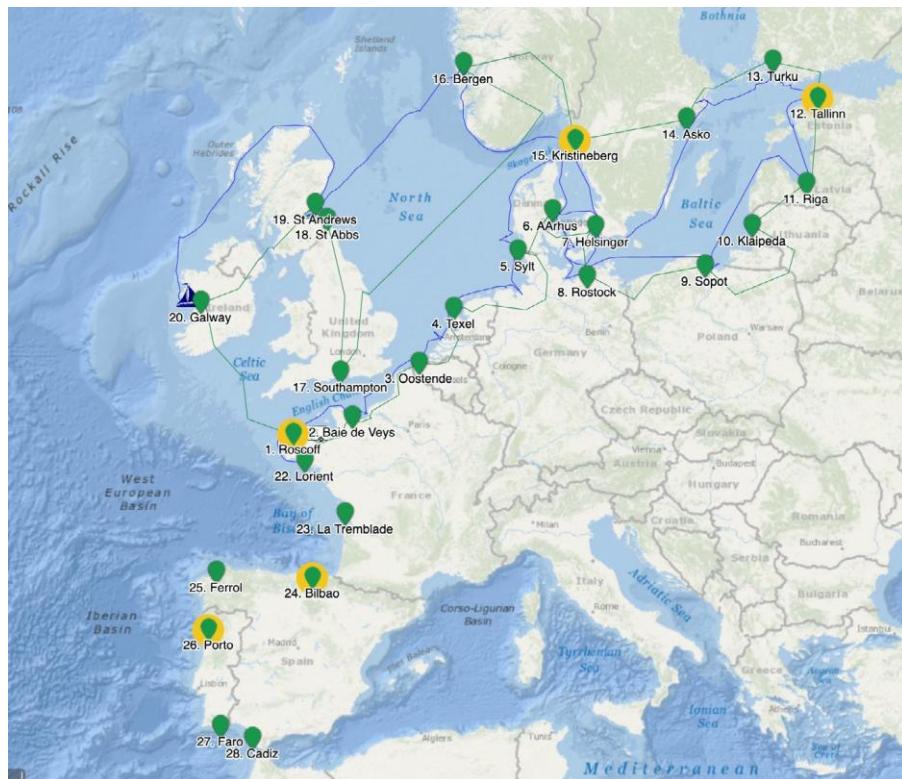
L'expédition explore les interactions entre l'océan et la terre, en mettant particulièrement l'accent sur leur intersection, à savoir les habitats côtiers qui sont les plus riches en biodiversité et souvent les plus pollués.

TREC vise à documenter et à analyser la biodiversité et l'adaptabilité moléculaire des communautés microbiennes et des principaux organismes sélectionnés sur plus de 120 sites de la côte européenne. Le succès de l'expédition repose sur l'exploration de l'océan, parallèlement à l'échantillonnage du sol, des sédiments, des eaux peu profondes et d'organismes modèles sélectionnés.

La diversité des organismes sera étudiée à différentes échelles, des virus et bactéries aux algues multicellulaires et aux animaux, à l'aide de diverses techniques omiques méta et unicellulaires et de techniques de codage à barres combinées à des méthodes de microscopie innovantes. Cela permettra d'obtenir des détails sans précédent sur les associations entre les données moléculaires et morphologiques au niveau d'un seul organisme et d'une seule cellule. En outre, pour une évaluation approfondie de l'état des habitats étudiés, une attention particulière sera accordée à la mesure de divers paramètres physiques et chimiques.

Pour en savoir plus : <https://www.embl.org/trec/>

Pour consulter une carte interactive de tous les arrêts TREC prévus en 2023, visitez le site <https://trec.embl.de/itinerary.cgi>





Contenu du dossier de ressources

Préparation du jeu

GUIDE DE L'ENSEIGNANT

Ce guide décrit le concept du jeu et explique comment l'utiliser en classe.

FICHES D'INFORMATION

Les fiches d'information contiennent des informations détaillées sur les organismes les plus importants ou les plus abondants de « l'Île Nexus », en soulignant leur rôle dans le flux énergétique et leur importance globale dans leurs écosystèmes.

FICHES ÉLÈVE ET CLÉ DE CORRECTION

La fiche élève contient des « questions directrices » pertinentes pour les différentes parties du jeu et guide les élèves à travers les aspects pédagogiques les plus importants du jeu. Les élèves peuvent se référer à leurs notes pendant les discussions et vous pouvez les utiliser pour évaluer leur compréhension des informations acquises. Pour une expérience de jeu plus immersive et moins axée sur les résultats d'apprentissage, les fiches élèves peuvent être omises.

Jouer au jeu

HISTOIRE

L'histoire est utilisée comme récit pour guider les élèves dans le jeu.

CARTE DE L'ÎLE

Ce document contient des fichiers imprimables représentant les différents quadrants de l'île.

PAQUET DE CARTES

Ce document contient des fichiers imprimables du paquet de cartes.

Présentation

« Île Nexus » est une ressource ludique axée sur la santé des écosystèmes. Le terme « Nexus », qui signifie « connexion », fait allusion au message principal du jeu : il s'agit d'une île où tout est connecté. À l'instar des scientifiques travaillant sur le terrain, les élèves prennent part à un voyage scientifique pour découvrir les organismes qui peuplent l'île et explorer les liens qui existent entre les organismes eux-mêmes et leur environnement.

Le jeu se joue à l'aide d'une carte de l'île et de cartes de jeu, et il est animé par un récit qui guide le joueur tout au long de l'expérience. L'île est représentée sur une carte divisée en quatre quadrants qui représentent différents habitats avec divers degrés d'activité humaine : Nature, Ville, Agriculture et Industrie. Un paquet de cartes est attribué à chaque quadrant et fournit des informations sur les organismes qui y vivent.

La carte présente des déclencheurs visuels qui permettent la découverte et l'identification des organismes et de leurs caractéristiques.

Le jeu se compose de trois parties principales suivant un scénario qui met en scène les élèves en tant qu'explorateurs de l'île. Au début de leur expédition, les élèves, par groupes, arpencent l'île à la découverte de ses habitants. Ensuite, les élèves identifient l'impact potentiel d'un changement environnemental sur l'île. Enfin, les élèves explorent des stratégies pour aider à restaurer et à maintenir la santé de l'écosystème de l'île.

Durée du jeu

min. 90 minutes

Participants

Entre 8 et 24 (répartis en équipes)

Âge des participants

14 à 16 ans

Matériel de jeu

Histoire

Impressions sur papier des quadrants de l'île

Paquet de cartes

En jouant à ce jeu, les élèves pourront :

- se mettre dans la peau de scientifiques qui étudient les écosystèmes et la santé de notre planète ;
- explorer leur propre curiosité à l'égard du monde naturel ;
- appliquer leur raisonnement logique pour faire des observations et des prédictions ;
- communiquer et collaborer au sein d'un groupe pour discuter des problèmes et trouver des solutions créatives ;
- se familiariser avec la science en tant que processus permettant de comprendre le monde naturel et d'aborder les défis mondiaux.

Retour d'information des éducateurs sur les résultats d'apprentissage :

« La ressource favorise la collaboration et le travail d'équipe en permettant aux étudiants de travailler en groupe pour résoudre des problèmes. Elle renforce la pensée critique et les compétences en matière de résolution de problèmes en incitant les étudiants à faire preuve d'esprit critique et à trouver des solutions innovantes à divers défis. Cette ressource engage et motive les élèves dans leur apprentissage en leur offrant une expérience d'apprentissage interactive et immersive qui est à la fois amusante et éducative. »

« Les élèves comparent les effets des facteurs abiotiques et biotiques sur le développement et la survie des organismes. Les élèves expliquent les mécanismes de maintien de l'homéostasie dans la nature. Les élèves analysent l'impact anthropique sur l'équilibre dynamique de la nature et discutent des moyens de prévenir et/ou de remédier à la pollution. Les élèves décrivent les adaptations du comportement des animaux aux changements des conditions environnementales. Les élèves discutent de l'impact des catastrophes naturelles sur l'écosystème. »

Thèmes abordés

organismes, échantillonnage, identification et classification, écologie des organismes, remédiation et intervention humaine, science et société, santé planétaire

Les grandes idées

- Les organismes interagissent entre eux et avec l'environnement non vivant de différentes manières.
- Les organismes sont interdépendants les uns des autres et s'adaptent à leur environnement.
- La biodiversité décrit la variété et la variabilité des organismes dans un écosystème.
- Les écosystèmes sont des structures dynamiques et leurs caractéristiques peuvent changer au fil du temps.

Connaissances préalables

Les étudiants doivent se familiariser avec des concepts tels que la biologie cellulaire, le flux et la conversion de l'énergie, l'homéostasie et la réaction. Il peut être utile de comprendre des concepts écologiques tels que la concurrence, l'adaptation et les niveaux trophiques.

NOTE Veuillez noter qu'en fonction du niveau de connaissance de vos élèves, vous pouvez envisager de préparer la classe avant de jouer au jeu, tout en réfléchissant à la direction/aux sujets que vous souhaitez explorer davantage/réviser. Cependant, le jeu peut être joué tel quel et peut être utilisé de l'une des manières suivantes :

- un lien vers un nouveau sujet que vous souhaitez introduire ;
- une activité de liaison ;
- une activité de révision.

Liens vers le programme d'études

Programme d'études	Sommaire
Baccalauréat international	4.1, 4.2, 4.3
GCSE-AQA	4.7.1, 4.7.2, 4.7.3, 4.7.4, 4.7.5
AP Biologie	8.2, 8.5, 8.6, 8.7

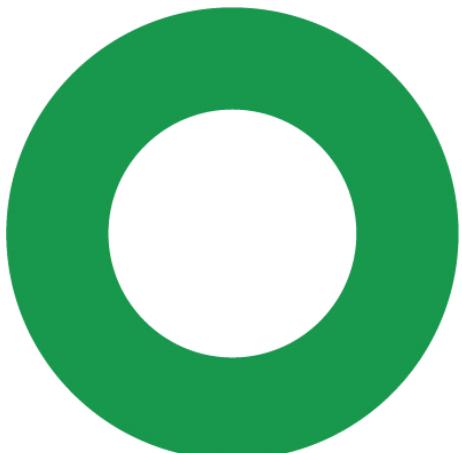
Connexions transversales

Biologie

- Biologie marine
- Biologie cellulaire
- Écologie
- Génétique

Chimie

Sciences de la terre



Récit, histoire et structure du jeu

Histoire

Le jeu est composé de trois parties principales guidées par un récit sous la forme d'une histoire qui vise à faciliter une expérience d'apprentissage immersive. Passez à la [section « Histoire »](#) pour lire l'article complet.

Récit et structure du jeu

Nous vous encourageons à adapter le jeu aux connaissances et aux intérêts de vos élèves.

En tant qu'activité facultative, vous pouvez commencer et terminer par un jeu d'association pour sonder les perceptions des élèves en matière d'écologie et de biodiversité. À la fin du jeu, vous pouvez organiser une activité de consolidation afin de réviser la compréhension qu'ont vos élèves des sujets abordés dans le jeu, à l'aide d'une série de questions proposées.

Facultatif - Jeu d'association, 1ère manche

Durée : 5 minutes

Cette courte activité peut être utilisée comme amorce de conversation et vous permettre de comprendre quelles associations vos élèves font actuellement avec certains concepts liés à l'écologie.

Partie 1 : Organismes de l'Île Nexus

Durée : 30-40 minutes

Les élèves se répartissent en quatre équipes. Chaque équipe explore l'écosystème de l'île dans un quadrant qui lui est attribué à l'aide des cartes du jeu.

Dans cette première partie du jeu, les élèves, en équipe, devront :

- Explorer l'environnement et identifier tous les organismes de leur quadrant
- Identifier l'organisme le plus répandu dans leur quadrant

Toutes les équipes se réunissent ensuite pour :

- Présenter chaque quadrant au reste du groupe
- Définir les adaptations que présentent les organismes vivant dans leur quadrant et qui pourraient être communes à celles des organismes des autres quadrants.
- Déterminer si les organismes trouvés dans un quadrant sont également présents dans d'autres quadrants et en discuter les raisons possibles
- Décrire le rôle de l'organisme le plus répandu dans l'écosystème du quadrant
- Identifier les impacts anthropiques possibles (directs/indirects) sur l'écosystème

Partie 2 : Changement soudain de l'environnement

Durée : 20 minutes

Dans la deuxième partie du jeu, chaque équipe étudie comment un changement des conditions environnementales de l'île pourrait affecter la vie dans son quadrant respectif. Les élèves évaluent également l'impact de ce changement sur les organismes. Pour prendre des décisions éclairées, les élèves utilisent les informations qu'ils ont recueillies au cours de la première partie du jeu (notées dans leurs fiches élève).

Ensuite, tous les élèves se réunissent en groupe pour discuter de leurs résultats. Sachant que sur l'« île Nexus », tout est lié, les élèves sont invités à expliquer comment et dans quelle mesure l'île entière a été affectée par le changement soudain des conditions environnementales.

Dans la deuxième partie du jeu, les élèves, en équipe, devront :

- Évaluer les changements dans leur quadrant
- Toutes les équipes se réunissent ensuite pour :
- Présenter leurs conclusions au reste du groupe
- Préciser si et comment les habitants de l'île sont affectés par ce changement soudain de conditions

Partie 3 : Efforts d'atténuation pour aider l'écosystème à se reconstituer

Durée : 20 minutes

Dans la troisième partie du jeu, tous les élèves étudient les mesures à prendre pour atténuer les effets du changement environnemental soudain.

Dans la troisième partie du jeu, les élèves devront :

- Décrire les activités humaines qui auront un impact positif sur la régénération de l'écosystème à la suite du changement soudain

Facultatif - Jeu d'association, 2ème manche

Durée : 5 minutes

Le jeu peut être clôturé par une seconde manche du jeu d'association. Cette activité peut aider à déterminer si et comment les élèves ont modifié leur perception des concepts pertinents et s'ils ont acquis de nouvelles connaissances.

Facultatif - Activité de consolidation

Cette activité peut être utilisée pour évaluer la perception qu'ont les élèves de l'écologie et, en particulier, de l'importance des algues pour la santé de nos écosystèmes.

ASTUCE : COMMENT UTILISER LES FICHES D'INFORMATION ?

Les fiches d'information incluses dans le dossier de ressources offrent des informations précieuses sur les organismes les plus importants de l'écosystème de l'île. En fonction de la configuration et des besoins de vos élèves, vous pouvez choisir la meilleure façon d'utiliser les fiches d'information avec votre classe. Nous recommandons aux étudiants de se familiariser avec elles de l'une des manières suivantes :

Avant le jeu - comme lecture/présentation préparatoire

Les fiches d'information contiennent des informations sur certains des organismes les plus importants de l'île et sur leur rôle dans l'écosystème. En se familiarisant avec ces organismes, les élèves pourront naviguer plus facilement dans le jeu.

Pour préparer les élèves au jeu, répartissez-les en équipes, en assignant à chaque équipe l'un des quatre quadrants de l'île, auquel ils seront également assignés lors du jeu. Chaque équipe reçoit les deux fiches d'information correspondant à son quadrant (voir ci-dessous).

Quadrant Agriculture : *Nitrososphaera* + *Pseudo-nitzschia australis*

Quadrant Ville : *Escherichia coli* + *Pseudo-nitzschia australis*

Quadrant Nature : *Posidonia oceanica* + *Alexandrium catenella*

Quadrant Industrie : *Pseudomonas putida* + *Escherichia coli*

Pour tester les connaissances des élèves, vous pouvez soit créer des questions basées sur les fiches d'information et les distribuer aux élèves concernés avec le matériel, soit demander aux élèves de préparer de courtes présentations pour faire connaître les organismes au reste de la classe.

Après la première partie du jeu - en tant qu'« activité de liaison »

Vous pouvez distribuer les fiches d'information aux élèves après la première partie du jeu. Attribuez les fiches d'information aux équipes comme proposé ci-dessus. Les élèves savent déjà que les organismes présentés dans les fiches sont très importants pour l'écosystème de l'île et, en lisant les informations contenues dans les fiches, ils apprendront les raisons de leur importance. L'utilisation des fiches d'information est particulièrement recommandée si vous jouez au jeu sur deux périodes scolaires distinctes.

Tout au long du jeu - comme source constante d'information

Les élèves peuvent utiliser les fiches d'information comme référence pendant le jeu et cela peut les aider à faire des déductions logiques sur l'écosystème de l'île.



Adapter le jeu à votre classe

Nous vous encourageons à planifier l'organisation du jeu en fonction des besoins de votre classe et à adapter l'utilisation du matériel de jeu en conséquence. Lors de la préparation du jeu, vous pouvez prendre en compte les aspects suivants :

Espace

De combien d'espace disposez-vous pour jouer ? En réfléchissant à l'endroit où vous pourrez jouer avec votre classe, vous pourrez planifier l'espace dont vous disposerez et la meilleure façon de préparer le matériel.

Taille de la classe

Quelle est la taille du groupe d'étudiants, quelle doit être la taille des équipes qui explorent les quadrants et combien d'équipes doit-il y avoir au total ? Au début du jeu, les élèves se répartissent en équipes qui explorent les différents quadrants de l'île. Nous vous recommandons de limiter la taille des équipes pour permettre une expérience immersive et pour que tous les élèves jouent un rôle actif dans le jeu. Nous recommandons trois élèves par équipe, six maximum. Dans la version standard du jeu, il y a quatre équipes, chacune explorant l'un des quatre quadrants de l'île. Cependant, en fonction de la taille de votre classe, vous pouvez adapter le nombre total d'équipes en imprimant une ou plusieurs fois les quadrants ainsi que les cartes de jeu dont ils ont besoin pour découvrir les organismes dans leur quadrant. Par exemple, si vous avez une classe de 20 élèves, vous pouvez répartir les élèves en cinq équipes et imprimer deux fois l'un des quadrants et la carte correspondante, puis attribuer le quadrant dupliqué au cinquième groupe.

Voici quelques options pour configurer le jeu :

Espace	Option de carte	Nombre d'étudiants		
		16	20	24
Classe	Quatre quadrants séparés ont été placés autour des postes de travail, avec les équipes regroupées autour de leur quadrant respectif. (Impression de la carte au format A3 ou A2)	4 postes de travail avec une équipe de 4 élèves travaillant sur chaque poste	5 postes de travail avec une équipe de 4 élèves travaillant sur chaque poste	6 postes de travail avec une équipe de 4 élèves travaillant sur chaque poste
Cour ou gymnase de l'école	Quadrants séparés collés ensemble (Carte imprimée au format A2 ou utilisation d'une carte de l'île réalisée par les élèves)	Équipe de 4 étudiants travaillant sur chaque quadrant	Équipe de 5 étudiants travaillant sur chaque quadrant	Équipe de 6 étudiants travaillant sur chaque quadrant

Temps

Réfléchissez au temps ou au nombre d'heures de cours que vous pouvez consacrer au jeu. Connaître vos contraintes de temps vous aidera à planifier et à présenter le jeu de la meilleure façon possible. Il faut environ 90 minutes pour terminer le jeu, y compris les trois parties principales et les jeux d'association facultatifs.

Voici quelques options pour jouer au jeu en fonction du temps disponible :

	Jeu d'association facultatif Jeu - Manche 1	1 ^{ère} partie du jeu	2 ^{ème} partie du jeu	3 ^{ème} partie du jeu	Jeu d'association facultatif Jeu Manche 2
Session de 90 min	✓	✓	✓	✓	✓
1 ^{ère} session d'une durée de 45 min suivie d'une 2 ^{ème} session de 45min	✓	✓			
			✓	✓	✓



Vincenzo Lu0llo/EMBL

Préparation et mise en place

Préparer le matériel de jeu

Le jeu « Île Nexus » offre une grande souplesse d'utilisation et peut être facilement adapté à vos besoins et à ceux de vos élèves. Avant de jouer avec vos élèves, vous devez préparer le matériel de jeu : la carte de l'île et le paquet de cartes. Tous les supports de jeu sont fournis sous forme de fichiers imprimables.

Instructions d'impression

Carte de l'île :

Imprimer sur des feuilles de papier A2 ou A3

Veuillez noter que les fichiers d'impression fournis vous permettent d'imprimer chaque quadrant de l'« Île Nexus » séparément sur une feuille A2 ou A3. Vous pouvez décider de garder les feuilles de quadrant séparées pendant le jeu pour permettre aux équipes de se rassembler autour de leur quadrant lorsqu'elles explorent l'île, ou choisir de coller les différentes feuilles ensemble pour créer la carte complète de l'île (voir illustrations).

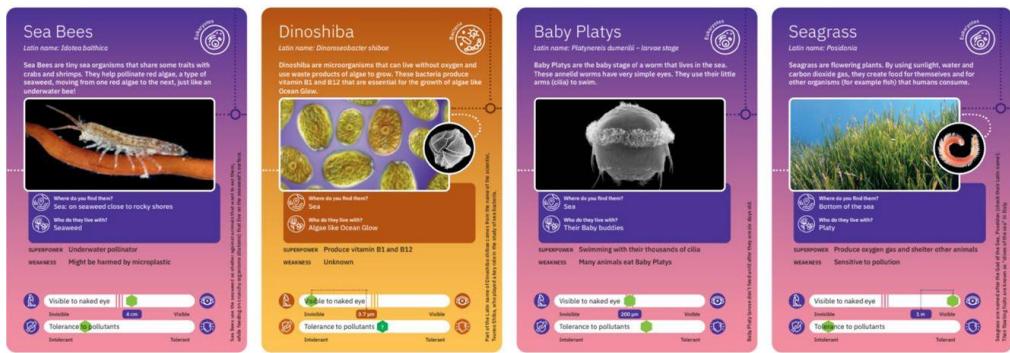
Paquet de cartes :

Imprimer en recto-verso sur des feuilles de papier A3, en veillant à ce que l'imprimante retourne le papier sur le bord court. Vous pouvez plastifier les cartes pour les rendre plus durables.

ASTUCE : CARTE ALTERNATIVE DE L'ÎLE

Si vous souhaitez créer une atmosphère plus immersive et informelle pour le jeu, vous pouvez envisager de produire votre propre version de la carte de l'île. La conception et la réalisation de la carte pourraient même faire partie d'un projet créatif pour les élèves ou d'un exercice pendant un cours d'arts plastiques, et vous offrir ainsi l'occasion d'explorer votre fibre créative. La carte pourrait, par exemple, être créée en dessinant sur une grande feuille de papier ou de tissu, ou en réalisant un immense dessin à la craie dans la cour de récréation. Si vous décidez de créer votre propre version de la carte, il sera important d'attribuer les organismes au quadrant auquel ils sont assignés sur la carte originale et de placer chaque organisme dans le nombre et l'emplacement exacts où ils se trouvent sur chaque quadrant, comme dans l'original.

Paquet de cartes (exemples)



Conception : Eva Klose/EMBL

Carte complète



Conception : Eva Klose/EMBL

Traduction française par ESERO France et CNES, 2025

Quadrants séparés

Conception : Eva Klose/EMBL



Explications et mise en place du matériel de jeu

Carte de l'île - Explications

La pièce maîtresse du jeu est la carte de l'« Île Nexus ». L'île est représentée sur une carte divisée en quatre quadrants : Nature, Agriculture, Industrie et Ville. Chaque quadrant présente des caractéristiques spécifiques (facteurs environnementaux, présence humaine, etc.) qu'il est important de prendre en compte tout au long du jeu. Malgré leurs différences de paysage, tous les quadrants sont reliés entre eux et forment une île unique dans l'océan.

Outre les facteurs abiotiques présentés, la carte est peuplée de symboles placés à des endroits spécifiques. Ces symboles représentent la myriade d'organismes vivant sur l'île. L'existence de symboles représentant les organismes plutôt que d'images directes des organismes a pour but de permettre une « découverte » plus ludique des organismes sur la carte de l'île. Chaque symbole indique les principales caractéristiques de l'organisme et permet de l'identifier dans le paquet de cartes fourni. Sur chaque quadrant, il y a un total de 17 symboles, donc 17 organismes, dont certains se répètent plusieurs fois.

Exemples de symboles :



Salty-Or-
Not



Ocean
Lords

ASTUCE :

Consultez le [« Guide des symboles du jeu »](#) pour savoir quel organisme se cache derrière chaque symbole de la carte.

Carte de l'île - Configuration

Au début de la partie, placez la carte de l'île/les quadrants séparés dans l'espace prévu à cet effet. Choisissez un endroit qui laisse autant d'espace que possible autour de la carte/des quadrants pour que les élèves puissent manœuvrer tout en découvrant l'« Île Nexus ».

Gardez à l'esprit que vous pouvez leur distribuer la fiche élève à l'avance et que, dans ce cas, ils auront besoin de suffisamment d'espace pour la remplir pendant le jeu.

Paquet de cartes - Explications

Les cartes du jeu contiennent les profils des organismes qui peuplent l'« Île Nexus ». Le paquet de cartes fourni est composé de :

- 1 carte titre « Île Nexus »
- 2 cartes « Définition »
- 72 cartes « Organismes » (68 cartes « standard » et
- 4 cartes « de base ») 2 cartes « crédits image »

Cartes Définition

Le paquet de cartes contient deux cartes Définition avec des explications sur la terminologie spécifique que les élèves peuvent trouver sur les cartes Organismes. Les élèves peuvent se référer aux cartes Définition tout au long du jeu.



Conception : Eva Klose/EMBL

Cartes Organismes

Les élèves explorent l'île en comparant le recto des cartes à la carte de l'île, et une fois qu'ils ont trouvé un symbole correspondant, ils tournent la carte et découvrent l'organisme qui y vit.

NOTE Dans le paquet de cartes, vous trouverez 68 cartes Organismes « standard » (voir l'exemple ci-dessous) qui offrent toutes les informations collectées pour un organisme.

Exemple de carte Organismes « standard »



Recto de la carte

Verso de la carte

Conception : Eva Klose/EMBL

De plus, nous avons sélectionné quatre organismes insulaires dont la découverte est illustrée par deux types de cartes dans le jeu :

- 4 cartes Organismes « standard » - contiennent l'ensemble des informations relatives à un organisme
- 4 cartes Organismes « de base » - ne contiennent que peu d'informations sur les organismes (voir ci-dessous).

Vous pouvez utiliser les cartes Organismes « de base » au lieu des cartes Organismes « standard » au début de la Partie 1 du jeu pour ajouter une activité supplémentaire d'identification des organismes, au cours de laquelle les élèves exploreront la taxonomie des organismes (vous trouverez ci-dessous des instructions sur la façon d'utiliser les cartes Organismes « de base »). C'est à vous de décider quelles cartes Organismes utiliser lors de la mise en place initiale du jeu.

Quatre cartes Organismes « de base »



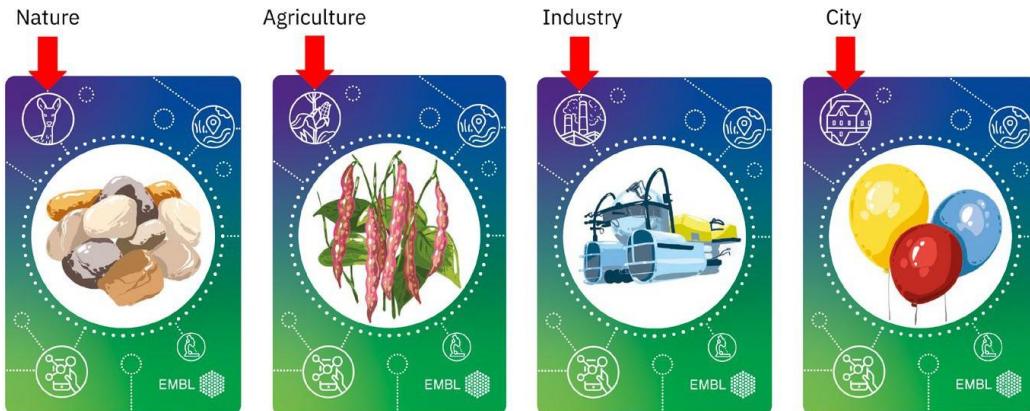
Conception : Eva Klose/EMBL

Paquet de cartes - Mise en place

Pour jouer avec vos élèves, vous devez préparer/imprimer les cartes « Organismes » et « Définition ». Par conséquent, au début du jeu, retirez la carte de titre « Île Nexus » et les deux cartes « Crédits image ».

Décidez quelles cartes Organismes vous utiliserez pour la découverte initiale des quatre organismes sélectionnés (les cartes « standard » ou « de base ») et mettez les autres cartes Organismes de côté.

Au début du jeu, chaque équipe explorant un quadrant doit recevoir une pile de 17 cartes correspondant aux 17 organismes présents dans son quadrant : Nature, Agriculture, Industrie ou Ville. Chaque carte Organismes comporte un symbole au recto qui vous permet d'attribuer la carte au bon quadrant (voir les images ci-dessous). Une fois les cartes préparées, séparez les piles.



Conception : Eva Klose/EMBL

ASTUCE : En fonction du nombre d'équipes qui participeront au jeu, vous devrez préparer les cartes correspondant à chaque quadrant, et les imprimer en double.

Deux versions de la Partie 1 basées sur les cartes Organismes

La Partie 1 du jeu peut être jouée de deux manières : « Jeu classique » et « Qu'est-ce que c'est ? ». Selon la configuration choisie, vous devrez adapter les cartes Organismes en conséquence.

Mise en place du « Jeu classique »

Cette version du jeu est idéale si vous animez le jeu pour la première fois, et si vous disposez d'un temps limité. Pour jouer à cette version, utilisez uniquement les cartes Organismes « standard » pour tous les organismes de l'île. Retirez donc les 4 cartes Organismes « de base » du paquet de cartes (1 de chaque pile de quadrants - vérifiez bien les cartes : certaines arborent un design similaire). Une fois les piles de cartes distribuées, les élèves sont prêts à découvrir tous les organismes présents sur l'île.

Mise en place du jeu en mode « Qu'est-ce que c'est ? »

Au départ, cette version du jeu se joue avec les quatre cartes Organismes « de base » et la première partie peut prendre 10 minutes supplémentaires. Pour jouer à cette version du jeu, mettez de côté les 4 cartes Organismes « standard » et gardez-les à portée de main pour les distribuer plus tard (1 de chaque pile de chaque quadrant - vérifiez bien les cartes : certaines arborent un design similaire).

Guide des symboles du jeu

Ce petit guide vous donne un aperçu des différents symboles que vous trouverez dans le jeu et des organismes auxquels ils se rapportent.

	Dresseurs d'algues		Polaris		Grands Platys
	Bacillus		Têtes éclatées		Super pullulateurs
	Colis		Salés-ou-pas		Seigneurs des océans
	Nécrophages		Abeilles des mers		Gazeux
	Dinoshibas		Rapides		Foraminifères
	Platys Ados		Super nettoyeurs		Bébés Platys
	Poisons verts		Halos		Lueurs d'océan
	Marins verts		Nitrosos		Vibrions
	Lokis		Biodégradeurs de pétrole		
	Laiteux		Fabricants de pilules		
	Sauces à la menthe		Posidonies		
	Fixeurs d'azote		Hippocampes		

Déroulement du jeu

Installez la carte de l'île et préparez la pile de cartes correspondant à chaque quadrant. Après avoir accueilli les élèves, expliquez-leur qu'une partie du jeu se joue en équipes et demandez-leur de les former. Chaque équipe peut choisir un quadrant, qui sera le « sien » pendant toute la durée du jeu. Les quadrants sont les suivants : Nature, Agriculture, Industrie, Ville.

NOTE : Comme vous connaissez mieux vos élèves, décidez si vous allez les répartir en équipes ou leur laisser la liberté de le faire eux-mêmes. Essayez de maintenir une taille d'équipe aussi équilibrée que possible. Nous recommandons qu'un maximum de six élèves travaillent simultanément sur un quadrant. Pour plus de conseils concernant la taille des classes et des équipes, consultez la section [« Préparation et mise en place »](#).

Facultatif - Jeu d'association, 1ère manche

Durée : 5 minutes

Commencez la leçon par un jeu d'association avec les mots clés « écosystème », « organisme », « océan », « scientifique » et « citoyen ». Demandez aux élèves de dire ce qui leur vient à l'esprit lorsqu'ils entendent ces mots. Leurs réponses peuvent être simultanément écrites et rassemblées dans une carte heuristique, soit au tableau, soit sur une feuille de papier, afin de s'y référer à la fin du jeu.

Partie 1 : Organismes de l'Île Nexus

Durée : 30-40 minutes

Objectif : Les élèves apprennent à connaître l'île et ses habitants.

Structure

Les deux versions de la Partie 1 du jeu (« Jeu classique » et « Qu'est-ce que c'est ? ») suivent la même structure, avec une légère variation pour la configuration « Qu'est-ce que c'est ? ».

Guidez les élèves dans le jeu en lisant la [Première partie de l'histoire](#).

Ensuite, donnez à chaque équipe 10 minutes pour explorer le quadrant qui lui a été attribué. Après leur exploration initiale, toutes les équipes se réunissent pendant 20 à 30 minutes pour discuter de leurs résultats.

Invitez chaque équipe à présenter brièvement son quadrant au reste de la classe à l'aide des questions suivantes :

- Y a-t-il une activité humaine/des humains qui vivent sur l'île ?
- L'eau est essentielle pour tous les organismes. Selon vous, comment les quadrants qui ne sont pas pourvus de rivières maintiennent-ils l'accès à l'eau douce ?

Si les élèves ne parviennent pas à trouver la réponse « eau souterraine » qui pourrait être utile pour la suite de la discussion, donnez-leur des indices tels que « D'après vous, d'où les agriculteurs tirent-ils l'eau pour irriguer leur sol ? »
- Quel est l'organisme le plus abondant dans chaque quadrant ?
 - Est-il visible à l'œil nu ?
 - À quel domaine du vivant appartient-il ?
 - Pourquoi pensez-vous que cet organisme est le plus répandu dans votre quadrant ? D'autres organismes de ce quadrant présentent-ils des caractéristiques similaires ?
 - Est-il lié d'une manière ou d'une autre à d'autres organismes/humains ?
 - Avez-vous repéré des organismes de votre quadrant dans les quadrants voisins ?

ASTUCE : VERSION ALTERNATIVE : « QU'EST-CE QUE C'EST ? »

Lancez le jeu comme expliqué ci-dessus et vérifiez si les élèves ont trouvé les cartes Organismes « de base ». Si personne n'a remarqué la différence entre les cartes « de base » et « standard », guidez-les en leur posant la question :

- Toutes les cartes Organismes se ressemblent-elles ? Que manque-t-il ?

Ensuite, distribuez à chaque équipe une [fiche élève « Qu'est-ce que c'est ? »](#), disponible à la fin de ce document, et demandez-leur de découvrir le nom de l'organisme figurant sur la carte « de base ». Une fois que les équipes ont identifié les organismes, remettez-leur les cartes Organismes « standard », de sorte qu'elles en apprennent autant sur ces organismes sélectionnés que sur le reste des organismes de l'île Nexus.

La fiche élève « Qu'est-ce que c'est ? » fournit un outil de classification élémentaire qui imite les outils plus complexes utilisés par les scientifiques pour classer les organismes. C'est l'occasion de demander aux élèves s'ils connaissent d'autres façons dont les scientifiques classent les organismes et d'explorer leurs connaissances et leur compréhension de la taxonomie.

Donnez aux élèves la liberté d'interrompre les présentateurs en leur posant des questions si l'une des informations communiquées n'est pas claire. Utilisez les mots-clés ci-dessous pour aider les élèves à partager les informations les plus pertinentes.

Mots-clés pour les quadrants de l'île

Quadrant Agriculture : Tolérance, plante, envahissante, utilisation des sols, impact humain, engrais, herbicide, floraison, mutualisme, microscopique

Quadrant Ville : Tolérance, pollution, gestion des déchets, eaux usées, plastique, pathogène, symbiose avec l'humain, utilisation des sols, microscopique

Quadrant Nature : Tolérance, pollution, marée noire, digestion, dégradation, utilisation des sols, résistance antimicrobienne, pathogène, microscopique

Quadrant Industrie : Producteur, consommateur, pathogène, espèce envahissante, eau douce, eau salée, concurrence/compétition, espace, microscopique

**ASTUCE : LES ORGANISMES DU QUADRANT**

Dans les tableaux ci-dessous, vous trouverez des informations supplémentaires sur certains des organismes les plus répandus/importants dans chaque quadrant, qui pourraient être utiles pour alimenter la discussion dans la 1ère partie du jeu.

**Quadrant Agriculture :**

Nitrosos	L'organisme le plus répandu dans ce quadrant. Les Nitrosos sont des archées qui vivent dans le sol avec d'autres plantes. Ils participent à la fixation de l'azote comme les Fixeurs d'azote.
Fixeur d'azote	Il s'agit de bactéries vivant dans le sol avec les plantes. Ils fournissent aux plantes les composés azotés nécessaires à leur croissance et à leur développement.
Super pullulateurs, Poisons verts	Ensemble, ces organismes produisent près de la moitié de l'oxygène gazeux que les organismes comme nous, les humains, utilisent pour exister. Normalement, ces algues sont peu nombreuses, mais en cas de ruissellement d'engrais, leur nombre augmente de manière explosive, ce qui provoque ce que l'on appelle des « efflorescences ». Au cours de ces efflorescences, ces algues produisent également des neurotoxines nocives pour des organismes tels que les mammifères marins et les oiseaux. Lors de ces efflorescences, la pêche et la récolte des coquillages sont limitées ou interrompues afin d'empêcher les toxines de se répandre dans nos assiettes.

Quadrant Industrie

Biodégradeur de pétrole	Organisme le plus répandu dans ce quadrant. Cette bactérie peut décomposer le pétrole et d'autres composés xénobiotiques et produire de l'énergie pour elle-même par la même occasion.
Foraminifères	Représentent différentes espèces ayant des degrés variables de tolérance à la pollution.
Coli	Si aucun être humain ne vit dans l'espace où vous les trouvez, la présence de Coli peut indiquer que des eaux usées sont déversées dans cette région.
Super nettoyeur	Les industries construites le long des rivières peuvent polluer la rivière avec les produits chimiques rejetés. Autour du site de contact entre la rivière et la mer, on trouve un « Super nettoyeur », un organisme qui a une grande tolérance à la pollution. Il n'est donc pas surprenant de le trouver là.

Quadrant Ville

Coli	L'organisme le plus répandu dans le quadrant Ville. Les Colis vivent dans les intestins des humains et peuvent nous protéger contre d'autres bactéries nocives simplement en prenant de la place dans l'intestin et en empêchant les bactéries nocives de s'installer à leur place. Comme ils vivent dans nos intestins, la présence d'E. coli dans une région peut également signifier qu'il y a des eaux usées ou simplement des excréments rejetés dans cette zone.
Poisons verts, Marins verts	Tous deux sont proches de la frontière agricole. Cela pourrait s'expliquer par la proximité de la frontière avec la région agricole où les engrangements sont régulièrement utilisés.
Nécrophages	Des organismes présents sur le littoral de la région urbaine. Ils se nourrissent d'autres organismes morts.

Quadrant Nature

Posidonies	L'organisme le plus répandu dans ce quadrant. Les Posidonies sont des plantes à fleurs adaptées au milieu marin. Ces organismes sont des producteurs et contribuent au maintien de l'écosystème en produisant de la nourriture à partir de la lumière du soleil. Les Posidonies servent d'abri et de source de nourriture à des organismes tels que le Plat, l'Abeille des mers et de nombreuses espèces de poissons. On les trouve le long des côtes et non dans les parties plus profondes et plus sombres de l'océan, car elles ont besoin de la lumière du soleil pour se développer.
Salés-ou-pas	Vers plats qui ont besoin d'un mélange d'eau salée et d'eau douce pour vivre. C'est pourquoi les estuaires sont essentiels à leur survie.
Têtes éclatées	Espèces de vers plats envahissantes qui concurrencent les vers indigènes pour l'espace et la nourriture.
Polaris, Dresseurs d'algues	Les Dresseurs d'algues capturent les Polaris dans leurs coquilles minérales et bénéficient des nutriments qu'ils produisent. Nous n'avons pas encore compris si les Polaris bénéficient également de cette interaction.

ASTUCE : UTILISATION DE LA FICHE ÉLÈVE

Si vous utilisez la fiche élève pendant le jeu, demandez aux élèves de répondre aux questions relatives à la Partie 1 pendant qu'ils explorent leur quadrant.

Facultatif : Lorsque les équipes présentent leur écosystème les unes aux autres, les membres des équipes qui n'ont pas présenté leur écosystème peuvent utiliser des copies supplémentaires de la fiche élève pour prendre des notes sur les organismes habitant les autres quadrants de l'île afin d'obtenir une vue d'ensemble de l'écosystème de l'île entière.

Partie 2 : Changement soudain de l'environnement

Durée : 20 minutes

Une fois que les élèves se sont familiarisés avec l'île et ses habitants, présentez-leur le changement soudain des conditions environnementales en lisant la [deuxième partie de l'histoire](#). Souligner que ces changements peuvent devenir plus fréquents et plus intenses avec le changement climatique.

ASTUCE : UTILISATION DE LA FICHE ÉLÈVE

Si vous utilisez la fiche élève pendant le jeu, demandez aux élèves de répondre individuellement aux questions de la partie 2 de la fiche (10 minutes), puis de discuter des réponses avec la classe (10 minutes).

Objectif : Étudier si et comment les produits chimiques du quadrant Agriculture, qui sont répandus par les fortes pluies, affectent l'écosystème de l'île

Structure

Donnez à chaque équipe 10 minutes pour analyser comment et si leurs quadrants et chacun des organismes sont affectés par le changement environnemental. Demandez-leur également de réfléchir aux effets indirects et aux liens possibles entre tous les quadrants et tous les organismes qui y vivent. Ensuite, demandez à toutes les équipes de partager leur analyse avec le groupe.

S'il manque des informations importantes, guidez les élèves à l'aide de questions et invitez-les à réfléchir ensemble jusqu'à ce que vous sentiez que les élèves ont compris le concept selon lequel « tout est lié ».

Voici quelques questions qui pourraient aider les élèves à évaluer si leurs quadrants pourraient être affectés :

- Y a-t-il des courants marins ou d'autres facteurs autour de l'île ou sur l'île qui peuvent contribuer à la propagation des produits chimiques ?
- Quels types de produits chimiques peuvent être libérés dans l'océan et dans d'autres parties de l'île ? (principalement engrais, herbicides)

Voici quelques questions qui pourraient aider les élèves à évaluer comment les organismes vivant dans les différents quadrants pourraient être affectés :

- Quel est l'impact (direct et indirect) sur les organismes ?
(Voir le tableau ci-dessous pour savoir comment et si les organismes sont affectés)
- Existe-t-il des organismes spécifiques bénéficiant des produits chimiques tels que les engrais qui se déversent dans l'océan ?
(Les Poisons verts et les Super pullulateurs en bénéficient et subissent une augmentation explosive de leur nombre. Les Fixeurs d'azote et les Nitrosos peuvent également tirer avantage des engrais à base d'azote et se multiplier)
- Existe-t-il des organismes qui, s'ils sont affectés, peuvent avoir un impact sur de nombreux autres organismes proches de leur habitat ?
(Les efflorescences créent des neurotoxines qui s'accumulent dans les espèces de poissons et les poissons les transportent à travers les niveaux trophiques. Les herbiers de Posidonies, qui abritent des espèces de poissons et des invertébrés tels que les oursins et les vers comme le Platy, subissent un impact négatif).

ASTUCE : Chaque fois qu'un élève vous pose une question, vérifiez si quelqu'un dans le groupe peut y répondre et complétez la réponse si nécessaire.

ASTUCE : LES EFFETS SUR LES ORGANISMES

Voici plus d'informations sur la façon dont les organismes pourraient être affectés par le changement des conditions environnementales :

Quadrant Agriculture :

Marins verts, Super pullulateurs, Poisons verts	Les Marins verts, Super pullulateurs et Poisons verts profitent des engrais et se développent de manière excessive. Le Poisons verts et les Super pullulateurs produisent des toxines qui peuvent s'accumuler dans des organismes tels que les poissons et les crustacés. Lorsque des organismes tels que les êtres humains, les oiseaux marins et les mammifères marins consomment ces poissons et ces crustacés, ils peuvent être empoisonnés et mourir.
Seigneurs des océans	Nous ne savons pas comment les Seigneurs des océans sont affectés. Ils se trouvent loin au large.
Les Fabricants de pilules	Les Fabricants de pilules sont tolérants aux polluants. On les trouve sur des sites agricoles, ce qui signifie qu'ils ont déjà un certain niveau de tolérance aux engrais.
Gazeux	Étant donné que les Gazeux vivent sur des sites agricoles, ils peuvent tolérer la pollution par les engrais. Cependant, nous ne savons pas si les Gazeux qui vivent dans les intestins des animaux sont aussi tolérants aux polluants des engrais que ceux qui vivent dans le sol.
Nitrosos, Fixeurs d'azote	Les Nitrosos et Fixeurs d'azote sont très tolérants à la pollution par les engrais. Ils peuvent même utiliser l'excès d'engrais pour pousser davantage.
Super nettoyeurs	Le fait que ces organismes puissent vivre sur des sites agricoles montre qu'ils tolèrent la pollution par les engrais.
Rapides	Les « Rapides » peuvent également être tolérants pour la même raison. Le fait de vivre sur le site de l'exploitation agricole implique un certain niveau de tolérance à l'égard des produits chimiques utilisés sur ce site.

Quadrant Industrie

Platy	Nous ne savons pas comment les Platys réagissent aux différents types de polluants.
Super nettoyeurs	Les Super nettoyeurs sont de plus en plus nombreux car ils sont tolérants aux herbicides fréquemment utilisés dans l'agriculture.
Biodégradeurs de pétrole	Ils sont généralement tolérants aux produits chimiques et peuvent donc survivre aux conditions difficiles dans lesquelles les polluants chimiques sont répandus dans leurs habitats.

Quadrant Ville

Poisons verts	Le Poisons verts prolifère et produit une toxine. La toxine est absorbée par les mollusques et les poissons qui sont consommés par les mammifères marins et les humains (les toxines peuvent avoir un impact sur la santé humaine).
Foraminifères	Certains foraminifères peuvent mourir car certaines espèces sont intolérantes aux produits chimiques.
Marin vert	Les Marins verts prospéreront grâce aux engrais qui atteindront la côte de la ville et stimuleront leur croissance.
Colis et Bacillus	Nous ne savons pas si les E.coli sont résistants aux engrais. C'est peut-être le cas, car ils vivent également à proximité du site agricole. Il en va de même pour les Bacillus.
Nécrophages	Nous ne savons pas si les Nécrophages sont tolérants aux engrais. Toutefois, si les engrais atteignent la côte de la ville et provoquent une prolifération d'algues toxiques qui tue les mammifères marins, les Nécrophages peuvent profiter de l'augmentation du nombre d'organismes morts et se multiplier.
Vibrions, Sauces à la menthe, Biodégradeur s de pétrole	Nous ne savons pas comment et s'ils sont affectés par les engrais.

Quadrant Nature

Posidonies	Les Posidonies et d'autres organismes peu tolérants aux polluants meurent à cause des engrais déversés. Les Posidonies étant une source de nourriture pour de nombreux organismes tels que les oursins et les poissons, leur déclin aura des répercussions négatives sur ces derniers.
Super pullulateurs	Les Super pullulateurs se développent et produisent des toxines. La présence d'engrais stimule leur reproduction en apportant des composés azotés supplémentaires, ce qui peut être un facteur limitant pour la croissance.
Platy ado	Le Platy ado est également affecté par la mort des Posidonies qui lui sert d'abri et de source de nourriture.
Abeille des mers	Les Abeilles des mers s'abritent dans les Posidonies. Si les Posidonies sont affectées négativement, l'Abeille des mers l'est aussi.
Polaris, Dresseurs d'algues, Têtes éclatées, Laiteux, Salés-ou-pas	Nous ne savons pas comment et s'ils sont affectés par les engrais.

Partie 3 : Efforts d'atténuation pour aider l'écosystème à se reconstituer

Durée : 20 minutes

Objectif : Discutez des moyens d'aider l'écosystème à se rétablir

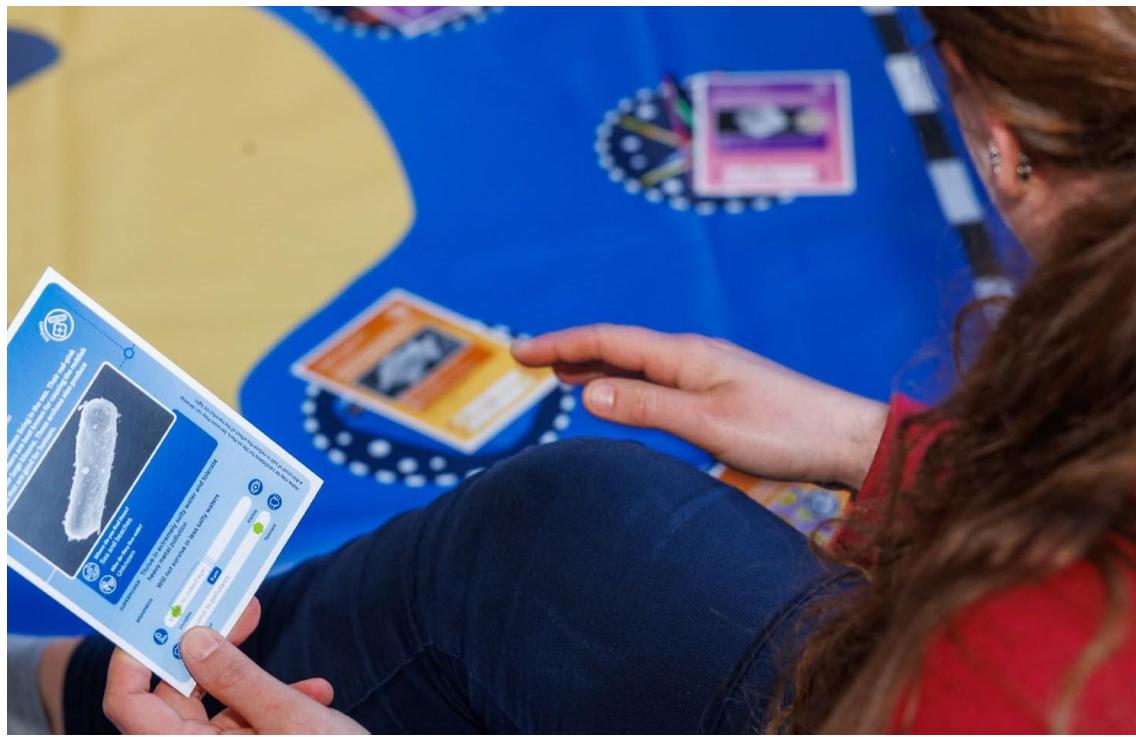
Dans la dernière partie du jeu, les élèves réfléchissent aux activités humaines susceptibles d'aider l'écosystème de l'île à se remettre de ce changement environnemental soudain.

Ces activités peuvent aller de programmes de reproduction pour aider les populations sauvages d'espèces menacées à se rétablir, à la limitation de l'utilisation de produits chimiques et au recyclage. Lisez la [Partie 3 de l'histoire](#) pour présenter cette partie du jeu à vos élèves. Si vous utilisez la fiche élève pendant le jeu, demandez aux élèves de répondre aux questions liées à la partie 3 de la fiche élève.

Facultatif - Jeu d'association, 2^{ème} manche

Durée : 5 minutes

Une fois que les élèves ont terminé le jeu, jouez une deuxième fois au jeu d'association en utilisant les mêmes mots-clés que lors de la première partie. Vérifiez si les concepts des élèves concernant les termes ont changé. Offrez la possibilité d'échanger et de réfléchir au sujet de ces résultats.



© Lullo/EMBL

Facultatif - Activité de consolidation

Présentation

Le jeu « île Nexus » présente aux élèves un scénario dans lequel un changement dans l'environnement modifie l'écosystème. Plus précisément, l'environnement et les habitants de l'île sont affectés par un écoulement d'engrais qui provoque la prolifération d'algues.

Pour aider les élèves à consolider ce qu'ils ont appris pendant le jeu, les enseignants peuvent utiliser une série de questions proposées ci-dessous.

Les enseignants peuvent présenter aux élèves une ou plusieurs des études de cas pertinentes énumérées ci-dessous, qui fournissent des exemples réels des concepts liés à l'écologie rencontrés dans le jeu. Les enseignants peuvent ensuite demander aux élèves de répondre à la même série de questions proposées. Ces questions permettent aux élèves d'explorer les interactions des organismes entre eux et avec l'environnement dans un contexte réel qui rend l'apprentissage pertinent pour eux.

Les enseignants peuvent également utiliser ces articles comme activité de compréhension et de mémorisation afin de renforcer l'apprentissage des concepts abordés dans le jeu, ou comme ressource pour approfondir les recherches et susciter la critique du matériel existant et des discussions précédentes.

Vous trouverez ci-dessous un aperçu de la manière dont les études de cas proposées recoupent le contenu du jeu, ce qui peut aider les enseignants à planifier la meilleure manière de mettre en œuvre cette activité facultative. Les enseignants peuvent utiliser ces recouplements comme points d'ancre pour les articles et les inclure dans leur évaluation afin de vérifier les acquis.

Enfin, les élèves peuvent comparer les mesures qu'ils proposeraient pour lutter contre la prolifération d'algues nuisibles évoquée dans le jeu avec celles qui ont été prises dans les études de cas.

Liste d'exemples d'études de cas à utiliser :

Article de NatGeo :

<https://www.nationalgeographic.com/environment/article/red-tides>

Article du Guardian :

<https://www.theguardian.com/environment/2020/jan/04/lethal-algae-blooms-an-ecosystem-out-of-balance>

Intersections entre la ressource « Île Nexus » et les articles :

Les Super pullulateurs (l'algue *Alexandrium catenella*), présents à la fois dans les zones naturelles et agricoles de l'île, sont mentionnés dans les deux articles, l'accent étant mis sur leur impact sur l'économie locale, la santé humaine et les pêcheries.

La deuxième partie de l'histoire de l'« île Nexus » fait référence à l'écoulement d'engrais dans la mer à partir du quadrant Agriculture. L'utilisation excessive d'engrais et l'agriculture sont toutes deux mentionnées dans les deux articles comme des influences humaines sur la prolifération des algues.

Le Poisons verts (l'algue *Pseudo-nitzschia australis*), présent à la fois dans le quadrant Nature et dans le quadrant Ville, est mentionné dans les deux articles, l'accent étant particulièrement mis sur sa toxicité pour les mammifères marins dans l'article « Prolifération d'algues mortelles ».

Les deux articles abordent les mesures potentielles de lutte contre la prolifération d'algues nuisibles, telles que la réglementation des rejets d'engrais et l'utilisation de produits chimiques pour tuer les algues nuisibles.

Exemples de questions pour lancer la discussion :

Expliquer le rôle des algues dans un écosystème.

Décrire ce qu'est une prolifération d'algues ou efflorescence algale. Identifier les facteurs à l'origine de la prolifération des algues.

Indiquer les différentes façons dont les proliférations d'algues peuvent devenir nuisibles.

Indiquer comment les efflorescences algales nuisibles peuvent avoir un impact sur l'environnement.

NOTE Question portant uniquement sur les études de cas :

Évaluer un exemple de stratégie de prévention des effets néfastes de la prolifération des algues à partir de l'un des articles.

Histoire

L'île Nexus

Une ressource pédagogique ludique sur l'exploration des écosystèmes





Histoire

Partie 1

Nous sommes en 2028 et nous faisons partie d'une mission scientifique visant à explorer l'écosystème de cette belle île. C'est une journée magnifique et nous nous apprêtons à fouler le rivage pour la première fois. Notre bateau pneumatique frotte contre le fond des eaux peu profondes du littoral. Au loin, nous entendons le chant des oiseaux. Le bateau accoste, nous descendons tous ensemble et nous nous dirigeons vers le rivage. Sur la côte de l'île Nexus, nous pouvons voir que l'île est composée de quatre régions distinctes avec différents degrés d'influence humaine : une région vierge et préservée, une zone agricole, une zone industrielle le long d'un lit de rivière et une ville. Après avoir jeté un premier coup d'œil à notre nouvel environnement, nous consultons nos notes d'étude : notre première tâche aujourd'hui consiste à identifier les organismes vivant sur l'île et à en apprendre davantage à leur sujet.

Pour explorer l'île dans le peu de temps dont nous disposons, nous nous divisons en quatre équipes de recherche. Chaque équipe de recherche couvrira l'un des quatre quadrants de l'île et cherchera des indices pour trouver tous les habitants de ce quadrant. Pour commencer, nous avons reçu un paquet de cartes, qui nous aidera à en apprendre le plus possible sur chacun des organismes présents dans les quadrants. Il peut être utile de marquer l'endroit exact où nous avons trouvé les différents organismes en plaçant les cartes correspondantes sur l'emplacement exact des organismes, afin de se souvenir de l'endroit où nous les avons vus.

Partie 2

Soudain, un énorme orage accompagné de fortes pluies s'abat sur l'île. Nous nous précipitons tous pour trouver un abri. Nos vêtements sont trempés. La pluie battante imprègne le sol des terres agricoles d'eau chargée de produits chimiques tels que des engrains et des herbicides. Les précipitations sont si fortes que l'eau emporte même ces produits chimiques vers la mer et d'autres parties de l'île.

Dès que la tempête est passée, nous nous précipitons pour vérifier ce qui s'est passé dans nos parties de l'île. Au sein de nos équipes, nous commençons à enquêter sur l'impact de la pluie. Comment la pluie a-t-elle affecté le quadrant agricole et les produits chimiques se sont-ils propagés à d'autres parties de l'île ? Comment les organismes que nous venons d'identifier sur l'île sont-ils affectés par le ruissellement des produits chimiques ?

Partie 3

Il est maintenant temps d'analyser les échantillons que nous avons recueillis. Nous avons également reçu de toutes nouvelles images satellites de l'île qui peuvent nous aider à comprendre ce qui se passe. Les données confirmant nos prévisions : le ruissellement de produits chimiques de l'île vers la mer a déclenché une prolifération nocive d'algues dans l'océan qui entoure notre île. En prélevant des échantillons sur le rivage, nous avons également constaté que de grandes quantités d'algues mortes avaient été rejetées sur les plages autour de l'île. Cela pourrait aggraver les effets néfastes sur l'ensemble de l'écosystème et les habitants de l'île. C'est alarmant !

Nous avons décidé de nous réunir, d'échanger des informations et de discuter des mesures à prendre pour mettre fin aux effets néfastes du lessivage chimique et aider l'écosystème de l'île à se rétablir.

Fiches d'information

L'île Nexus

Une ressource pédagogique ludique sur l'exploration des écosystèmes



Fiches d'information : Table des matières

Posidonies (<i>Posidonia oceanica</i>)	20
<i>P. australis</i> (<i>Pseudo-nitzschia australis</i>)	26
<i>A. catenella</i> (<i>Alexandrium catenella</i>)	31
<i>E. coli</i> (<i>Escherichia coli</i>)	37
<i>Platynereis</i> (<i>Platynereis dumerilii</i>)	43
<i>Nitrososphaera</i>	50
<i>Pseudomonas</i> (<i>Pseudomonas putida</i>)	56

Posidonies

(*Posidonia oceanica*)



Prédéric Ducarme, sous licence CC-BY-SA 4.0

Les Posidonies sont des plantes à fleurs ressemblant à des graminées. On les trouve le long des côtes des océans du monde entier. Les Posidonies peuvent former de longues étendues de prairies sous-marines, offrant un habitat à de nombreuses autres espèces marines. Le nom « Posidonies » vient de leur ressemblance morphologique avec des graminées aux feuilles étroites en forme de lame.

Comme toutes les plantes, les Posidonies réalisent la photosynthèse, convertissant l'énergie lumineuse en énergie chimique. Au cours de ce processus, les Posidonies capturent le CO₂ de l'eau et le convertissent en composés organiques stockés à l'intérieur de l'organisme. Les populations saines de Posidonies sont donc considérées comme des acteurs importants dans la lutte contre le changement climatique.

Il existe 60 espèces connues de Posidonies. L'une d'entre elles, *Posidonia oceanica* ou herbe de Neptune, appartient au genre *Posidonia* et est une espèce endémique de la mer Méditerranée. Les herbiers de *Posidonia* abritent une variété d'organismes allant des oursins aux différentes espèces de poissons qui utilisent ces herbiers sous-marins comme sanctuaires ou sources de nourriture.

Écologie

Posidonia oceanica (*P. oceanica*) vit sur les côtes de la mer Méditerranée et forme des herbiers sous-marins ancrés au fond de la mer, également appelés zone benthique.

Grâce à leurs rhizomes qui s'enracinent au fond de la mer, les Posidonies contribuent également à stabiliser les sédiments meubles de l'océan. Comme ces organismes dépendent de la lumière du soleil pour réaliser la photosynthèse et se développer, ils ne peuvent pas survivre dans les zones plus profondes et donc plus sombres de la mer. Cela limite leur habitat à une zone côtière d'environ 30 mètres de profondeur où l'accès à la lumière du soleil est suffisant pour assurer leur croissance.

Au cours de la photosynthèse, les *Posidonies* fixent des millions de tonnes de CO₂ dans des composés organiques. Cela signifie qu'elles collectent le CO₂ libre dans l'atmosphère et le gardent « enfoui » sous le fond marin sous d'autres formes chimiques. L'excès de CO₂ libre dans l'atmosphère agissant comme une couverture qui réchauffe la Terre, la capacité des Posidonies à absorber ce CO₂ atmosphérique et à le retenir au fond des mers a des implications importantes dans la lutte contre le changement climatique.

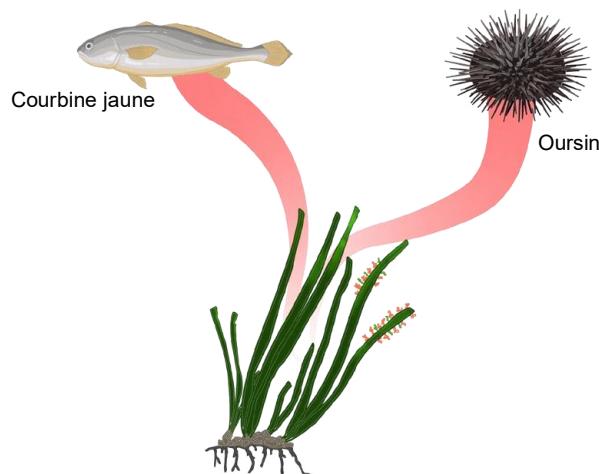


Figure 1 : Les Posidonies sont une source de nourriture pour divers animaux tels que les poissons et les oursins.
(Image créée à l'aide de BioRender.com)

Les Posidonies constituent une source alimentaire primaire pour les organismes marins et une part importante du régime alimentaire de nombreux animaux. Par exemple, *P. oceanica* est une source de nourriture pour les animaux brouteurs comme les oursins, les espèces de poissons herbivores et le ver marin *Platynereis dumerilii*. Les espèces de Posidonies autres que *P. oceanica* présentes dans de nombreuses régions du monde constituent une source alimentaire importante pour des organismes tels que les dugongs, les lamantins et les tortues marines. Les dugongs, en particulier, seuls animaux marins herbivores au monde, dépendent fortement de la santé des herbiers de Posidonies pour leur survie ([réf. 1](#)).

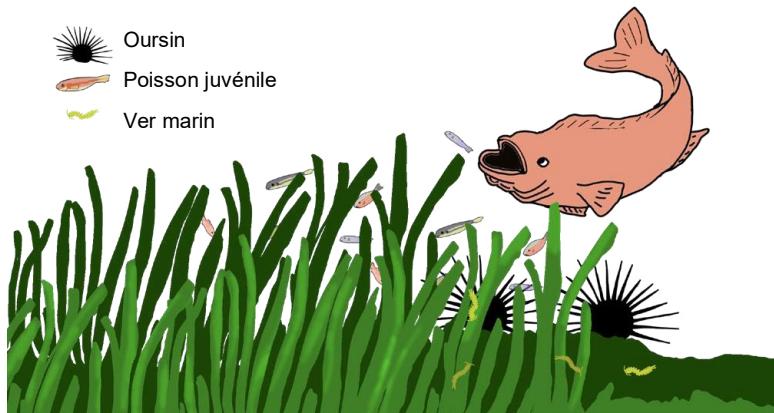


Figure 2 : Les herbiers de Posidonies constituent des habitats importants pour les animaux marins.
Les herbiers de Posidonies sont habitées par des animaux tels que des vers marins et différents poissons. Pour tous ces animaux, les herbiers offrent une protection et sont riches en différentes espèces dont ils peuvent se nourrir.

Les fonds marins de *Posidonies* sont des habitats importants pour les animaux invertébrés tels que les vers marins. Ces plantes servent également de zones d'alevinage (nurseries) pour de nombreuses espèces de poissons qu'elles protègent ainsi des prédateurs en pleine mer. Différentes espèces de poissons juvéniles restent dans les nurseries à des périodes spécifiques de l'année. Par exemple, les petites daurades annulaires (*Diplodus annularis*) utilisent les herbiers de Posidonies pour grandir tout au long de l'été, tandis que les crénilabres ocellés (*Syphodus ocellatus*) juvéniles passent l'automne et l'hiver à se développer dans ces abris de Posidonies ([réf. 2](#)).

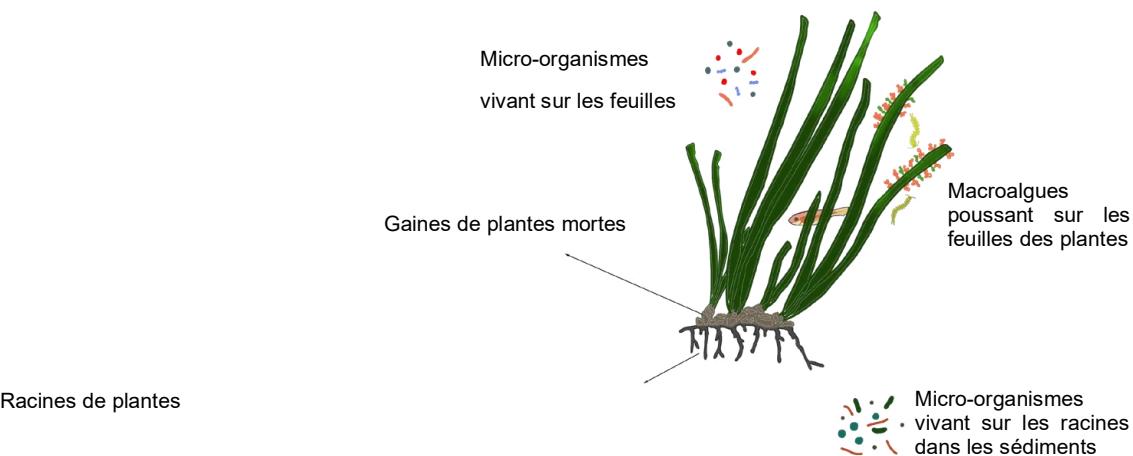


Figure 3 : Les herbiers de Posidonies constituent des habitats importants pour les micro-organismes.
Les micro-organismes tels que les bactéries vivent à la fois sur les feuilles et autour des racines des Posidonies. Ces micro-organismes présentent divers avantages pour la plante.

Certaines espèces de macroalgues peuvent utiliser les feuilles de *P. oceanica* comme point d'ancrage et de stabilisation pour se développer. Ces macroalgues nourrissent des organismes tels que le ver marin *Platynereis dumerillii*. Les herbiers de *Posidonies* créent un espace vital pour de nombreux organismes qui, en retour, aident les *Posidonies* à disperser leur pollen pour se reproduire.

Outre leurs interactions avec des organismes visibles à l'œil nu, tels que les oursins et les poissons, *P. oceanica* entretient également une symbiose avec des micro-organismes marins. De nombreux micro-organismes différents vivent sur ou autour des feuilles et des racines des Posidonies. Par exemple, les communautés microbiennes vivant sur les racines de *P. oceanica* aident les plantes à accéder à l'azote inorganique, un élément essentiel à la croissance et au développement des organismes. Une plante de Posidonies et ses microbes associés résidant sur les différentes parties de la plante constituent l'*holobionte marin*. Dans l'ensemble, les micro-organismes de l'*holobionte marin* aident la plante à détoxifier sa rhizosphère et à stimuler sa croissance grâce à des molécules similaires à des hormones, en échange de nourriture et d'autres composés générés par la plante (réf. 3, réf. 4).

Changement de l'environnement

La présence de *P. oceanica* dans une zone donnée dépend d'un certain nombre de facteurs tels que la salinité, la température, la turbidité de l'eau, l'accès à la lumière du soleil et les activités anthropiques susceptibles de perturber indirectement ou directement leurs habitats. Par exemple, *P. oceanica* n'est pas présente dans les zones où la turbidité de l'eau est élevée, car celle-ci empêche les plantes d'accéder à la lumière du soleil. Cette turbidité peut résulter de l'écoulement naturel d'eau douce provenant de la terre, qui réduit la salinité de l'environnement et met en suspension des particules de sédiments qui empêchent la lumière du soleil d'atteindre les plantes de la zone benthique. Les herbiers de *P. oceanica* sont également connus pour régresser dans les régions où de nombreux bateaux jettent l'ancre (réf. 5).

Il est particulièrement important de comprendre comment *P. oceanica* réagit aux activités humaines, car les côtes méditerranéennes, par exemple, sont des hauts lieux du tourisme, ce qui entraîne une augmentation de l'activité humaine à proximité de l'habitat de la plante. Il a récemment été découvert



que *P. oceanica* accumule des polluants d'origine humaine, tels que certains composants des crèmes solaires anti-UV. À l'heure actuelle, on ne sait pas de quelle manière les produits chimiques tels que les filtres UV peuvent affecter les Posidonies et les autres organismes qui en dépendent ou qui vivent en symbiose avec eux. Il s'agit d'une question importante à prendre en considération, d'autant plus que la mer Méditerranée a déjà perdu environ 30 % de ses Posidonies en 50 ans en raison de perturbations locales ([réf. 6](#), [réf. 7](#)).

En raison de sa capacité à accumuler les polluants, *P. oceanica* a été utilisée comme bioindicateur pour évaluer les niveaux de pollution et la qualité environnementale d'une zone. Les feuilles et les gaines mortes de la plante trouvées dans les herbiers peuvent être utilisées pour détecter et comparer les niveaux de pollution métallique. L'analyse des gaines mortes peut fournir des informations sur l'évolution du taux de pollution au cours des dernières décennies ([réf. 8](#)).

Dans la recherche

Les herbiers de *P. oceanica* peuvent être surveillés et étudiés par différents moyens. Par exemple, des scientifiques ont utilisé des drones le long du Sant'Amanza Bey, en France, pour étudier les effets des activités nautiques de plaisance sur les populations de *P. oceanica*. L'étude a révélé que les activités d'ancre des bateaux entraînaient une diminution du nombre de *posidonies* et conduisaient à la régression de l'espèce sur le littoral étudié ([réf. 9](#)).

Étant donné que les herbiers de *P. oceanica* constituent des habitats pour de nombreux organismes différents, la surveillance de la présence de ces symbiotes dans ces habitats peut également fournir des indices sur la santé globale de l'écosystème de *P. oceanica*. Dans une étude, des scientifiques ont utilisé des hydrophones pour recueillir les cris des poissons sous forme d'ondes acoustiques afin d'évaluer la santé de l'écosystème de *P. oceanica* dans le sud de la France ([réf. 10](#)).

Les plantes de *P. oceanica* peuvent également être cultivées en laboratoire. Pour ce faire, des racines et des rhizomes intacts de *P. oceanica* sont prélevés dans leur habitat naturel et étudiés dans des conditions environnementales contrôlées. En laboratoire, les scientifiques peuvent évaluer l'état des Posidonies en fonction de la turbidité, de la salinité, de l'acidification et de la température de l'eau. Une étude sur *P. oceanica* collectée sur la côte de Murcie, en Espagne, a montré que l'augmentation de la salinité entraînait une diminution des taux de photosynthèse ([réf. 11](#)).

Glossaire

Rhizome : Tiges végétales spécifiques qui poussent à l'horizontale au sol.

Dugong : Mammifère marin herbivore qui vit dans les eaux de l'Afrique orientale au Pacifique occidental.

Lamantin : Mammifère marin qui se nourrit d'herbes marines et d'algues et vit en Afrique occidentale, dans le golfe du Mexique et dans le bassin amazonien.

Macroalgues : Groupe d'organismes protistes multicellulaires réalisant la photosynthèse.

Daurade annulaire : Espèce de poisson très répandue dans la mer Méditerranée.

Crénilabre ocellé : Espèce de poisson peuplant les eaux côtières de l'Atlantique Est, de la Méditerranée et de la mer Noire.

Bioindicateur : Tout organisme utilisé pour évaluer la santé d'un écosystème.

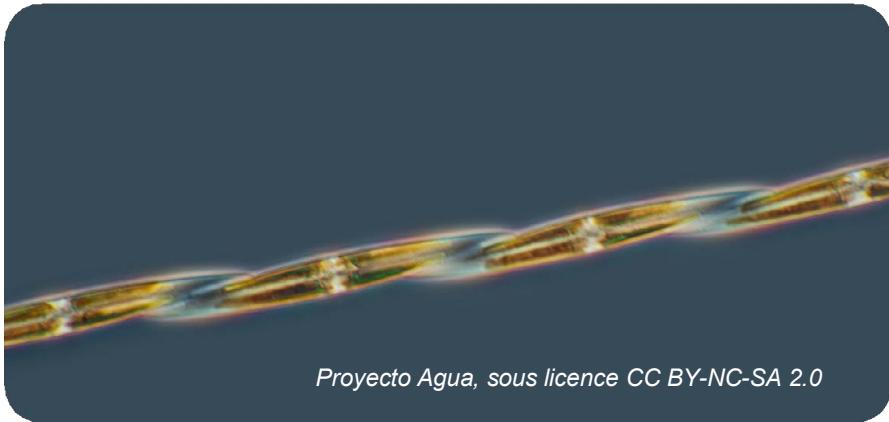


Références

1. Edith Cowan University, Perth, Western Australia. (2022, 7 octobre). Conserving critical seagrass habitat for dugong: an integrated assessment across the pilbara. ECU. <https://www.ecu.edu.au/schools/science/research/school-centres/centre-for-marine-ecosystems-research/research-themes/habitat-connectivity-and-trophic-interactions/related-content/lists/habitat-connectivity-and-trophic-interaction/conserving-critical-seagrass-habitat-for-dugong-an-integrated-assessment-across-the-pilbara>
2. Díaz-Gil, C. et al. (2019). Changes in the juvenile fish assemblage of a Mediterranean shallow *Posidonia oceanica* seagrass nursery area after half century. Mediterranean Marine Science, 20(3), 603. <https://doi.org/10.12681/mms.19510>
3. Lehnen, N. et al. (2016). High rates of microbial dinitrogen fixation and sulfate reduction associated with the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica*. Systematic and Applied Microbiology, 39(7), 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.syapm.2016.08.004>
4. Conte, C. et al. (2021). The Seagrass Holobiont: What We Know and What We Still Need to Disclose for Its Possible Use as an Ecological Indicator. Water, 13(4), 406. <https://doi.org/10.3390/w13040406>
5. Pergent-Martini, C. et al. (2022). Major regression of *Posidonia oceanica* meadows in relation with recreational boat anchoring: A case study from Sant'Amanza bay. Journal of Sea Research, 188, 102258. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2022.102258>
6. Agawin, N. S. R. et al. (2022). Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* accumulates sunscreen UV filters. Marine Pollution Bulletin, 176, 113417. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113417>
7. Telesca, L. et al. (2015). Seagrass meadows (*Posidonia oceanica*) distribution and trajectories of change. Scientific Reports, 5(1). <https://doi.org/10.1038/srep12505>
8. Masqué, P., Courjault-Radé, P., Krishnakumar, P. K., Daghbouj, N., Mansour, L., Balti, R., Castet, S., Attia, F., Michel, S., & Bejaoui, N. (2017b). Biomonitoring of coastal pollution in the Gulf of Gabes (SE, Tunisia): use of *Posidonia oceanica* seagrass as a bioindicator and its mat as an archive of coastal metallic contamination. Environmental Science and Pollution Research, 24(28), 22214–22225. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9856-x>
9. Könneke, M. et al. (2005b). Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon. Nature, 437(7058), 543–546. <https://doi.org/10.1038/nature03911>
10. Di Iorio, L. et al. (2018). 'Posidonia meadows calling': a ubiquitous fish sound with monitoring potential. Remote Sensing in Ecology and Conservation, 4(3), 248–263. <https://doi.org/10.1002/rse2.72>
11. Marín-Guirao, L. et al. (2011). Photosynthesis, growth and survival of the Mediterranean seagrass *Posidonia oceanica* in response to simulated salinity increases in a laboratory mesocosm system. Estuarine Coastal and Shelf Science, 92(2), 286–296. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.01.003>

P. australis

(*Pseudo-nitzschia australis*)



Les *Pseudo-nitzschia australis* (*P. Australis*) sont des protistes aquatiques qui présentent des caractéristiques particulières : ils sont entourés d'une paroi de silice et possèdent des chloroplastes qui leur permettent de réaliser la photosynthèse. Ces protistes sont appelés diatomées. Comme d'autres organismes dotés de chloroplastes, les diatomées convertissent l'énergie lumineuse du soleil en énergie chimique sous forme de nutriments et de biomasse. Ce processus est vital pour les diatomées afin de maintenir leur population et de survivre. La capacité de ces diatomées à produire leur propre énergie en fait des producteurs de nourriture primaires dans les océans. Tant qu'il existera des diatomées convertissant l'énergie lumineuse en énergie chimique, il existera des organismes qui dépendront de leur consommation. De plus, au cours de ce processus de conversion énergétique, les diatomées produisent de l'oxygène gazeux, indispensable à la survie des organismes qui en dépendent. En effet, les diatomées produisent environ 30 % de l'oxygène gazeux présent dans l'atmosphère.

Bien que les diatomées présentent de nombreux avantages pour les écosystèmes environnants, la prolifération d'espèces telles que *P. australis* peut être mortelle pour d'autres organismes. Les proliférations sont des événements au cours desquels le nombre de diatomées augmente rapidement dans un court laps de temps. Cette augmentation entraîne une production massive de toxines, sécrétées par les algues (terme informel désignant tout organisme aquatique eucaryote photosynthétisant), qui peuvent s'accumuler dans les organismes marins et tuer les animaux qui s'en nourrissent. Les déversements d'engrais provenant des sols, l'augmentation de la température de la mer et la remontée d'eaux riches en nutriments depuis les profondeurs océaniques sont autant de facteurs susceptibles de déclencher une prolifération d'algues (réf. 1).

Avec le réchauffement global des océans, *P. australis* prolifère désormais plus fréquemment et à des latitudes plus élevées qu'auparavant. Ces proliférations sont parfois si importantes qu'elles sont visibles depuis l'espace et peuvent être observées par satellite. La croissance explosive des diatomées donne à l'eau une couleur verte due aux pigments chlorophylliens verts contenus dans ces organismes. Les satellites peuvent détecter ces changements de couleur et nous informer de l'apparition d'une prolifération.

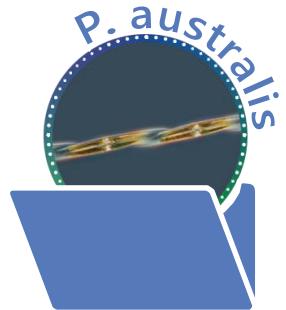
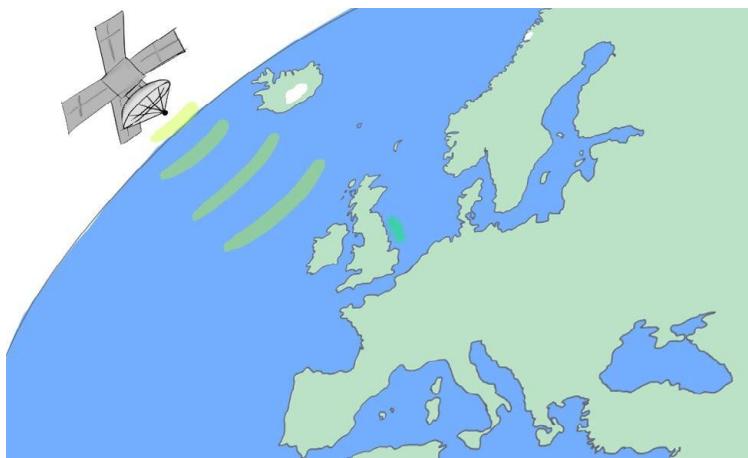


Figure 1 : De grandes proliférations d’algues sont visibles depuis l’espace.

Les satellites peuvent détecter les changements de couleur des océans dus à la croissance massive d’algues. Voyez-vous où se trouve la prolifération dans l’illustration ?

Écologie

La diatomée *P. australis* peut se développer dans des plages de températures très variées et elle est présente dans de nombreuses régions océaniques du monde, dans les zones subtropicales et tempérées. En tant qu’organisme photosynthétique, elle constitue la base alimentaire de nombreux types d’organismes, dont les zooplanctons, les oiseaux et les baleines. Les diatomées peuvent être consommées par divers organismes tels que le krill et les moules, qui sont à leur tour consommés par des organismes situés plus haut dans la chaîne alimentaire. Par exemple, le krill est consommé par les poissons et les calmars, qui deviennent à leur tour la nourriture des mammifères marins, des humains et des oiseaux marins comme les pélicans.

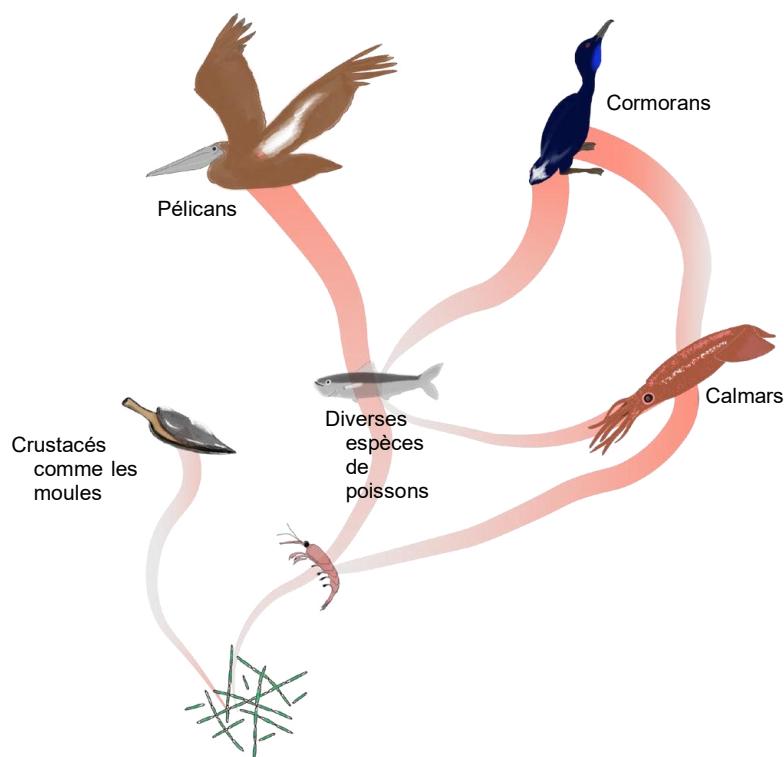
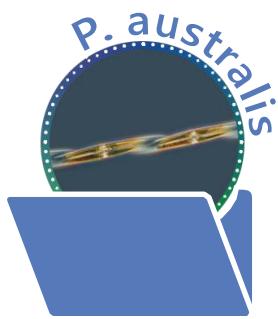


Figure 2 : *P. australis* sert de base alimentaire à divers organismes.

P. australis est consommé par des organismes tels que le krill et les crustacés, qui sont eux-mêmes consommés par d’autres animaux tels que les poissons et les calmars, qui sont à leur tour consommés par des oiseaux tels que les pélicans ou les cormorans.



Bien que toutes les espèces du genre *Pseudo-nitzschia* ne soient pas toxiques, la production en grande quantité d'acide domoïque, une neurotoxine, lors d'une prolifération fait de *P. australis* une espèce très毒ique. Cette toxine peut contaminer les fruits de mer et même les fonds marins, également appelés zone benthique, entraînant lempoisonnement des animaux marins et des êtres humains. A titre préventif, les zones touchées par les proliférations peuvent être surveillées par satellite ou à l'aide de capteurs qui détectent la présence de la neurotoxine ([réf. 2](#), [réf. 3](#)). En raison de l'importance de *P. australis* pour la santé humaine et le bien-être des régions côtières, il est important de surveiller les conditions biologiques, physiques et chimiques dans les eaux côtières afin de mieux comprendre et, à terme, de prévoir quand et où des proliférations d'algues nuisibles sont susceptibles de se produire.

En cas de détection de proliférations toxiques, la pêche devrait être interrompue afin d'empêcher la toxine d'atteindre les humains. Comme de nombreux organismes marins dépendent de *P. australis* comme source de nourriture, l'acide domoïque peut facilement atteindre et contaminer des organismes tels que les mollusques, les échinodermes et les crustacés. Tous ces organismes ne meurent pas à cause de la toxine, mais l'accumulent dans leur corps. Une fois ingérée par des organismes tels que les moules et le zooplancton (par exemple le krill), la toxine peut être transmise aux mammifères marins, aux humains et aux oiseaux aquatiques comme les cormorans et les pélicans bruns qui consomment les ressources alimentaires contaminées par la toxine. Une fois dans l'organisme des oiseaux et des mammifères, l'acide domoïque peut provoquer des intoxications en perturbant le système nerveux et même avoir des effets mortels.

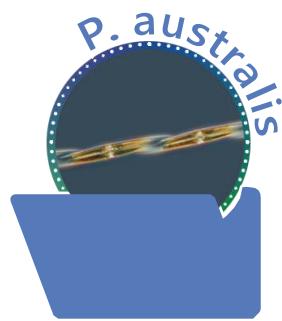


Le film « Les Oiseaux » d'Alfred Hitchcock (1963) s'inspire d'un incident spécifique survenu sur la côte californienne, aux États-Unis, où des oiseaux marins ayant consommé des poissons contaminés par des toxines issues d'une prolifération d'algues ont commencé à présenter un comportement étrange avant de mourir.

Reproduction

Comme les autres diatomées, *P. australis* peut se reproduire de manière sexuée ou asexuée. Lors de la reproduction asexuée, les diatomées se divisent en deux, produisant des cellules filles deux fois plus petites que les cellules mères. Les cellules peuvent poursuivre cette reproduction asexuée jusqu'à ce que les cellules filles soient si petites qu'elles ne puissent plus fonctionner et meurent. Une telle réduction de taille peut déclencher le passage des diatomées de la reproduction asexuée à la reproduction sexuée. Au cours de la reproduction sexuée, les diatomées de sexes opposés se rejoignent et s'alignent au niveau de leurs valves.

À la suite de cet alignement, les gamètes sont produits par méiose. Après la production des gamètes, la cage de silice de la diatomée s'ouvre et permet l'échange de gamètes entre les deux sexes, ce qui aboutit à la fécondation. Après la fécondation, la nouvelle cellule s'allonge à travers la cage et augmente de taille ([réf. 4](#), [réf. 5](#)).



Paradoxe du plancton

La diversité des diatomées défie le principe d'exclusion compétitive, qui postule que deux espèces en concurrence pour les mêmes ressources ne peuvent coexister dans la même niche écologique. Cette proposition ne semble pas valable pour les planctons, y compris les diatomées qui, bien qu'en concurrence pour les mêmes types de ressources, coexistent avec de nombreuses autres espèces dans une zone restreinte.

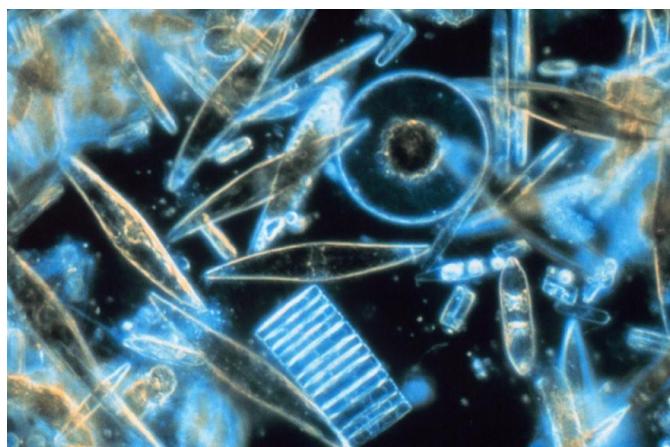


Figure 3 : Le plancton est composé de membres très divers.

Les diatomées sont observées au microscope. Ces spécimens ont été trouvés dans le détroit de McMurdo, en Antarctique. La photo a été prise par le professeur Gordon T. Taylor de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

Culture en laboratoire

P. australis peut être cultivé en laboratoire en reproduisant son environnement naturel. Les scientifiques peuvent prélever des litres d'eau de mer dans les océans et la stériliser afin de cultiver ces diatomées dans un cycle de 12 heures de lumière et 12 heures d'obscurité à une température de 15 °C. Ils peuvent également reproduire un environnement marin en ajoutant les sels et ions nécessaires à l'eau douce. L'ajout d'engrais au milieu marin peut entraîner une prolifération d'algues, ce qui aide les scientifiques à étudier de manière contrôlée les proliférations d'algues observées dans la nature (réf. 6).

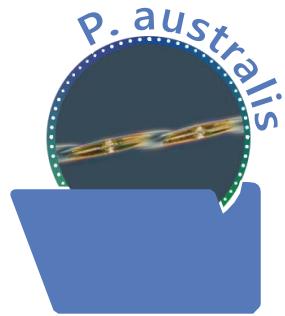
Glossaire

Remontée d'eau : Phénomène par lequel des eaux froides profondes remontent à la surface

Neurotoxine : Tout groupe de toxines affectant le système nerveux.

Valve : La coquille des diatomées est composée de parties distinctes et nommées en fonction de leur « position » sur une surface. Les valves sont les structures siliceuses situées en haut et en bas de la coquille.

Silice : Un minéral que l'on trouve communément dans la croûte terrestre et qui est utilisé dans la production du verre.



Références

1. Trainer, V. L. et al. (2010). The distribution and impacts of harmful algal bloom species in eastern boundary upwelling systems. *Progress in Oceanography*, 85(1–2), 33–52. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.02.003>
2. Trainer, V. L. et al. (2012). Pseudo-nitzschia physiological ecology, phylogeny, toxicity, monitoring and impacts on ecosystem health. *Harmful Algae*, 14, 271–300. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.10.025>
3. Palenzuela, J. M. T. et al. (2019). Pseudo-nitzschia Blooms in a Coastal Upwelling System: Remote Sensing Detection, Toxicity and Environmental Variables. *Water*, 11(9), 1954. <https://doi.org/10.3390/w11091954>
4. Trainer, V. L. et al. (2012b). Pseudo-nitzschia physiological ecology, phylogeny, toxicity, monitoring and impacts on ecosystem health. *Harmful Algae*, 14, 271–300. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.10.025>
5. Geitler, L. (1935). Reproduction and Life History in Diatoms. *Botanical Review*, 1(5), 149–161. <http://www.jstor.org/stable/4353102>
6. Howard, M. D., Cochlan, W. P., Ladizinsky, N., & Kudela, R. M. (2007). Nitrogenous preference of toxicogenic *Pseudo-nitzschia australis* (Bacillariophyceae) from field and laboratory experiments. *Harmful Algae*, 6(2), 206–217. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2006.06.003>

A. catenella

(*Alexandrium catenella*)



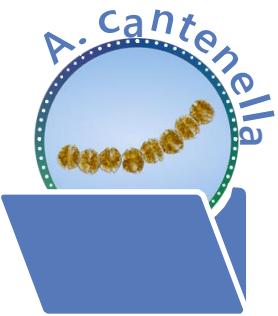
Les *Alexandrium catenella* sont des protistes dinoflagellés, un groupe d'eucaryotes unicellulaires dotés d'un flagelle qui vivent dans les eaux marines et douces. Elles peuvent exister sous forme de cellules individuelles ou de petites chaînes composées de plusieurs cellules. Ces microalgues se déplacent dans l'eau grâce à des appendices appelés flagelles. Un flagelle à l'avant de la cellule assure la locomotion vers l'avant et un autre, à l'arrière, fonctionne comme un gouvernail. *A. catenella* existe sous forme mixotrophe dans le réseau alimentaire : elle peut utiliser l'énergie lumineuse pour se développer et produire sa propre nourriture ou se nourrir d'autres micro-organismes tels que les cyanobactéries.

Comme *A. catenella* utilise la lumière du soleil pour produire de la nourriture et de l'oxygène, elle constitue la base de nombreux réseaux alimentaires marins en tant que producteur primaire. En fait, les dinoflagellés contribuent à la production de la majeure partie de l'oxygène de la planète, avec d'autres organismes photosynthétiques tels que les plantes et les diatomées.

Les *A. catenella* sont connues pour provoquer des proliférations d'algues toxiques. Lors des proliférations, le nombre d'*A. catenella* augmente de manière explosive et ces organismes produisent une neurotoxine appelée saxitoxine. La saxitoxine est une neurotoxine considérée comme un « agent de guerre chimique de catégorie I » ([réf. 1](#)). Les oiseaux, les mammifères marins et les humains qui consomment des organismes porteurs de toxines se nourrissant d'*A. catenella* peuvent présenter des symptômes neurologiques, voire mourir ([réf. 2](#))

Écologie

A. catenella passe la majeure partie de sa vie sous forme de kyste dormant au fond de l'océan. Lorsque les nutriments et l'oxygène sont disponibles en quantité suffisante et que la température est favorable, les dinoflagellés germent et se transforment activement en organismes photosynthétiques mobiles. En raison du changement climatique, l'augmentation des températures dans les eaux marines entraîne une germination plus importante qu'auparavant. Par exemple, la prolifération de dinoflagellés dans l'Arctique produit des efflorescences algales qui sont plus fréquentes aujourd'hui que par le passé. Ces efflorescences fréquentes constituent une menace pour la vie marine environnante en raison de la production d'une neurotoxine très puissante.



Ces dinoflagellés utilisent l'énergie lumineuse pour se reproduire et se développer, produisant ainsi de la nourriture et de l'oxygène gazeux qui sont utilisés par d'autres organismes tels que les moules et le zooplancton. Ces organismes deviennent la source de nourriture d'autres animaux, comme différentes espèces de poissons, qui sont à leur tour consommés par les baleines, les dauphins, les oiseaux de mer et les humains.

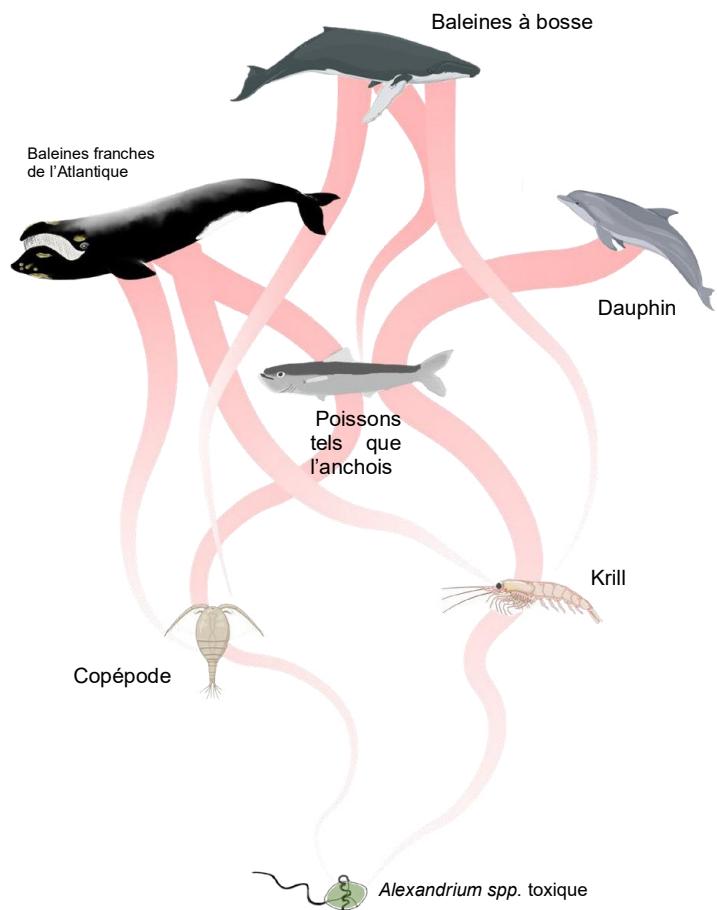
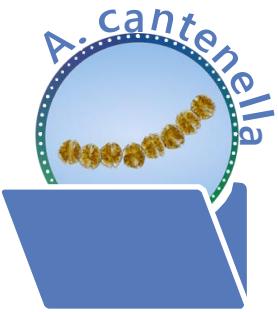


Figure 1 : Les dinoflagellés constituent la source de nourriture de nombreux organismes.

Les dinoflagellés sont consommés par des organismes tels que le krill et les copépodes, qui sont eux-mêmes mangés par d'autres animaux tels que les poissons, les baleines et les dauphins. (Image créée à l'aide de BioRender.com)

À l'instar des diatomées telles que *Pseudo-nitzschia australis*, la croissance explosive de ces dinoflagellés producteurs de toxines peut être nocive pour les organismes vivant dans le même environnement qu'eux. Bien que la saxitoxine soit une substance chimique mortelle pour les organismes tels que les oiseaux, les mammifères et les humains, elle ne provoque pas toujours la mort des consommateurs primaires tels que

les crustacés, les copépodes et le krill, mais peut s'accumuler dans leur organisme. Une fois accumulée, elle peut être transmise aux animaux marins qui s'en nourrissent, puis à leurs consommateurs finaux. Il existe de nombreux rapports faisant état de cas de baleines, de dauphins et d'êtres humains affectés par cette toxine. La neurotoxine se lie aux canaux sodiques des cellules musculaires et nerveuses, ce qui entraîne des troubles du système nerveux. Par exemple, depuis 1972, les efflorescences toxiques de ces dinoflagellés ont entraîné la mort de 28 personnes et affecté des centaines d'autres sur la côte chilienne (réf. 3).



En 1987, 14 baleines à bosse ont été retrouvées échouées et mortes dans les baies de l'océan Atlantique après avoir consommé des poissons contaminés par la toxine (réf. 4). À une autre occasion, des dizaines de dauphins ont été retrouvés échoués et morts le long des côtes argentines. Une analyse plus approfondie des animaux morts a révélé que leur mort pourrait être due à une exposition à la saxitoxine (réf. 5).

Enfin, une étude récente sur les baleines franches de l'Atlantique Nord a révélé qu'elles étaient exposées à cette neurotoxine en raison de la prolifération nocive d'une espèce d'*Alexandrium* près de leurs zones d'alimentation.

Compte tenu de la large diffusion de cette toxine à travers les réseaux alimentaires basés sur le phytoplancton *A. catenella*, il est important de mettre en place des mesures pour protéger à la fois la faune sauvage et les êtres humains contre ces effets nocifs. Les baleines franches de l'Atlantique nord en tant qu'espèce peuvent être particulièrement vulnérables à ces proliférations toxiques, étant donné qu'il n'en reste qu'environ 300 individus dans le monde, qui sont gravement menacés d'extinction (réf. 6).

Surveillance des efflorescences toxiques

Lors des efflorescences, les cellules d'algues se reproduisent massivement. Parfois, ces proliférations d'algues deviennent si importantes qu'elles peuvent être détectées depuis l'espace à l'aide de satellites. Une fois les efflorescences toxiques détectées, des mesures d'atténuation peuvent être prises autour des zones touchées afin d'empêcher les toxines d'atteindre les humains.

Compte tenu de la puissance de la saxitoxine et de sa facilité à se propager dans la chaîne alimentaire océanique, les recherches se sont également concentrées sur l'identification de la toxine dans les organismes marins utilisés comme sources alimentaires et dans l'eau potable. Les crustacés

IGO 3.0.

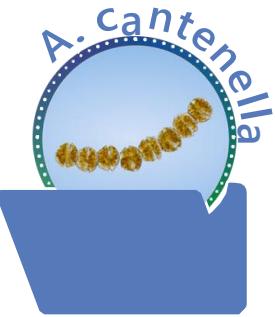
catenella, la surveillance de l'accumulation de toxines dans les crustacés est une mesure préventive importante avant leur consommation. À cette fin, les chercheurs ont mis au point diverses méthodes permettant de détecter la présence de toxines produites par les proliférations d'algues. Ces méthodes comprennent des méthodes chromatographiques, l'utilisation de chimiosenseurs et la surveillance de cellules vivantes.

ont une valeur commerciale et sont régulièrement consommés par l'humain. Étant donné que différentes espèces de crustacés se nourrissent régulièrement de microalgues comme l'A.



Figure 2 : Une prolifération d'algues (en vert) capturée dans la mer Baltique par les satellites de l'ESA.

ESA/Copernicus/Sentinel-3 mission, sous licence CC BY-SA



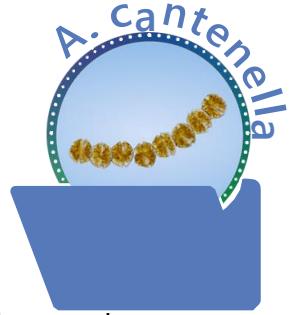
Le test immuno-enzymatique (ELISA) est une méthode fiable pour détecter la saxitoxine dans des échantillons. Dans les tests ELISA, des anticorps qui se lient spécifiquement

à la toxine sont ajoutés à l'échantillon. Si la toxine est présente, les anticorps se lient à elle et catalysent une réaction chimique dans la solution de test, entraînant un changement de couleur. Ce changement de couleur peut ensuite être détecté et quantifié par des capteurs ([réf. 7](#)).

Dans la recherche

En raison de sa capacité à produire des neurotoxines très puissantes comme la saxitoxine, les scientifiques se sont concentrés sur des stratégies visant à atténuer les effets des proliférations d'*A. catenella*. En raison de leur capacité à assimiler des nutriments tels que les composés azotés et phosphorés, dont la présence peut contribuer à la croissance explosive des proliférations nocives d'*Alexandrium*, les espèces de macroalgues en croissance ont été considérées comme une mesure respectueuse de l'environnement pour atténuer les dommages causés par les proliférations toxiques.

Les macroalgues sont des protistes marins multicellulaires présentant des caractéristiques végétales qui réalisent la photosynthèse et produisent leur propre nourriture. Dans les écosystèmes marins, elles sont en concurrence avec des microalgues telles que *A. catenella* pour les nutriments. Cela signifie qu'en cas de disponibilité limitée des nutriments nécessaires aux deux organismes, la présence de macroalgues en tant que concurrentes peut ralentir la croissance et la production de toxines des microalgues. En effet, lorsqu'elles ont été cultivées ensemble en laboratoire, des espèces de macroalgues telles que *Saccharina latissima* et *Chondrus crispus* ont entraîné une baisse de 90 % de la densité de population d'*A. catenella*. À la suite de ces résultats, les scientifiques ont mené des expériences similaires dans des conditions plus proches de l'écosystème réel. Des expériences réalisées dans des mésocosmes placés dans les baies de Long Island, aux États-Unis, ont démontré que la présence de *Saccharina latissima* entraînait une baisse pouvant atteindre 70 % de la densité de population du protiste toxique. De plus, la présence de cette espèce de macroalgue a également entraîné une réduction de l'accumulation de saxitoxine dans les tissus des crustacés ([réf. 8](#)).



Glossaire

Protiste dinoflagellé : Groupe d'organismes eucaryotes unicellulaires dotés de flagelles.

Microalgues : Les microalgues sont des organismes eucaryotes marins microscopiques capables de réaliser la photosynthèse. Les diatomées et les dinoflagellés en sont des exemples.

Mixotrophe : Organisme capable de produire de l'énergie à la fois par autotrophie et par hétérotrophie.

Kyste dormant : Stade de vie du protiste *Alexandrium* au cours duquel l'organisme ralentit son métabolisme et reste enfoui dans les sédiments océaniques.

Crustacé : Terme familier désignant les animaux invertébrés entourés d'un exosquelette.

Copépode : Petit crustacé vivant dans les milieux aquatiques.

Phytoplancton : Organismes généralement microscopiques qui réalisent la photosynthèse et dérivent au gré des courants marins.

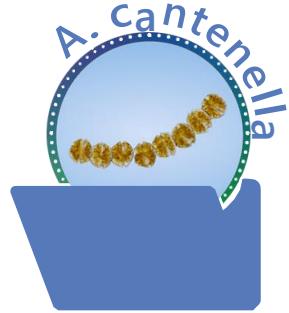
Chromatographie : Méthode permettant de séparer et d'identifier des composés en les faisant passer à travers une phase stationnaire.

Macroalgues : Terme informel désignant tout organisme non végétal capable de réaliser la photosynthèse. Le préfixe « macro » indique que ces organismes sont visibles

à l'œil nu, comme le varech et les algues marines.

Mésocosme : Traduction littérale : « monde moyen ». Il s'agit de systèmes expérimentaux mis en place dans un environnement imitant le monde extérieur.

ELISA : Test biochimique permettant de détecter la présence de composés spécifiques.



Références

1. Cusick, K. D., & Sayler, G. S. (2013). An Overview on the Marine Neurotoxin, Saxitoxin: Genetics, Molecular Targets, Methods of Detection and Ecological Functions. *Marine Drugs*, 11(12), 991–1018. <https://doi.org/10.3390/md11040991>
2. Anderson, D. M. et al. (2012). The globally distributed genus *Alexandrium*: Multifaceted roles in marine ecosystems and impacts on human health. *Harmful Algae*, 14, 10–35. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2011.10.012>
3. Crawford, D. et al. (2021). Blooms of *Alexandrium catenella* in Coastal Waters of Chilean Patagonia: Is Subantarctic Surface Water Involved? *Frontiers in Marine Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.612628>
4. Geraci, J. et al. (1989). Humpback Whales (*Megaptera novaeangliae*) Fatally Poisoned by Dinoflagellate Toxin. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 46(11), 1895–1898. <https://doi.org/10.1139/f89-238>
5. International Whaling Commission. (n.d.-b). Investigation of a mass stranding of 68 short-beaked common dolphins in Golfo Nuevo, Península Valdés, Argentina | EPIC. <https://epic.awi.de/id/eprint/49556/>
6. Durbin, E. G. et al. (2002). North Atlantic right whales, *Eubalaena glacialis*, exposed to paralytic shellfish poisoning (PSP) toxins via a zooplankton vector, *Calanus finmarchicus*. *Harmful Algae*, 1(3), 243–251. [https://doi.org/10.1016/s1568-9883\(02\)00046-x](https://doi.org/10.1016/s1568-9883(02)00046-x)
7. Humpage, A. R. et al. (2010). Comparison of analytical tools and biological assays for detection of paralytic shellfish poisoning toxins. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 397(5), 1655–1671. <https://doi.org/10.1007/s00216-010-3459-4>
8. Sylvers, P. H., & Gobler, C. J. (2021). Mitigation of harmful algal blooms caused by *Alexandrium catenella* and reduction in saxitoxin accumulation in bivalves using cultivable seaweeds. *Harmful Algae*, 105, 102056. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.102056>

E. coli

(*Escherichia coli*)



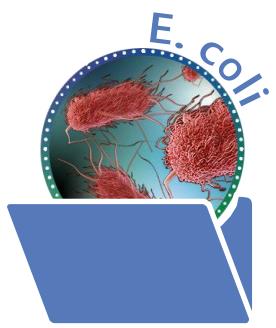
Gert Hansen, sous licence CC BY-NC-SA 4.0

Escherichia coli (ou *E. coli* en abrégé) est une bactérie que l'on trouve couramment dans le tractus gastro-intestinal (intestin) des humains et des animaux. Elle facilite généralement la digestion et protège contre d'autres microbes nuisibles. Cependant, certaines souches peuvent être pathogènes et provoquer diverses maladies chez l'humain. Outre l'importance d'*E. coli* pour la santé intestinale, cette bactérie nous permet également de déterminer si un habitat ou une source d'eau est contaminé par des matières fécales, ce qui constitue un problème majeur de santé publique ([réf. 1](#)).

Il existe de nombreux types d'*E.coli*, que les scientifiques appellent « souches ». Les souches sont des groupes d'organismes appartenant à la même espèce, mais qui se distinguent les uns des autres par leur génétique, leur structure et leur comportement. En général, les souches d'*E. coli* sont divisées en deux grandes catégories en fonction de leur potentiel pathogène pour l'humain.

***E. coli* non pathogène** : comprend les souches d'*E. coli* qui vivent principalement dans l'intestin humain sans causer de dommages. Ces bactéries peuvent même être bénéfiques, car certaines souches facilitent la digestion des aliments, la protection contre les infections et contribuent également à la production des vitamines K et B12 ([réf. 2](#)). En retour, les humains fournissent à ces bactéries un habitat où elles peuvent se développer et se multiplier.

***E. coli* pathogène** : comprend les souches bactériennes qui peuvent provoquer des maladies chez l'humain. Dans la plupart des cas, les souches pathogènes d'*E. coli* possèdent le même ensemble de gènes que les souches non pathogènes, mais elles possèdent en plus quelques gènes supplémentaires qui contiennent les informations nécessaires à la production de composants moléculaires qui les rendent nocives. La plupart de ces souches pathogènes sont adaptées à la vie dans l'intestin humain, mais d'autres se sont dotées de gènes qui peuvent également causer des dommages si elles se développent dans d'autres parties du corps, telles que les voies urinaires. Il est essentiel d'adopter de bonnes pratiques d'hygiène, comme se laver les mains régulièrement et bien cuire la viande, afin de prévenir la propagation des *E. coli* pathogènes.



Écologie

Bien qu'*E. coli* soit adaptée pour se développer dans l'intestin de son hôte, elle est capable de survivre et de s'adapter aux conditions variables et souvent difficiles de l'environnement extérieur, telles que le sol, l'eau, les plantes et les aliments. Ces conditions peuvent inclure des fluctuations de l'alimentation, de la température, de l'oxygène, de l'humidité, du pH et la présence d'autres micro-organismes. En conséquence, le cycle de vie d'*E. coli* comprend deux phases : une phase à l'intérieur de l'hôte et une phase à l'extérieur.

E. coli dans l'intestin humain et animal

La population d'*E. coli* dans l'intestin est une entité dynamique et en constante évolution, influencée par les interactions avec d'autres microbes et le système immunitaire de l'hôte.

Il a été démontré que les *E. coli* non pathogènes bénéficient d'une classe d'anticorps, les immunoglobulines A, qui sont sécrétées dans l'intestin humain. Ces anticorps seraient susceptibles de stimuler la formation d'un biofilm par *E. coli*, permettant ainsi aux bactéries de se fixer facilement à la paroi intestinale et de la coloniser, tout en produisant une matrice polymère protectrice composée de polysaccharides et d'autres biomolécules. *E. coli* produit à son tour des vitamines bénéfiques pour l'humain et contrôle les agents pathogènes nocifs. Cette relation mutualiste profite à la fois à *E. coli* et à l'humain (hôte).

Toutefois, si l'hôte est confronté à des souches pathogènes d'*E. coli*, le profil de la population d'*E. coli* dans l'intestin peut rapidement changer. Une fois ingérée par l'hôte via de l'eau ou des aliments contaminés, *E. coli* s'adapte aux conditions très acides de l'estomac en produisant des protéines spécifiques qui aident à neutraliser l'acide, régulant ainsi son pH. Après avoir traversé l'estomac et l'intestin grêle, *E. coli* atteint le côlon, la partie la plus longue du gros intestin, où elle entre en compétition avec d'autres micro-organismes pour obtenir les nutriments nécessaires à sa croissance et à sa multiplication. Une fois établie dans le côlon, *E. coli* réside dans la couche muqueuse

du côlon, qui se compose principalement de glycoprotéines et fournit un milieu riche en nutriments avec des sites d'adhérence auxquels *E. coli* peut se fixer grâce à ses pili, des appendices ressemblant à des poils situés à la surface cellulaire de la bactérie. Cette fixation facilite la colonisation du côlon par *E. coli*. Après avoir séjourné dans le côlon, certaines cellules sont finalement éliminées et rejetées dans l'environnement extérieur par les selles de l'hôte (réf. 3).

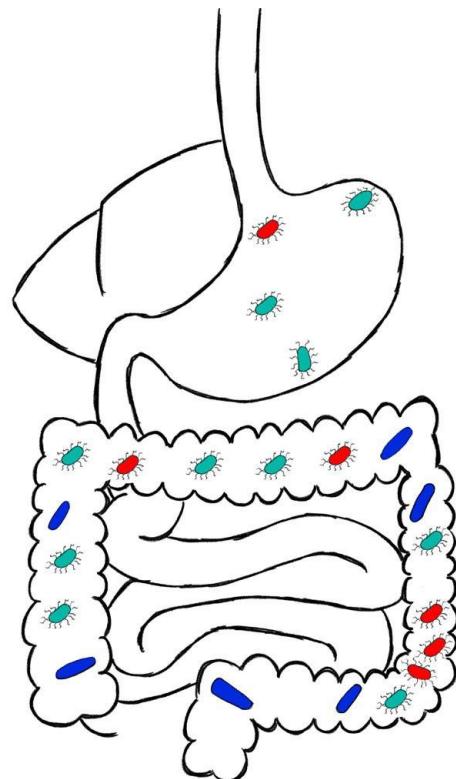
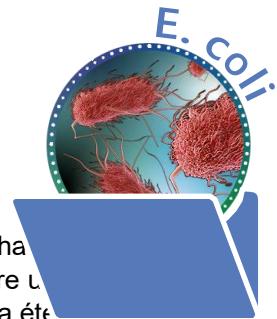


Figure 1 : Les *E. coli* non pathogènes peuplent l'intestin humain.

Les *E. coli* non pathogènes (en vert) vivent dans l'intestin humain comme les autres membres de ce que l'on appelle le microbiome intestinal humain (en bleu) et sont bénéfiques pour l'humain, par exemple en le protégeant contre les bactéries nocives. Cependant, une fois que les *E. coli* pathogènes (en rouge) sont ingérées et atteignent le côlon, elles peuvent s'y installer et provoquer des maladies.



E. coli dans l'environnement

Principalement présent dans le tractus gastro-intestinal des animaux à sang chaud comme les humains, la présence d'*E. coli* dans l'environnement extérieur peut être un indicateur de pollution fécale récente dans cette zone spécifique. En effet, *E. coli* a été utilisé comme indicateur microbien de la pollution fécale afin d'évaluer l'assainissement de l'eau. Il s'agit d'une pratique importante étant donné que la contamination de l'eau par les eaux usées est un problème majeur de santé publique et que 88 % des décès liés à la diarrhée dans les pays en développement sont attribués à un mauvais assainissement et à une mauvaise hygiène de l'approvisionnement en eau (réf. 4).

Pour éviter la contamination de l'environnement par *E. coli* et d'autres micro-organismes nuisibles, les eaux usées sont traitées dans des stations d'épuration. Après traitement, les effluents sont rejetés dans l'environnement, ce qui empêche la pollution des cours d'eau par des eaux usées brutes. En outre, les tests de diagnostic peuvent détecter tous les types d'*E. coli*, y compris les souches bénéfiques et nuisibles, et peuvent avertir les experts en sécurité alimentaire d'une contamination potentielle avant la consommation. Un résultat positif au test peut indiquer des conditions insalubres, même si seule une *E. coli* non pathogène est détectée. Si elle est ingérée par un hôte, le cycle d'*E. coli* à l'intérieur de l'hôte commence.

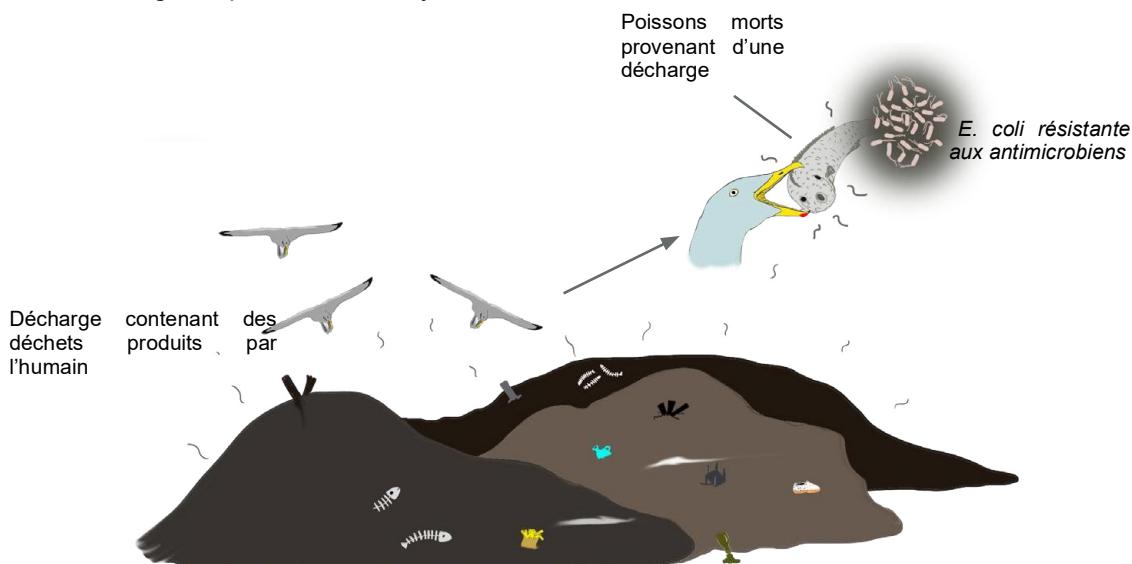
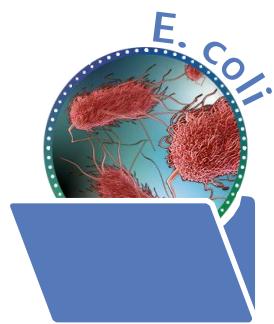


Figure 2 : La résistance aux antimicrobiens peut se transmettre des humains aux animaux sauvages et aux bactéries.
Les oiseaux sauvages comme les mouettes se nourrissent de déchets produits par l'humain qui peuvent être contaminés par des bactéries telles que *E. coli*. Cela peut entraîner l'ingestion d'*E. coli* résistante aux antimicrobiens, qui est ensuite transmise à d'autres animaux sauvages, facilitant ainsi la propagation des gènes de résistance aux antimicrobiens dans les populations bactériennes sauvages.

E. coli peut également se propager dans le milieu marin par l'intermédiaire d'oiseaux sauvages comme les mouettes, qui nichent et chassent fréquemment à proximité des sites peuplés par l'humain. La propagation de la bactérie *E. coli* depuis les sols contaminés par l'activité humaine vers les eaux marines peut favoriser la propagation des gènes de résistance aux antibiotiques portés par *E. coli* vers d'autres espèces microbiennes qui ne sont pas en contact direct avec l'humain. Les habitats bactériens présents sur les sites liés à l'activité clinique humaine, au bétail domestique ou aux décharges peuvent servir de réservoir pour le développement de la résistance aux antimicrobiens. La proximité de ces habitats expose les oiseaux sauvages à des souches d'*E. coli* résistantes aux antimicrobiens (RAM) qui se développent dans ces environnements. Une fois infectées par ces souches RAM, les mouettes peuvent les transporter dans la nature et les rejeter avec leurs excréments. Cela entraîne à son tour la propagation des bactéries RAM et des gènes de résistance aux antimicrobiens dans les populations bactériennes sauvages (réf. 5).



Métabolisme

E. coli est classée comme une bactérie anaérobiose facultative, ce qui signifie qu'elle peut survivre et se développer en présence ou en l'absence d'oxygène. En présence d'oxygène, *E. coli* l'utilise pour effectuer la respiration et générer de l'énergie. Dans les environnements à faible teneur en oxygène, *E. coli* utilise d'autres accepteurs d'électrons pour poursuivre ses processus métaboliques et sa production d'énergie. En outre, en l'absence d'oxygène et d'accepteurs d'électrons alternatifs, *E. coli* peut toujours effectuer ses processus métaboliques par fermentation. De plus, *E. coli* est un organisme chimio-hétérotrophe qui dépend des composés organiques pour son énergie et son carbone.

Dans la recherche

Culture d'*E. coli* en laboratoire

- *E. coli* ne préfère ni le chaud ni le froid. Cette bactérie intestinale se développe à la température corporelle idéale de 37,4 °C, qui est également une température pratique pour les scientifiques qui travaillent en laboratoire.
- *E. coli* peut se développer aussi bien en présence qu'en l'absence d'oxygène. Dans l'intestin, *E. coli* se développe en anaérobiose (en l'absence d'oxygène). Cependant, contrairement à d'autres types de bactéries anaérobies, *E. coli* se développe également bien dans des environnements aérobies, tels que les flacons de culture en laboratoire.
- Peu exigeante, *E. coli* tire son énergie de diverses sources. Elle se nourrit des aliments digérés dans son environnement naturel, l'intestin. En laboratoire, *E. coli* peut être nourrie facilement et à moindre coût avec une large variété de sources de carbone sur milieu solide ou liquide
– pensez à une soupe au poulet pour bactéries.
- *E. coli* se développe rapidement. En seulement 20 minutes, une seule cellule d'*E. coli* peut se diviser en deux, ce qui donne un million de cellules d'*E. coli* en sept heures. Cette croissance rapide rend les expériences avec *E. coli* rapides, rentables et pratiques, ce qui fait de cette bactérie un excellent outil pour synthétiser des protéines et d'autres produits liés à sa croissance.

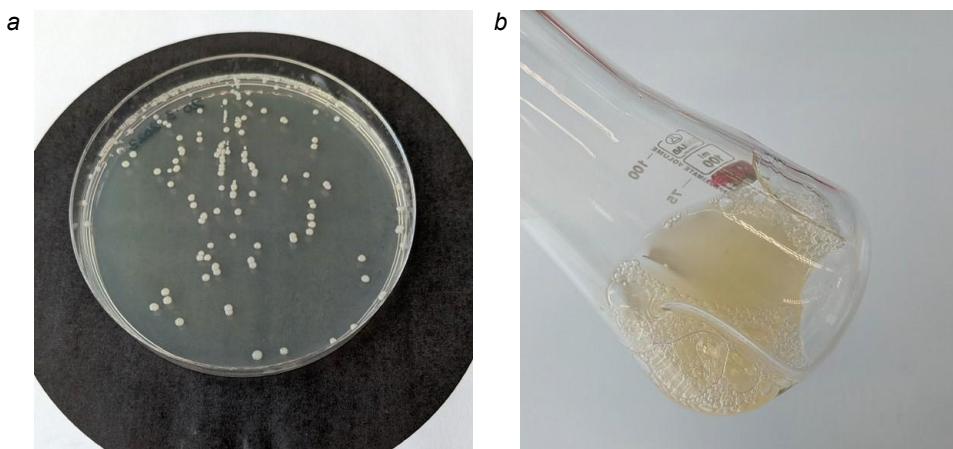
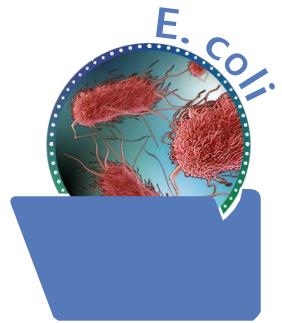


Figure 3 : *E. coli* peut être cultivée sur/dans différents milieux.

a : *E. coli* cultivée sur un milieu solide dans une boîte de Pétri ; b : *E. coli* cultivée en milieu liquide dans un flacon.

Ressource :

Vidéo montrant la croissance d'une colonie d'*E. coli* sur une lame de microscope : https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/40/E._coli-colony-growth.gif; Stewart EJ, Madden R, Paul G, Taddei F (2005) ; sous licence CC BY-SA 4.0



Génomique et protéomique

E. coli a été l'un des premiers organismes dont le génome (c'est-à-dire l'ensemble des gènes) a été séquencé. Le génome d'*E. coli* est constitué d'une molécule d'ADN contenant environ 4 400 gènes (réf. 6). Si elle était étirée, cette molécule d'ADN mesurerait environ 1 millimètre de long. Cependant, une bactérie *E. coli* typique ne mesure que 3 microns de long (soit 3 millièmes de millimètre). Pour tenir dans la cellule, l'ADN est donc fortement enroulé et organisé en un chromosome circulaire qui contient des milliers de gènes. Grâce à la séquence génomique connue, les scientifiques peuvent prédire la fonction des protéines codées par celle-ci.

E. coli est le premier choix pour le clonage moléculaire

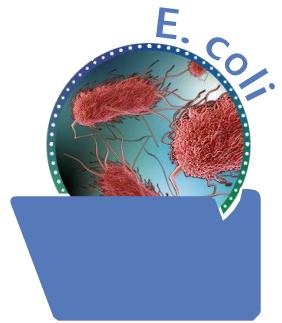
Depuis le développement du **clonage moléculaire**, les scientifiques utilisent *E. coli* comme hôte pour introduire de nouvelles séquences d'ADN dans le génome bactérien afin de produire des protéines d'intérêt qui peuvent ensuite être purifiées et caractérisées. Cela aide les chercheurs à mieux comprendre la fonction et la régulation des protéines dans *E. coli*, ce qui peut avoir des implications positives pour la biotechnologie, la médecine et les sciences de l'environnement.

Le rôle d'*E. coli* dans la biotechnologie

E. coli a également joué un rôle central dans le lancement de l'**ère de la biotechnologie** en servant d'usine génétique polyvalente pour la production de nombreux composés biologiques que nous utilisons quotidiennement. Dès lors, *E. coli* est utilisé pour produire divers composés utiles tels que l'hormone insuline. Avant l'avènement du génie génétique, l'insuline était obtenue à partir de porcs ou de vaches, ce qui était à la fois coûteux et limité en termes d'approvisionnement. En modifiant génétiquement *E. coli* pour produire de l'insuline humaine, les scientifiques ont pu produire cette hormone en grande quantité à un coût bien moindre. Dans l'ensemble, la capacité d'*E. coli* à être génétiquement manipulée et utilisée comme usine de production a conduit à de nombreuses avancées significatives dans le domaine de la biotechnologie, allant de la production de médicaments vitaux à la création de produits respectueux de l'environnement.

Le fait que la séquence d'ADN d'*E. coli* ait été connue très tôt et que cette bactérie soit facilement accessible et manipulable a fait d'*E. coli* l'un des organismes les plus importants utilisés par les chercheurs. En conséquence, plusieurs prix Nobel ont été décernés pour des recherches dans lesquelles *E. coli* a joué un rôle fondamental. En voici une liste non exhaustive (réf. 7) :

- Les bactéries peuvent se reproduire et échanger des gènes (prix Nobel en 1958)
- Synthèse biologique de l'ARN et de l'ADN (prix Nobel en 1959)
- Régulation génétique par les protéines (prix Nobel en 1965)
- Le code génétique et son rôle dans la synthèse des protéines (Prix Nobel en 1968)
- Les enzymes de restriction et leur application (Prix Nobel en 1978)
- Découverte de la protéine fluorescente verte (Prix Nobel en 2008)
- Études visant à comprendre la réparation de l'ADN (prix Nobel en 2015)
- Développement du système CRISPR/Cas pour l'édition génomique (Prix Nobel en 2020)



Glossaire

Biofilm (bactérien) : Différentes espèces bactériennes peuvent cohabiter, générant une matrice de substances polymères qui aide la communauté à se développer et à adhérer aux surfaces.

Fermentation : Voie anaérobie permettant de décomposer des molécules organiques en composés plus simples afin de produire des substances pouvant être utilisées pour fabriquer de l'énergie chimique.

L'énergie chimique, généralement sous forme d'ATP (adénosine triphosphate), est importante car elle alimente divers processus biologiques.

Chimio-hétérotrophe : Organisme qui tire son énergie de substances chimiques et qui a besoin de consommer d'autres organismes pour vivre.

Clonage moléculaire : Cette technique de laboratoire est utilisée pour produire plusieurs copies d'une séquence d'ADN spécifique. Ce processus consiste à couper l'ADN à des endroits précis à l'aide d'enzymes appelées endonucléases de restriction, puis à coller le fragment d'ADN d'intérêt obtenu dans un vecteur, qui est généralement un plasmide ou une molécule d'ADN viral. L'ADN recombinant qui en résulte peut ensuite être introduit dans un organisme hôte, tel que *E. coli*, où il peut être répliqué et exprimé.

Ère de la biotechnologie : Désigne la période d'avancées technologiques et de découvertes scientifiques significatives dans le domaine de la biologie, qui a débuté dans les années 1970 et se poursuit aujourd'hui. Elle consiste à utiliser des systèmes biologiques, tels que des cellules vivantes et des micro-organismes, pour créer de nouveaux produits et résoudre des problèmes concrets.

Références

1. Kaper, J. B., Nataro, J. P., & Mobley, H. L. T. (2004). Pathogenic *Escherichia coli*. *Nature Reviews Microbiology*, 2(2), 123–140. <https://doi.org/10.1038/nrmicro818>
2. American Society for Microbiology. (2011). FAQ: *E. coli*: Good, Bad, & Deadly. NCBI Bookshelf. <https://doi.org/10.1128/AAMCol.1-2011>
3. Yu, D., Banting, G. S., & Neumann, N. F. (2021). A review of the taxonomy, genetics, and biology of the genus *Escherichia* and the type species *Escherichia coli*. *Canadian Journal of Microbiology*, 67(8), 553–571. <https://doi.org/10.1139/cjm-2020-0508>
4. Rochelle-Newall, E., Nguyen, T. H. O., Le, T. P. Q., Sengtaheuanghoun, O., & Ribolzi, O. (2015). A short review of fecal indicator bacteria in tropical aquatic ecosystems: knowledge gaps and future directions. *Frontiers in Microbiology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.00308>
5. Ahlstrom, C., Bonnedahl, J., Woksepp, H., Hernandez, J. A., Reed, J. C., Tibbitts, L., Olsen, B., Douglas, D. C., & Ramey, A. M. (2019). Satellite tracking of gulls and genomic characterization of faecal bacteria reveals environmentally mediated acquisition and dispersal of antimicrobial resistant *Escherichia coli* on the Kenai Peninsula, Alaska. *Molecular Ecology*, 28(10), 2531–2545. <https://doi.org/10.1111/mec.15101>
6. Serres, M. H. et al. (2001). A functional update of the *Escherichia coli* K-12 genome. *Genome Biology*, 2(9), research0035.1–research0035.7. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC56896/>
7. Tankeshwar, A. (2013, May 4). *E. coli*: Only bacterium that wins records number of Nobel Prizes • Microbe Online. <https://microbeonline.com/e-coli-only-bacteria-that-wins-record-number-of-nobel-prizes/>

Platynereis

(*Platynereis dumerilii*)



Platynereis dumerilii (*P. dumerilii*) est un annélide, un ver segmenté. Ce ver vit dans les eaux marines côtières, les océans tempérés et tropicaux. Sa durée de vie est d'environ sept mois, au terme desquels il se reproduit et meurt. Plus précisément lors de la nouvelle lune, lorsque la surface de l'eau est la moins éclairée, les vers nagent vers la surface de l'océan et se reproduisent en libérant des ovules et des spermatozoïdes dans l'eau ; ils meurent ensuite. Le fait de nager vers la surface lors de la nouvelle lune, lorsque la lumière de la lune est la plus faible, empêche ces vers d'être repérés et capturés par des prédateurs pendant l'accouplement. Ce comportement, synchronisé avec les phases de la lune, est essentiel pour que les zooplanctons tels que *P. dumerilii* puissent accomplir leur cycle de vie et donner naissance à la génération suivante.

En raison de ses nombreuses caractéristiques biologiques intéressantes, *P. dumerilii* fait l'objet de recherches dans de nombreux domaines tels que la biologie du développement, l'évolution, la neurobiologie et l'écologie.

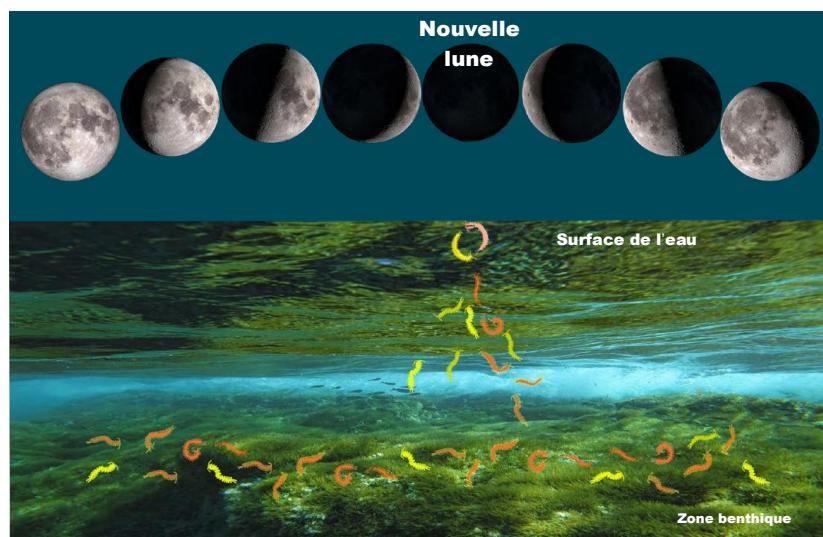


Figure 1 : Lors de la nouvelle lune, *Platynereis* nage à la surface de l'eau pour se reproduire.
Platynereis vit au fond de l'océan dans les régions côtières, mais lors de la nouvelle lune, lorsque la lumière est la plus faible, les vers adultes nagent vers la surface pour se reproduire.
 Images : Phases de la lune à partir de la bibliothèque d'images et de vidéos de la NASA ; Océan : Silvana Galliovia sous licence Wikimedia commons (CC BY-SA 4.0)



Écologie

P. dumerilii se trouve dans les mers européennes, l'Atlantique Nord, la mer Rouge, l'océan Indien, le Pacifique et le long de la côte sud-ouest de l'Afrique.



Figure 2 : Les *Platynereis* vivent dans des tubes muqueux.

Image : Kuehn E et al. (réf. 8).

P. dumerilii est abondant dans les habitats peu profonds et végétalisés, tant sur les fonds durs recouverts de macroalgues que dans les herbiers de Posidones. Il vit dans les tubes muqueux qu'il sécrète et construit en incorporant de minuscules fragments d'algues provenant de l'environnement au cours de son stade adulte prématûre. Les juvéniles et les adultes prématûres de *P. dumerilii* sortent de leurs tubes principalement la nuit pour chasser leur nourriture. La construction du tube à partir d'algues est connue sous le nom de « jardinage », un comportement qui semble réduire le risque de prédation. *P. dumerilii* se nourrit ainsi d'organismes tels que les Posidones *Posidonia oceanica*, des microalgues

(diatomées benthiques), des macroalgues, des amoebae cuirassées (**Foraminifères**), et des algues unicellulaires (**Coccolithophores**) collectées près de l'entrée du tube ou sur les fonds marins environnants (réf. 1).



Saviez-vous que, lorsqu'ils grignotent les algues, ces vers laissent des marques en forme de demi-lune sur les bords des feuilles ? (réf. 1)

Les larves de *Platynereis* et les vers adultes servent de nourriture à de nombreux organismes. Par exemple, les larves de *Platynereis* sont chassées par le crustacé prédateur *Centropages typicus*. Parmi les autres organismes qui se nourrissent de *P. dumerilii* figurent l'escargot de mer *Conus chaldaeus*, le poisson-lime frangé *Monacanthus ciliatus* et le poisson-lime à tête plate *Stephanolepis hispidus* (réf. 2, réf. 3).

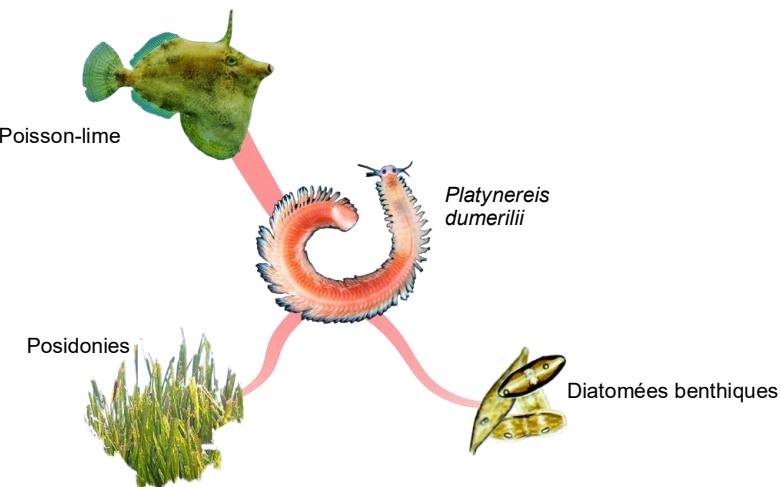


Figure 3 : Chaîne alimentaire impliquant les *Platynereis*.

Les *Platynereis* se nourrissent d'herbes marines et de diatomées et sont à leur tour mangés, par exemple, par les poissons-limes.
Images : Posidonies : Frédéric Ducarme (CC-BY-SA 4.0) ; Poisson-lime : SEFSC Pascagoula Laboratory ; Collection de Brandi Noble, NOAA/NMFS/SEFSC, (CC BY 2.0) ; Diatomées benthiques : Dick via flickr (CC BY-NC-SA 2.0) ; *Platynereis dumerilii* : © Eric Roettinger / Kahli Kai Images



En tant qu'organisme aquatique, *P. dumerilii* peut s'adapter à des conditions environnementales changeantes, telles que différents niveaux de pH, et tolérer le faible pH de l'eau de mer (acidification). Par conséquent, *P. dumerilii* est un organisme modèle idéal pour comprendre l'adaptation des organismes aux facteurs de stress climatique tels que l'acidification. D'autres facteurs environnementaux, tels que l'intensité lumineuse, la salinité de l'eau, la température et même la présence de produits chimiques dans l'eau ont une incidence sur *P. dumerilii*. Il existe des preuves que ces facteurs guident l'ensemble du développement des *Platynereis* et influencent même leur trajectoire de nage (réf. 4, réf. 5).

Reproduction

Les *Platynereis* sexuellement matures présentent des différences comportementales et morphologiques radicales par rapport aux vers juvéniles. Par exemple, pendant la maturation, les yeux des vers grossissent considérablement et leur musculature se modifie profondément. Ces changements corporels permettent aux vers juvéniles, auparavant benthiques, de nager rapidement, ce qui leur assure la danse nuptiale nécessaire à la reproduction sexuée (réf. 5, réf. 6).

De plus, les vers cessent de s'alimenter à mesure qu'ils atteignent leur maturité sexuelle, ce qui entraîne un recul du développement de leur intestin, qui finit par cesser de fonctionner et se dégénère. Ensuite, le tronc de l'animal se transforme progressivement en une « poche » remplie de gamètes, visible à travers la paroi corporelle, et perd sa pigmentation. À ce stade, le corps des femelles matures devient jaune en raison de la couleur des ovocytes, tandis que celui des mâles matures devient blanc près de la tête en raison de la couleur du sperme.

P. dumerilii suit un rythme de reproduction synchronisé avec les phases lunaires, ce qui lui garantit des conditions environnementales favorables et maximise ses chances de trouver des partenaires matures tout en évitant les prédateurs grâce à la faible luminosité lors de la nouvelle lune (réf. 7).

La reproduction de *P. dumerilii* a été observée de la fin du printemps à la fin de l'automne. Ces vers, qui vivent habituellement dans le sol, remontent à la surface de la mer à la nouvelle lune pour effectuer une danse nuptiale qui culmine avec la libération des œufs et du sperme dans l'eau pour une fécondation externe (voir également la Figure 1). Comme les vers ne sont pas dotés d'ouverture externe pour libérer leurs cellules sexuelles, leur corps éclate lorsque celles-ci sont libérées dans l'eau, et les animaux meurent après le processus. Par conséquent, ces vers, qui vivent en moyenne sept mois, ne se reproduisent qu'une seule fois. Outre le clair de lune, les conditions météorologiques et la libération de phéromones sexuelles sont deux autres facteurs qui influencent le comportement reproducteur des vers, notamment leur danse nuptiale et la libération des gamètes (réf. 5, réf. 6).



Figure 4 : *Platynereis dumerilii* adulte.
a : ver femelle mature rempli d'œufs ; b : ver mâle avec spermatozoïdes

Images : Martin Gühmann, obtenues via Wikimedia commons, sous licence CC BY-SA 4.0



Échantillonnage

Pour étudier *P. dumerilii* en laboratoire, des échantillons de vers à différents stades de développement sont collectés de différentes manières.



Figure 5 : Collecte d'échantillons d'eau de mer au large de Naples.

Pour étudier la présence de *P. dumerilii* et de *P. massiliensis* dans les environnements acides, les scientifiques de l'EMBL ont prélevé des échantillons dans les événements de CO₂ de l'île volcanique d'Ischia, près de Naples, en Italie, la nuit, à l'aide d'un bateau pneumatique équipé de filets à longues mains et d'une forte lumière pour attirer les vers.

Image : Crédit : Patrick Mueller/EMBL

Les *Platynereis* juvéniles sont collectés en plongée libre ou en plongée sous-marine afin de récolter les macroalgues colonisées par *P. dumerilii*. Ensuite, les vers identifiés visuellement comme appartenant à l'espèce *P. dumerilii* grâce à leur comportement de nage caractéristique sont délicatement prélevés à l'aide d'une pipette et placés dans des boîtes de Pétri pour une analyse plus approfondie.

Conformément au cycle lunaire, les vers adultes matures sont collectés la nuit lorsqu'ils quittent leur habitat benthique et se rapprochent de la surface de l'océan pour se reproduire. Ils sont attirés par une source lumineuse intense et capturés à l'aide d'un filet fin à longs bras depuis des canots pneumatiques. Les vers peuvent ensuite être maintenus vivants après leur collecte dans des conditions contrôlées en laboratoire afin d'étudier leurs caractéristiques reproductive. Toutefois, s'ils doivent être analysés, par exemple

à des fins génétiques, les spécimens sont immédiatement (sur le bateau) transférés dans une solution qui les stabilise et les protège. Ils peuvent ensuite être conservés à -20 °C avant d'être soumis à des analyses génétiques.

Le cycle de vie de ce ver marin étant bien connu, de son alimentation à sa reproduction, *Platynereis dumerilii* peut être élevé en laboratoire, ce qui permet aux scientifiques de se passer de la collecte d'échantillons dans la nature. La plupart des laboratoires conservent *P. dumerilii* dans des pièces séparées à une température de 18 °C et contrôlent l'éclairage pour simuler les conditions diurnes, nocturnes et lunaires. C'est pourquoi *P. dumerilii* est activement étudié par la communauté scientifique (réf. 8).



Figure 6 : *Platynereis* élevés en laboratoire.

Image du laboratoire de Detlev Arendt à l'EMBL où les vers *Platynereis* sont conservés et cultivés. Comme les mâles et les femelles ne se distinguent qu'après la maturation sexuelle, une troisième case marquée « ? » contient des individus des deux sexes qui n'ont pas encore achevé leur maturation sexuelle et ne sont donc pas encore distinguables.

Image : Crédit : EMBL



Dans la recherche

Les recherches sur *Platynereis* suggèrent que les gènes et les types cellulaires de ce ver sont évolutivement ancestraux, et donc représentatifs des types cellulaires présents chez leurs ancêtres bilatériens. De plus, la formation du système nerveux central du ver présente de nombreuses similitudes avec les événements moléculaires qui se déroulent pendant le développement du système nerveux des vertébrés (réf. 9). Au niveau cellulaire, *Platynereis* possède plusieurs types de cellules qui partagent une ascendance commune avec des types de cellules présentes chez d'autres vertébrés et invertébrés. Les organismes multicellulaires ayant différents types de cellules, il est intéressant de comprendre quels sont les gènes exprimés dans les différentes cellules qui définissent les caractéristiques individuelles d'un type de cellule spécifique (réf. 10). Par conséquent, *Platynereis* est un organisme modèle idéal pour étudier les questions liées à la génétique, au développement et à l'évolution des organismes (réf. 5). Grâce à sa reproduction facile à contrôler en laboratoire, il est possible d'obtenir un grand nombre de larves de *Platynereis* qui se trouvent au même stade de développement et qui présentent des caractéristiques uniformes pouvant être utilisées pour des expériences plus approfondies. À l'aide d'une technique de **microscopie électronique (ME)**, les chercheurs de l'EMBL ont pu obtenir des images haute résolution des larves, ce qui leur a permis de caractériser la morphologie de toutes les cellules présentes dans le corps. En combinant ces données avec celles issues d'expériences de transcriptomique unicellulaire, les scientifiques ont créé un atlas cellulaire qui leur permet d'explorer le lien entre l'expression génique spécifique à un type de cellule et la morphologie (réf. 10).

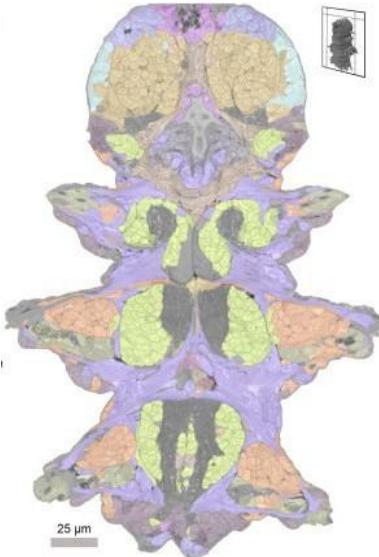


Figure 7 : Amas d'expression génétique cartographiés sur une image au microscope électronique d'une larve de *Platynereis*. Les scientifiques de l'EMBL ont pris des images au microscope électronique de larves de *Platynereis*, ont défini toutes les cellules individuelles dans les images à l'aide de l'intelligence artificielle et ont examiné l'expression génétique dans chaque cellule. Ils ont ensuite regroupé les cellules présentant des schémas d'expression génétique similaires en « amas », leur ont attribué différentes couleurs et les ont projetées sur l'image au microscope électronique. Cela a montré que les cellules présentant des schémas d'expression génétique similaires se regroupent dans des zones morphologiquement similaires et représentent des structures telles que des muscles ou des cellules du système nerveux. Image : Crédit : Tiré de Vergara et al. (réf. 10) (CC BY 4.0)

Retracer le développement d'un organisme entier dans le contexte de l'expression de ses gènes et de la croissance de chacune de ses cellules pourrait fournir des indices sur ses adaptations spécifiques à certains défis environnementaux.



Glossaire

Annélide : Un phylum de vers segmentés invertébrés.

Zooplancton : Organismes microscopiques transportés par les courants, incapables de nager à contre-courant et qui ne réalisent pas de photosynthèse.

Macroalgues : Communément appelées algues marines, elles comprennent des milliers d'espèces d'algues marines macroscopiques et multicellulaires dont la taille, la couleur et la forme varient considérablement. Elles peuvent être identifiées et observées à l'œil nu. On les trouve dans les profondeurs des fonds marins ou fixées à des rochers, des coquillages, des coques de bateaux ou des récifs naturels. Les macroalgues tirent toutes leurs nutriments de l'eau qui les entoure et s'en imprègnent pour s'hydrater.

Benthique : Terme désignant le fond d'une étendue d'eau.

Diatomées : Microalgues présentes dans presque tous les écosystèmes aquatiques tant que la lumière est disponible pour la photosynthèse. Ces eucaryotes unicellulaires jouent un rôle important dans la transformation de nombreux nutriments inorganiques en formes organiques.

Foraminifères : Protistes unicellulaires ressemblant à des amibes. Ils sont également appelés « amibes cuirassées » parce qu'ils sécrètent une minuscule coquille. Les foraminifères sont présents dans tous les environnements marins et peuvent avoir un mode de vie planctonique ou benthique.

Coccolithophores : Algues unicellulaires qui vivent en grand nombre dans les couches supérieures de l'océan. Elles s'entourent de minuscules plaquettes, souvent en forme de disque, appelées coccolithes, qui sont constituées de carbonate (calcite). Ils jouent un rôle important dans le cycle du carbone marin car ils sont considérés comme les organismes calcifiants les plus productifs de la planète.

Bilatériens : Lignée évolutive d'animaux bilatéraux présentant un seul plan de symétrie, qui comprend les vertébrés, les insectes et les annélides.

Microscopie électronique (ME) : Technique permettant d'obtenir des images haute résolution de spécimens biologiques et non biologiques. Elle est utilisée dans la recherche biomédicale pour étudier la structure détaillée des tissus, des cellules, des organites et des complexes macromoléculaires.

Transcriptomique unicellulaire : Examine le niveau d'expression génétique de cellules individuelles dans une population donnée en mesurant simultanément la concentration en ARN (de manière conventionnelle uniquement l'ARN messager (ARNm)) de centaines à des milliers de gènes.



Références

1. Gambi M. et al. (2000). Feeding ecology of *Platynereis dumerilii* (audouin & milne-edwards) in the seagrass *Posidonia oceanica* system: The role of the epiphytic flora (Polychaeta, nereididae), *Ophelia*, 53(3):189-202. <https://doi.org/10.1080/00785326.2000.10409449>
2. Bezares-Calderón L. et al.(2018). Neural circuitry of a polycystin-mediated hydrodynamic startle response for predator avoidance. *eLife* 7:e36262. <https://elifesciences.org/articles/36262>
3. Organisms Preying on *Platynereis dumerilii*. <https://www.sealifebase.ca/TrophicEco/PredatorList.php?id=39810&genusname=Platynereis&speciesname=dumerilii&lang=english>
4. Lucey N. et al. (2015). To brood or not to brood: Are marine invertebrates that protect their offspring more resilient to ocean acidification?. *Scientific Reports* 5(12009). <https://www.nature.com/articles/srep12009#rightslink>
5. Özpolat B. et al. (2021). The Nereid on the rise: *Platynereis* as a model system. *EvoDevo* 12(10). <https://evodevojournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13227-021-00180-3>
6. A slightly different worm - *Platynereis dumerilii*. BIOPRO Baden-Württemberg GmbH. 2009. <https://www.gesundheitsindustrie-bw.de/en/article/news/a-slightly-different-worm-platynereis-dumerilii>
7. Zantke J. et al. (2013). Circadian and Circalunar Clock Interactions in a Marine Annelid. *Cell Reports* 5(1). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221124713004725?via%3Dihub>
8. Kuehn E. et al. (2019) A scalable culturing system for the marine annelid *Platynereis dumerilii*. *PLoS ONE* 14(12): e0226156. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0226156>
9. Zantke J. et al. (2014). Genetic and genomic tools for the marine annelid *Platynereis dumerilii*. *Genetics* 197(1):19-31. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4012478/>
10. Vergara H.M. et al. (2021). Whole-body integration of gene expression and single-cell morphology. *Cell* 184(18). [https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(21\)00876-X?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS009286742100876X%3Fshowall%3Dtrue#bib4](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(21)00876-X?_returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS009286742100876X%3Fshowall%3Dtrue#bib4)

Nitrososphaera



Les *Nitrososphaera* appartiennent à un groupe d'archées présentes dans des environnements allant des habitats marins et du sol à la peau humaine. Découvertes initialement dans les milieux marins, on sait aujourd'hui que les membres du genre *Nitrososphaera* vivent en symbiose avec divers organismes, notamment des éponges marines, des plantes et des êtres humains. Les archées de ce genre participent à la nitrification et à l'élimination des déchets ammoniacaux du sol, deux processus essentiels à la croissance des plantes. Les *Nitrososphaera* peuvent également être associées à la santé de la peau ([réf. 1](#), [réf. 2](#)).

Écologie

Les *Nitrososphaera* peuvent vivre dans des conditions environnementales très variées et prospèrent même dans des conditions intolérables pour d'autres organismes, comme les sources chaudes. Par exemple, des études menées sur les sols acides et volcaniques des sites végétalisés du volcan Llaima au Chili ont révélé la présence d'archées *Nitrososphaera* qui jouent un rôle essentiel dans la nitrification des sols volcaniques pour les plantes ([réf. 3](#)).

On trouve également des *Nitrososphaera* dans les sites agricoles où l'abondance de ces organismes est corrélée à des niveaux d'ammoniac plus élevés. Ces archées utilisent les engrains ammoniacaux comme source d'énergie et, ce faisant, contribuent à produire d'autres composés azotés que les plantes peuvent utiliser pour croître et se développer ([réf. 4](#)).

Bien qu'initialement associés aux habitats terrestres et marins, les membres du genre *Nitrososphaera* sont également présents sur la peau humaine et même dans les salles blanches de la NASA. Les salles blanches sont des espaces où les objets destinés à l'exploration extraterrestre sont débarrassés de tout microbe terrestre afin d'éviter la contamination de destinations extraterrestres telles que Mars par des microbes terrestres, en particulier des organismes extrémophiles comme les archées, qui peuvent potentiellement se développer dans les conditions martiennes. La présence de ces archées dans des espaces aussi propres pourrait être due à une contamination par des archées vivant sur la peau humaine ([réf. 5](#)).

Les *Nitrososphaera* sont des organismes chimioautotrophes qui produisent leur nourriture en convertissant l'énergie chimique disponible sous forme de CO₂ et de NH₃ en divers composés. Pour atteindre des taux de croissance plus élevés, les archées doivent toutefois être en



symbiose avec des bactéries qui leur fournissent des composés carbonés pour leur alimentation.

Différentes espèces de *Nitrososphaera* sont connues pour vivre en symbiose avec des éponges marines, comme les éponges oreilles d'éléphant. En présence de ces éponges, les *Nitrososphaera* assurent la nitrification des déchets d'ammoniac produits par les éponges. Ce déchet, toxique pour les animaux aquatiques, peut être utilisé par les *Nitrososphaera* avec le CO₂ pour produire du nitrite, moins毒ique, et de l'adénosine triphosphate (ATP) utilisée comme source d'énergie pour leur croissance (réf. 6). Les archées *Nitrososphaera* sont également présentes en grande quantité dans les racines de littorelle des étangs.

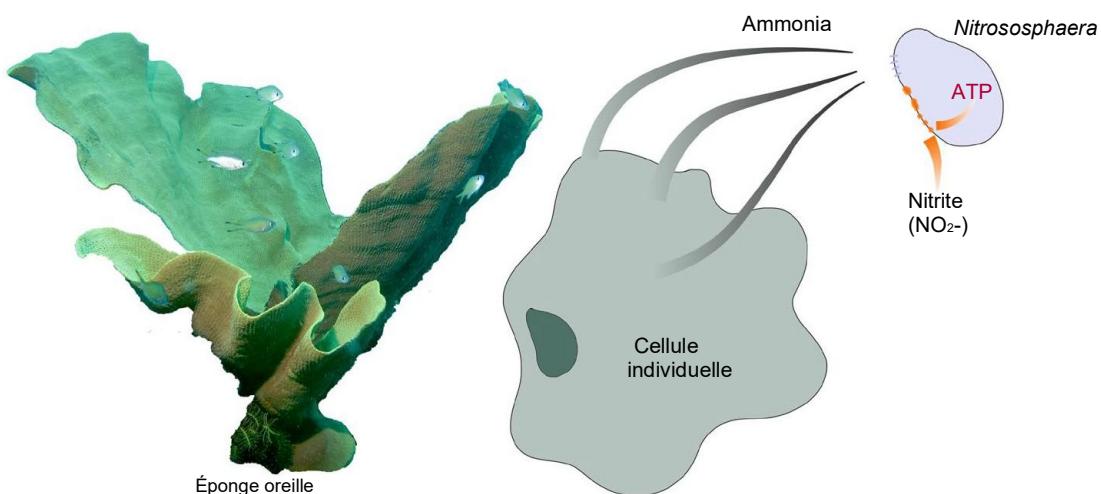


Figure 1 : Les *Nitrososphaera* vivent en symbiose avec les éponges marines.

Les éponges sont des animaux invertébrés simples qui produisent de l'ammoniac comme déchet de leurs processus métaboliques. Les *Nitrososphaera* utilisent ce déchet pour produire du nitrite et de l'ATP, ce qui leur permet d'obtenir l'énergie nécessaire à leur survie et à leur croissance.

Image Éponge oreille d'éléphant : Bernard Dupont via Wikimedia commons (CC BY-SA 2.0)

Sur terre, les *Nitrososphaera* (représentées sous forme de taches autour des racines) contribuent à la fertilité du sol en rendant les minéraux azotés plus accessibles aux plantes. Les plantes utilisent l'azote pour synthétiser les protéines et les acides nucléiques nécessaires à leur croissance et à leur développement. Bien que l'atmosphère terrestre contienne 78 % d'azote gazeux (N₂), les plantes ne peuvent pas l'incorporer directement dans leurs processus anaboliques.

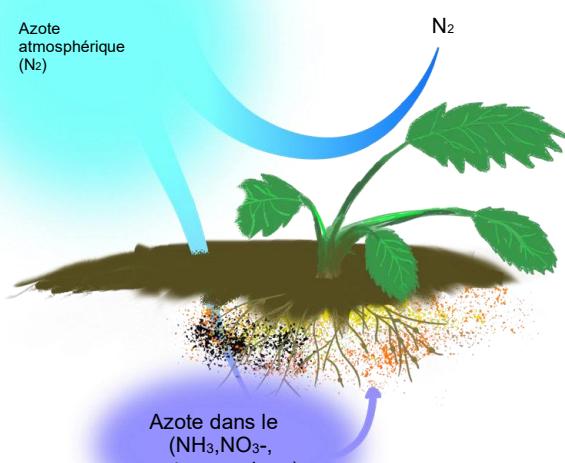


Figure 2 : Les *Nitrososphaera* vivent en symbiose avec les plantes.

Les *Nitrososphaera* vivent près des racines des plantes où elles contribuent à l'assimilation de l'azote en aidant à convertir l'azote atmosphérique en formes absorbables telles que le NO₃⁻.



Les plantes peuvent toutefois absorber d'autres composés azotés tels que l'ammoniac (NH_3) et le nitrate (NO_3^-) pour les utiliser dans leurs processus anaboliques. De nombreuses archées *Nitrososphaera* contribuent à la conversion de l'azote atmosphérique en formes assimilables telles que le nitrite (NO_2^-). Les plantes dépendent donc de micro-organismes tels que les *Nitrososphaera* et d'autres impliqués dans la production des composés NH_3 et NO_3^- (réf. 7).

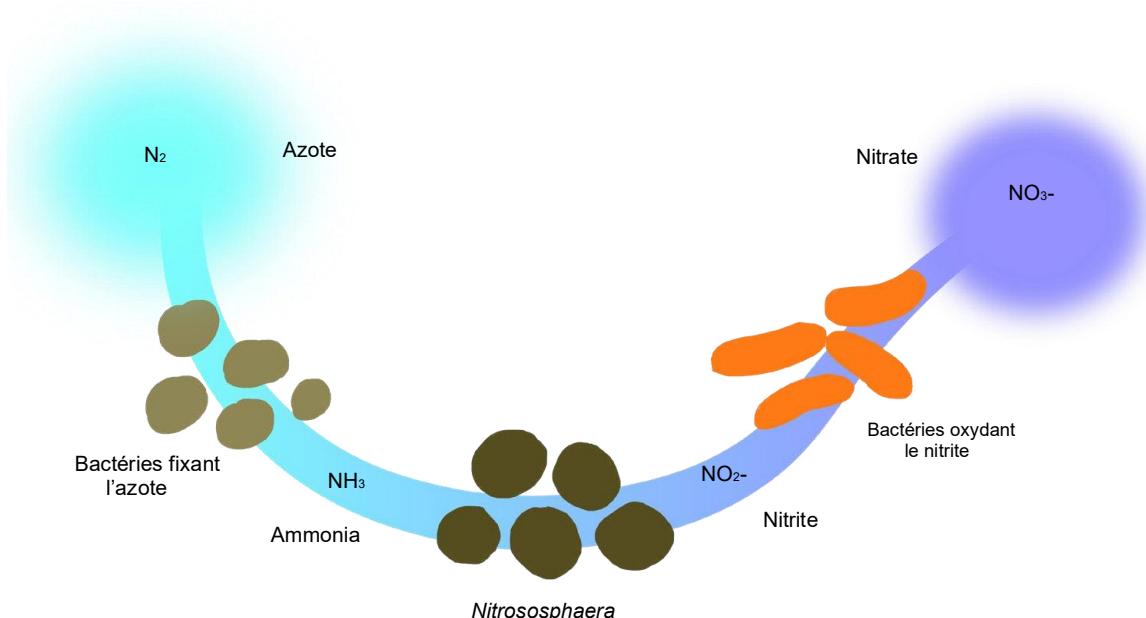


Figure 3 : Les micro-organismes tels que *Nitrososphaera* rendent les composés azotés disponibles pour les plantes.
Les *Nitrososphaera* vivent dans le sol avec d'autres micro-organismes tels que les bactéries fixatrices d'azote. Ensemble, cette communauté de micro-organismes veille à ce que les plantes puissent accéder aux composés azotés et les utiliser pour leur croissance et leur développement.

Ces microbes vivent autour des racines des plantes et dans le sol environnant. Les *Nitrososphaera* transforment spécifiquement l'ammoniac (NH_3) en nitrite (NO_2^-), qui peut ensuite être converti en nitrate (NO_3^-) par des bactéries vivant dans le sol. Dans ce type de symbiose, les archées fournissent à la plante les composés azotés nécessaires à sa croissance, tandis que les plantes fournissent aux archées des composés carbonés qu'elles peuvent utiliser (réf. 7).



Les changements de température modifient la composition biochimique de la membrane cellulaire des *Nitrososphaera*. Contrairement aux bactéries, les membranes cellulaires des archées contiennent des lipides portant un certain nombre de structures en anneau de carbone formées par des composés cyclohexane et cyclopentane. La composition de la membrane cellulaire et le nombre de structures cycliques au sein de celle-ci varient en fonction de la température. Cela permet aux scientifiques d'analyser les sédiments marins qui contiennent des résidus de ces organismes et de déduire les changements de température qui se sont produits dans le passé (réf. 8).



Dans la recherche

Bien qu'ils jouent un rôle clé dans les cycles biogéochimiques mondiaux, les rôles des *Nitrososphaera* dans ces processus n'ont été révélés que récemment. Les techniques de biologie moléculaire telles que le séquençage du génome ont été essentielles pour découvrir l'habitat et l'importance de ces archées.

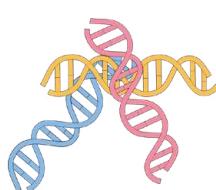
Méthodes de séquençage du génome

Le séquençage du génome a joué un rôle essentiel dans l'exploration du monde invisible. Grâce aux technologies de séquençage, en 1977, les scientifiques ont pu distinguer deux groupes d'organismes très distincts qui étaient auparavant considérés comme identiques : les bactéries et les archées (réf. 9). Le séquençage a également joué un rôle essentiel dans l'étude approfondie des espèces archéennes et l'identification de leur rôle dans les écosystèmes. Par exemple, pendant longtemps, les chercheurs ont pensé que les archées étaient des organismes extrémophiles, vivant uniquement dans des espaces inhabitables pour d'autres organismes tels que les bactéries et les eucaryotes. Le séquençage d'échantillons marins a toutefois révélé que les archées étaient plus répandues qu'on ne le pensait. On les trouve dans divers habitats, tels que les eaux marines froides oxygénées (réf. 10).

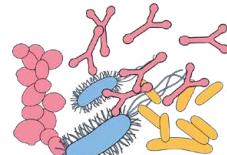
Une fois encore, grâce au séquençage, les chercheurs ont découvert l'implication des archées dans le cycle de l'azote, essentiel à l'existence de nombreuses formes de vie. Le cycle de l'azote implique plusieurs étapes au cours desquelles l'azote change de forme (réf. 11). L'azote atmosphérique (N_2) est « fixé » par des micro-organismes sous d'autres formes chimiques que les plantes absorbent et utilisent pour produire des biomolécules contenant de l'azote, telles que les acides aminés et les acides nucléiques. Pendant longtemps, on a pensé que seules les bactéries capturent l'azote atmosphérique et le transformaient en formes assimilables par les plantes. Grâce au séquençage du matériel génétique du sol, nous savons désormais que des organismes tels que les *Nitrososphaera*, appartenant au domaine des archées, jouent également un rôle essentiel dans la fixation de l'azote (réf. 12).



Des échantillons de sol sont prélevés.
génétiques



Les informations
sont extraites et
analysées.



Les organismes vivant
dans le sol et leurs
caractéristiques sont
identifiés.

Figure 4 : Les techniques de séquençage génomique permettent de déterminer quels organismes vivent dans le sol.
Des échantillons de sol peuvent être prélevés et traités afin d'isoler les informations génomiques présentes. Ces informations génétiques peuvent donner des indices sur les organismes susceptibles de vivre dans le sol.



En 2005, des chercheurs ont analysé une couche de sable de 10 cm d'épaisseur prélevée sur un site près de Darmstadt, en Allemagne, en extrayant le métagénomique (l'ensemble des informations génétiques contenues dans un échantillon) et ont révélé la présence de nouveaux gènes archéens susceptibles d'être impliqués dans la fixation de l'azote. Il s'agissait là d'un indice important pour les scientifiques, qui suggérait que les archées présentes dans le sol pourraient également être capables de fixer l'azote (réf. 13). En effet, plusieurs années plus tard, une espèce spécifique prélevée dans les sols de jardins à Vienne, en Autriche, a été cultivée avec succès en laboratoire. À l'appui des données métagénomiques de 2005, cet organisme a été capable de convertir l'ammoniac en nitrite, démontrant pour la première fois que les archées du sol sont capables de réduire l'azote pour aider à le fixer dans le sol (réf. 1).

Grâce au séquençage métagénomique, le matériel génétique de tous les organismes vivant dans un habitat particulier est analysé. Les micro-organismes n'étant pas visibles à l'œil nu, les scientifiques prélèvent des échantillons de l'habitat dans lequel ils vivent (par exemple, le sol) et isolent l'ADN des micro-organismes. Une fois isolées, les molécules d'ADN sont séquencées afin d'identifier leur séquence génomique. La séquence génomique peut ensuite aider à identifier les micro-organismes.

Pour voir comment les scientifiques de l'EMBL prélèvent des échantillons de sol à des fins d'analyse lors de l'expédition TREC, scannez le code QR ci-dessous ou utilisez le [lien](#).



Glossaire

Symbiose : Interaction physique étroite entre au moins deux espèces différentes.

Nitrification : Processus de conversion de l'ammonium en composés NO_2^- (nitrites). **Chimioautotrophe** : Terme utilisé pour décrire les organismes qui peuvent produire leur propre énergie en utilisant d'autres produits chimiques.

Éponge marine : Les éponges sont des animaux marins immobiles qui produisent de l'ammoniac comme déchet.

Métagénomique : Étude de l'information génétique recueillie en vrac dans l'environnement.

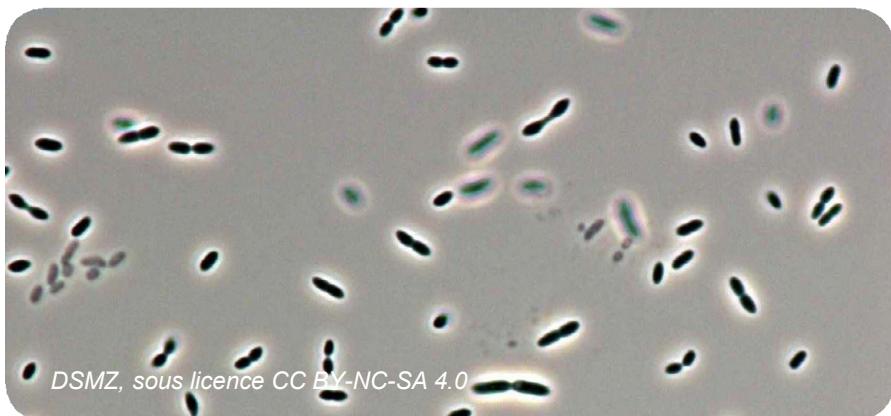


Références

1. Tourna, M. et al. (2011). *Nitrososphaera viennensis*, an ammonia oxidizing archaeon from soil. Proceedings of the National Academy of Sciences, 108(20), 8420–8425. <https://doi.org/10.1073/pnas.1013488108>
2. Moissl-Eichinger, C. et al. (2017). Human age and skin physiology shape diversity and abundance of Archaea on skin. Scientific Reports, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04197-4>
3. Hernández, M. et al. (2013). Ammonia oxidizers are pioneer microorganisms in the colonization of new acidic volcanic soils from South of Chile. Environmental Microbiology Reports, 6(1), 70–79. <https://doi.org/10.1111/1758-2229.12109>
4. Zarraonaindia, I. et al. (2020). Response of Horticultural Soil Microbiota to Different Fertilization Practices. Plants, 9(11), 1501. <https://doi.org/10.3390/plants9111501>
5. Moissl, C. et al. (2008). Archaeal diversity analysis of spacecraft assembly clean rooms. The ISME Journal, 2(1), 115–119. <https://doi.org/10.1038/ismej.2007.98>
6. Moeller, F. U. et al. (2019). Characterization of a thaumarchaeal symbiont that drives incomplete nitrification in the tropical spongelanthella basta. Environmental Microbiology, 21(10), 3831–3854. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14732>
7. Zhelnina, K. V. et al. (2014). Genome Sequence of Candidatus *Nitrososphaera* evergladensis from Group I.1b Enriched from Everglades Soil Reveals Novel Genomic Features of the Ammonia-Oxidizing Archaea. PLoS ONE, 9(7), e101648. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101648>
8. Bale, N. J. et al. (2019). Membrane Lipid Composition of the Moderately Thermophilic Ammonia-Oxidizing Archaeon “Candidatus Nitrosotenuis uzonensis” at Different Growth Temperatures. Applied and Environmental Microbiology, 85(20). <https://doi.org/10.1128/aem.01332-19>
9. Woese, C. R., & Fox, G. E. (1977). Phylogenetic structure of the prokaryotic domain: the primary kingdoms. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 74(11), 5088–5090. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC432104/>
10. DeLong, E. F. (1992). Archaea in coastal marine environments. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 89(12), 5685–5689. <https://doi.org/10.1073/pnas.89.12.5685>
11. Aczel, M. R. (2019). What Is the Nitrogen Cycle and Why Is It Key to Life? Frontiers for Young Minds, 7. <https://doi.org/10.3389/frym.2019.00041>
12. Könneke, M. et al. (2005). Isolation of an autotrophic ammonia-oxidizing marine archaeon. Nature, 437(7058), 543–546. <https://doi.org/10.1038/nature03911>
13. Treusch, A. H. et al. (2005). Novel genes for nitrite reductase and Amo-related proteins indicate a role of uncultivated mesophilic crenarchaeota in nitrogen cycling. Environmental Microbiology, 7(12), 1985–1995. <https://doi.org/10.1111/j.1462-2920.2005.00906.x>

Pseudomonas

(*Pseudomonas putida*)



Le genre *Pseudomonas* comprend plus de 150 espèces bactériennes. L'espèce *Pseudomonas putida* peut être trouvée dans une gamme d'environnements allant du sol et des eaux marines aux intestins des pandas géants ([réf. 1](#)). *P. putida* se caractérise par un métabolisme robuste, une tolérance aux composés toxiques et des gènes facilement manipulables en laboratoire, ce qui confère à cet organisme un grand potentiel pour décontaminer les zones environnementales polluées et produire de nombreux produits naturels aux fonctions biologiques diverses.

Écologie

En tant qu'organisme saprophyte se nourrissant de matière organique morte, *P. putida* se trouve couramment sur et à proximité des racines des plantes, où il peut se développer sur les matières végétales mortes et les composés organiques produits par la plante. Dans cette relation symbiotique, les bactéries *P. putida* colonisent les racines des plantes pour empêcher le développement de bactéries et de champignons pathogènes, nettoient l'environnement des matières mortes et libèrent des minéraux tels que les phosphates à partir des composés organiques afin de les rendre accessibles aux plantes ([réf. 2](#), [réf. 3](#), [réf. 4](#)). Les plantes utilisent ces minéraux pour produire des nutriments tels que des glucides, des acides aminés et des protéines. En retour, une partie de ces nutriments est libérée dans l'environnement par les racines des plantes et, en quelque sorte, « restituée » aux micro-organismes présents dans l'environnement, notamment *P. putida*. Pour maintenir leur association avec les racines des plantes, ces bactéries doivent repousser les attaques d'autres bactéries et utiliser différentes stratégies telles que la chimiotaxie pour « trouver » la nourriture libérée par les racines ([réf. 4](#)).

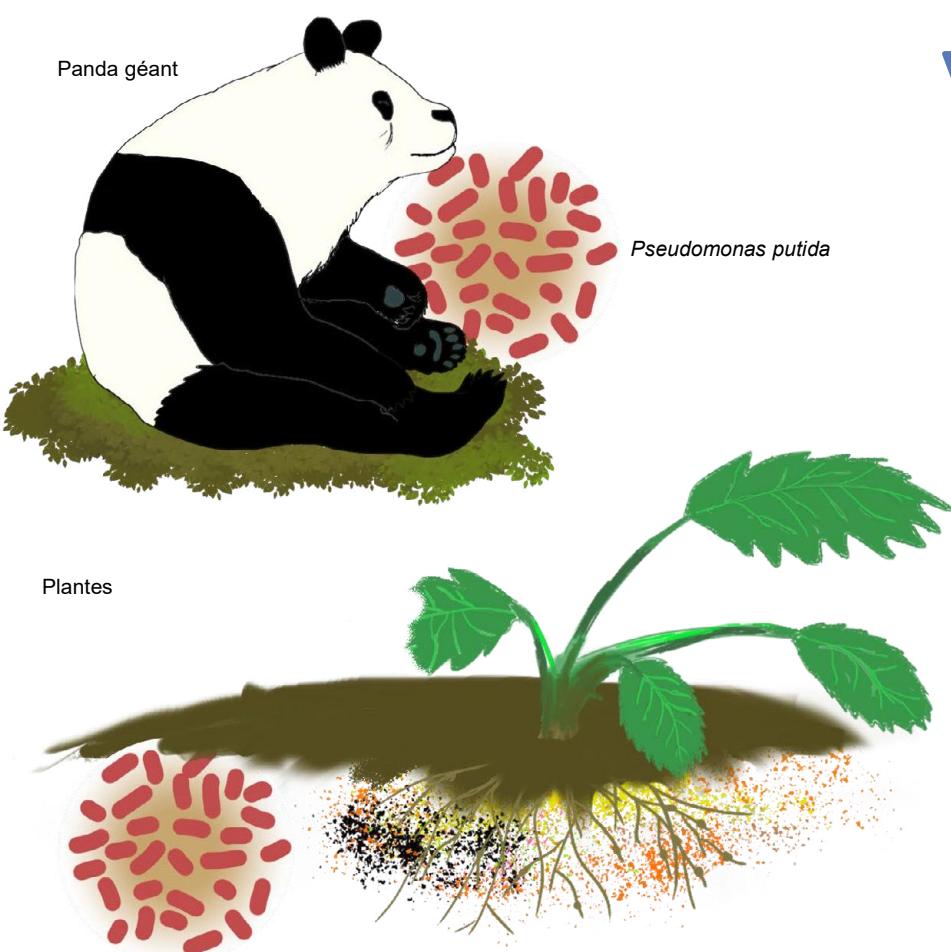
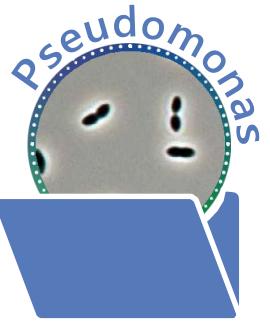
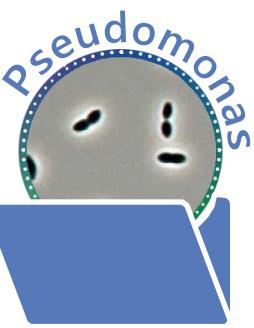


Figure 1 : *P. putida* vit en symbiose avec différents organismes tels que les plantes et les pandas géants.
Dans les intestins du panda géant, *P. putida* aide à décomposer les polymères glucidiques complexes comme la lignine. Autour des racines des plantes, ces bactéries (représentées sous forme de petites taches autour des racines) nettoient l'environnement racinaire et fournissent à la plante les nutriments nécessaires.

Une analyse des matières fécales dans un parc national a également permis d'identifier *P. putida* dans l'intestin des pandas géants. Au cours de leur évolution, les pandas géants seraient passés d'un régime omnivore à un régime herbivore composé principalement de bambous. L'analyse des excréments de pandas du parc safari de Hefei, en Chine, a permis d'identifier la présence de *P. putida* comme bactérie intestinale résidant dans l'intestin des pandas. Ici, les bactéries aident les pandas à digérer la lignine, un polymère contenu dans les bambous dont ils se nourrissent ([réf. 5](#)).

On sait également que *P. putida* vit dans l'eau. Bien que les marées noires aient des conséquences mortelles pour les organismes marins tels que les oiseaux et les mammifères, une analyse d'échantillons marins prélevés le long des côtes espagnoles après la marée noire du Prestige a montré que la zone était naturellement enrichie en espèces dégradant les hydrocarbures telles que *P. putida*, ce qui souligne sa capacité non seulement à résister à ces produits chimiques, mais aussi à les utiliser comme source d'énergie ([réf. 6](#)). Cette caractéristique de *P. putida* en fait un excellent candidat pour les processus de bioremédiation dans la nature.



Propriétés de bioremédiation

La bioremédiation est le processus qui consiste à réduire la pollution à l'aide des hydrocarbures sont un type courant de polluants qui peuvent être rejetés dans l'environnement naturel soit par l'activité humaine, comme les marées noires et l'incinération des déchets, soit par des événements naturels, comme les incendies de forêt.

Ces phénomènes entraînent la contamination des habitats par des hydrocarbures toxiques tels que les naphtalènes et les toluènes, qui constituent une menace pour la santé des organismes vivant dans ces habitats. Il est intéressant de noter que *P. putida* peut contrer les effets de ces produits chimiques, de différents détergents, désinfectants et solvants organiques grâce à des enzymes spécifiques capables de décomposer et de détoxifier les composés xénobiotiques. Ces bactéries ayant la capacité de décomposer des molécules aussi complexes, elles peuvent être utilisées dans les efforts de bioremédiation pour nettoyer les sols contaminés par des marées noires ou des incendies de forêt qui génèrent de nombreux hydrocarbures toxiques par la combustion de matières végétales telles que la cellulose et la lignine.

En effet, lors d'une étude menée dans le parc naturel de Montes de Málaga, en Espagne, des scientifiques ont démontré que la bioremédiation par l'introduction de cultures de *P. putida*, seules ou en association avec leurs symbiotes végétaux, permettait d'éliminer jusqu'à 60 % d'hydrocarbures complexes en plus par rapport à un sol laissé à lui-même (réf. 7).

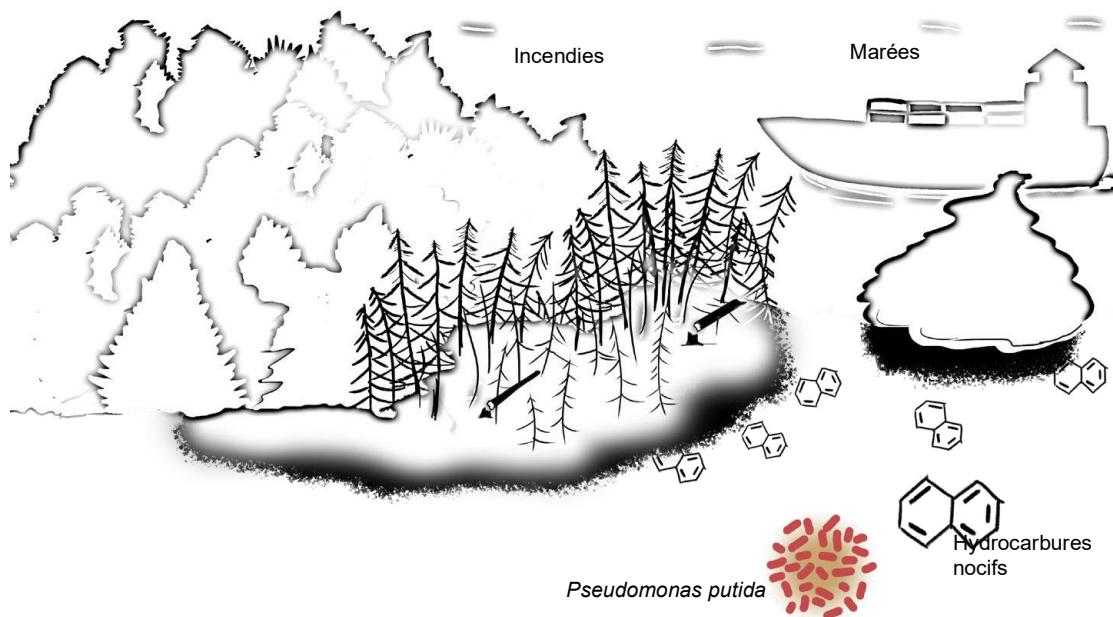
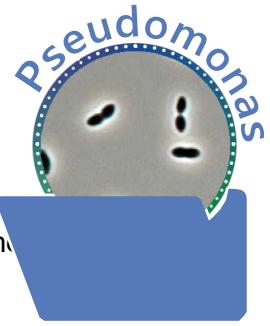


Figure 2 : *P. putida* peut être utilisée comme agent de bioremédiation dans les zones touchées par des marées noires et des incendies de forêt.

Les marées noires et les incendies de forêt produisent des composés hydrocarbonés toxiques difficiles à éliminer pour les autres organismes, mais *P. putida* (en rouge) est capable de les éliminer.



P. putida peut également être utilisée comme agent de lutte biologique pour protéger les plantes contre les infections pathogènes. *P. putida* peut renforcer la résistance des plantes aux agents pathogènes en réduisant leur sensibilité aux niveaux élevés de stress oxydatif causés par l'invasion des cellules hôtes par les agents pathogènes (réf. 8).



Dans la recherche

Le génome de *Pseudomonas putida* peut être facilement modifié pour synthétiser divers composés organiques pharmaceutiques et industriels. Parmi ceux-ci, on trouve des agents ayant des implications pour la santé humaine, tels que des pigments caroténoïdes antioxydants (réf. 8), l'agent anticancéreux prodigiosine (réf. 9) et de nombreux isoprénoïdes d'importance médicale et commerciale (réf. 10). En outre, *P. putida* peut être utilisée pour produire des précurseurs de bioplastiques éco-efficaces qui sont à la fois d'origine biologique et biodégradables (réf. 11). Il est frappant de constater que *P. putida* peut non seulement dégrader, mais aussi synthétiser des composés aromatiques, ce qui permet la production durable de benzène, de toluène et de xylènes (réf. 12). De plus, cette bactérie peut être modifiée pour produire des composés aromatiques toxiques tels que le phénol, que nul autre micro-organisme n'est capable de produire (réf. 13).

Glossaire

Xénobiotique : Toute substance ou composé qui n'est pas produit biologiquement et qui est étranger aux organismes et à l'écosystème.

Lutte biologique : Utilisation d'organismes vivants pour contrôler les populations de ravageurs tels que les insectes, les mauvaises herbes et les maladies des plantes.

Stress oxydatif : Phénomène chimique et physiologique complexe causé par différents facteurs de stress conduisant à différents mécanismes pathologiques.

Caroténoïde : Pigment jaune à rouge présent dans les plantes, les algues et les bactéries photosynthétiques qui agit comme un antioxydant chez l'humain.

Prodigiosine : Pigment rouge microbien doté de propriétés antimicrobiennes, antifongiques et algicides.

Isoprénoïdes : Composés organiques impliqués dans les processus physiologiques des plantes et des animaux, également utilisés comme pigments, parfums et vitamines.

Phénol : Composé organique aromatique incolore pouvant provoquer une irritation de la peau, des yeux, du nez, de la gorge et du système nerveux.



Références

1. Fang, W. et al. (2012). Evidence for Lignin Oxidation by the Giant Panda Fecal Microbiome. *PLOS ONE*, 7(11), e50312. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0050312>
2. Matilla, M. A. et al. (2009). *Pseudomonas putida* KT2440 causes induced systemic resistance and changes in *Arabidopsis* root exudation. *Environmental Microbiology Reports*, 2(3), 381–388. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00091.x>
3. Amer, G. A., & Utkhede, R. (2000). Development of formulations of biological agents for management of root rot of lettuce and cucumber. *Canadian Journal of Microbiology*, 46(9), 809–816. <https://doi.org/10.1139/w00-063>
4. Molina, L. et al. (2020). The versatility of *Pseudomonas putida* in the rhizosphere environment. In Elsevier eBooks (pp. 149–180). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2019.12.002>
5. Mulet, M. et al. (2011). Pseudomonas Diversity in Crude-Oil-Contaminated Intertidal Sand Samples Obtained after the Prestige Oil Spill. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(3), 1076–1085. <https://doi.org/10.1128/aem.01741-10>
6. Pizarro-Tobías, P. et al. (2015). Restoration of a Mediterranean forest after a fire: bioremediation and rhizoremediation fieldscale trial. *Microbial Biotechnology*, 8(1), 77–92. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.12138>
7. Matilla, M. A. et al. (2009b). *Pseudomonas putida* KT2440 causes induced systemic resistance and changes in *Arabidopsis* root exudation. *Environmental Microbiology Reports*, 2(3), 381–388. <https://doi.org/10.1111/j.1758-2229.2009.00091.x>
8. Hernández-Arranz, S. et al. (2019). Engineering *Pseudomonas putida* for isoprenoid production by manipulating endogenous and shunt pathways supplying precursors. *Microbial Cell Factories*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s12934-019-1204-z>
9. Microbial Cell Factories Engineering for Production of Biomolecules. (2021). In Elsevier eBooks. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/c2019-0-03952-0>
10. Arendt, P. et al. (2016). Synthetic biology for production of natural and new-to-nature terpenoids in photosynthetic organisms. *Plant Journal*, 87(1), 16–37. <https://doi.org/10.1111/tpj.13138>
11. Możejko-Ciesielska, J. et al. (2019). Pseudomonas Species as Producers of Eco-friendly Polyhydroxyalkanoates. *Journal of Polymers and the Environment*, 27(6), 1151–1166. <https://doi.org/10.1007/s10924-019-01422-1>
12. Nikel, P. I. et al. (2018). *Pseudomonas putida* as a functional chassis for industrial biocatalysis: From native biochemistry to trans-metabolism. *Metabolic Engineering*, 50, 142–155. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2018.05.005>
13. Molina-Santiago, C. et al. (2016). *Pseudomonas putida* as a platform for the synthesis of aromatic compounds. *Microbiology*, 162(9), 1535–1543. <https://doi.org/10.1099/mic.0.000333>

Fiche élève

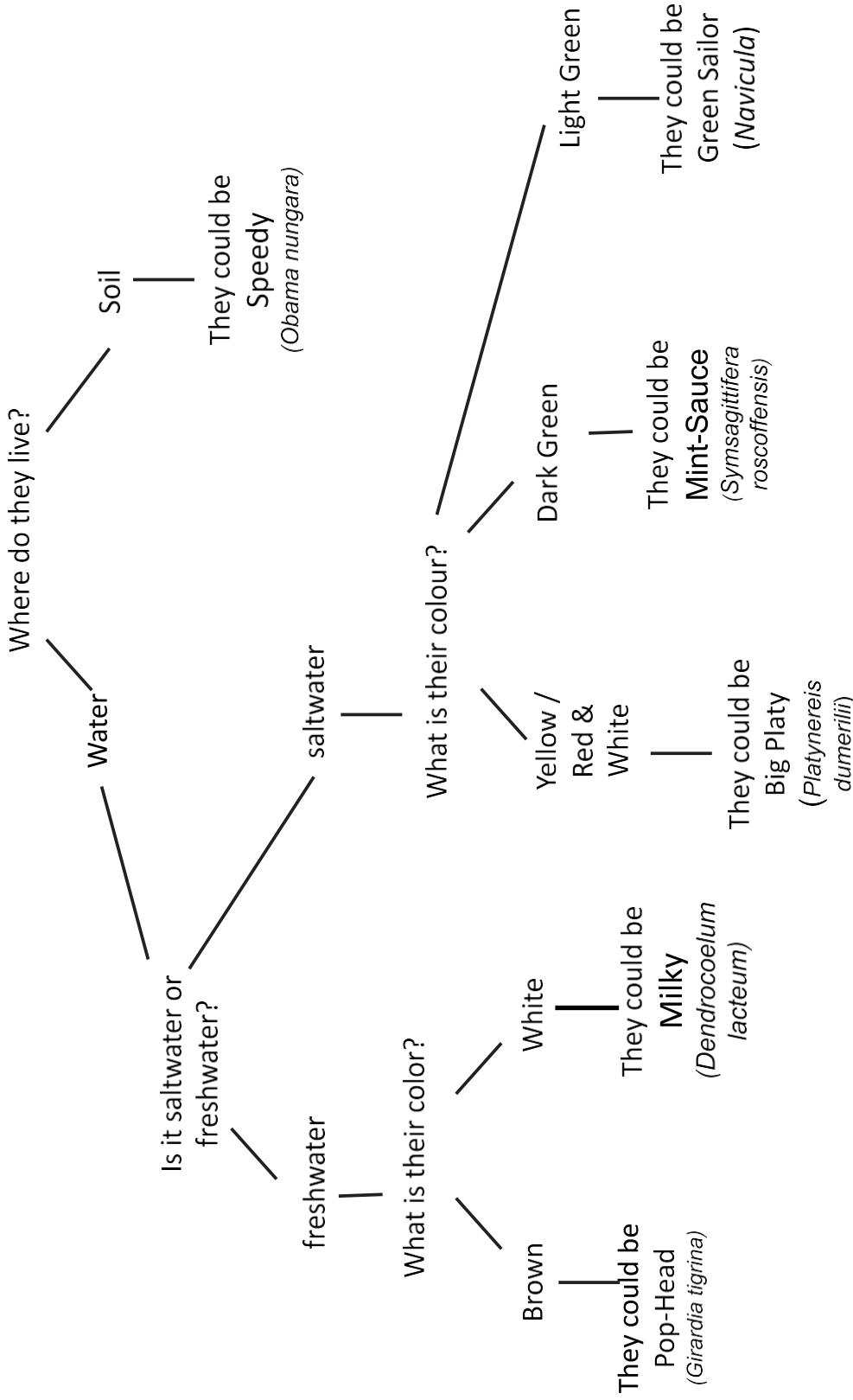
L'île Nexus

Une ressource pédagogique ludique sur l'exploration des écosystèmes



QU'EST-CE QUE C'EST ? - FICHE ÉLÈVE

You have found another island inhabitant but there is only scarce information for it. Try to find the name of the organism following the questions and answers below. Carefully check the card for clues!



Follow up question: Do you think this is how scientists determine which organisms they found?



NOM DU QUADRANT.....**PARTIE 1**

Indiquez s'il y a une activité humaine/des êtres humains vivant dans le quadrant.

..

L'eau est essentielle pour tous les organismes. **Expliquez** comment ce quadrant pourrait maintenir l'accès à l'eau douce.

..

..

..

..

Expliquez s'il existe des adaptations générales chez les organismes qui vivent dans ce quadrant.

..

..

..

Quel est l'organisme le plus abondant dans votre quadrant ? **Décrivez** ses caractéristiques en vous référant aux points ci-dessous.

- Est-il visible à l'œil nu ?
- À quel domaine du vivant appartient-il ?
- **Indiquez** s'il est lié d'une manière ou d'une autre à d'autres organismes/êtres humains ET **décrivez** brièvement cette relation.

..

..

..

Prédisez pourquoi cet organisme est le plus répandu dans ce quadrant et **justifiez votre réponse**.

..

..

..

**NOM DU QUADRANT.....****PARTIE 2**

Gardez à l'esprit : Le changement climatique peut entraîner des modifications durables de la quantité de précipitations reçues par un écosystème. Des précipitations extrêmes ou leur absence pendant de longues périodes peuvent modifier considérablement l'environnement physique et la biodiversité d'un écosystème.

Mettez en évidence sur la carte les éléments de l'environnement physique qui peuvent favoriser la propagation des engrains et autres produits chimiques vers d'autres parties de l'île.

Prédisez quels facteurs abiotiques de l'encadré pourraient avoir changé après les fortes pluies, et **justifiez votre réponse**.

répartition des polluants et des produits chimiques, quantité de polluants dans la mer, quantité d'oxygène dans l'atmosphère, quantité de CO₂ dans l'atmosphère, salinité autour des estuaires

Identifiez les organismes affectés par les fortes pluies et suivez l'évolution des facteurs abiotiques autour d'eux en les entourant d'un cercle sur la carte de la première page.

Discutez de la manière dont ces organismes sont affectés par ce changement soudain.

NOM DU QUADRANT.....

PARTIE 3

Bien que les activités humaines soient la principale cause des problèmes auxquels les écosystèmes sont actuellement confrontés, certaines d'entre elles peuvent avoir un impact positif en aidant les écosystèmes à se rétablir. Vous trouverez ci-dessous quelques mesures qui peuvent être prises pour aider l'écosystème du quadrant **Nature** à se rétablir. **Choisissez** la ou les mesures qui correspondent le mieux à votre objectif.

- Gestion plus efficace des déchets, y compris le recyclage
 - Bioremédiation des zones polluées
 - Programmes d'élevage et de réintroduction d'espèces indigènes
 - Protection des habitats par la limitation des activités humaines

Identifiez ET expliquez brièvement la ou les mesures qui pourraient aider l'écosystème naturel à se remettre du changement environnemental.



Clé de correction

L'île Nexus

Une ressource pédagogique ludique sur l'exploration des écosystèmes



**PARTIE 1**

Question : Indiquez s'il y a une activité humaine/des êtres humains vivant dans le quadrant.

Réponses :

VILLE

Oui, il y a une activité humaine dans le quadrant Ville.

AGRICULTURE

Oui, il y a une activité humaine dans ce quadrant.

INDUSTRIE

Oui, il y a une activité humaine dans ce quadrant.

NATURE

Il n'y a aucune activité humaine visible dans ce quadrant, bien qu'il ait pu être affecté par des activités humaines ailleurs.

Question : L'eau est essentielle pour tous les organismes. Expliquez comment ce quadrant pourrait maintenir l'accès à l'eau douce.

Réponses :

VILLE

Bien qu'il n'y ait pas de source d'eau douce visible dans ce quadrant, il pourrait y avoir des sources d'eau souterraine. Après les précipitations, l'eau peut s'infiltrer dans le sol et s'accumuler dans des réservoirs souterrains, servant ainsi d'approvisionnement nécessaire.

AGRICULTURE

Bien qu'il n'y ait pas de source d'eau douce visible dans ce quadrant, il pourrait y avoir des sources d'eau souterraine. Après les précipitations, l'eau peut s'infiltrer dans le sol et s'accumuler dans des réservoirs souterrains, servant ainsi d'approvisionnement nécessaire.

INDUSTRIE

En plus de la rivière qui coule le long du quadrant Industrie, il peut y avoir des sources d'eau souterraine. Après les précipitations, l'eau peut s'infiltrer dans le sol et s'accumuler dans des réservoirs souterrains, servant ainsi d'approvisionnement nécessaire.

NATURE

En plus de la rivière qui coule le long du quadrant Nature, il peut y avoir des sources d'eau souterraine. Après les précipitations, l'eau peut s'infiltrer dans le sol et s'accumuler dans des réservoirs souterrains, servant ainsi d'approvisionnement nécessaire.

PARTIE 1

Question : Expliquez s'il existe des adaptations générales chez les organismes qui vivent dans ce quadrant.

Réponses :

VILLE

Les organismes vivant dans ce quadrant présentent généralement une tolérance aux polluants. Cette tolérance pourrait aider les organismes à survivre à l'exposition aux polluants et à se propager dans des environnements pollués.

AGRICULTURE

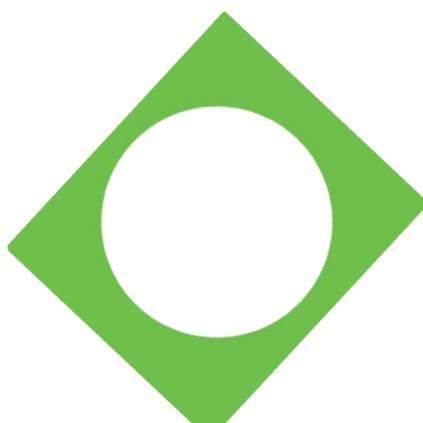
De nombreux organismes tels que les Nitrosos et les Fabricants de pilules, qui peuplent le quadrant Agriculture, ont un niveau de tolérance aux polluants qui leur permet de survivre dans cet environnement, où les produits chimiques peuvent être fréquemment utilisés en raison des activités agricoles.

INDUSTRIE

Les sites industriels sont susceptibles de contenir de nombreux polluants chimiques qui peuvent être nocifs pour de nombreux organismes. Dans l'ensemble, les organismes vivant dans ce quadrant, tels que les Biodégradeurs de pétrole, les Lokis et les Super nettoyeurs, sont très tolérants aux polluants. C'est pourquoi ces organismes survivent dans cet environnement hostile.

NATURE

- Il existe des organismes dotés de différents types d'adaptations qui les aident à peupler le quadrant Nature. Par exemple, les Salés-ou-pas sont des vers plats qui vivent dans les estuaires et sont adaptés à une vie entre la mer et la rivière, où la salinité de l'eau est plus élevée que celle de la mer mais inférieure à celle de l'eau douce.
- Les Posidonies sont des plantes à fleurs adaptées à la vie dans les eaux marines. C'est pourquoi leur population s'étend le long du quadrant Nature, mais est absente des rivières.
- Comme le quadrant Nature est relativement éloigné des régions polluées telles que les zones industrielles et urbaines, il est globalement peuplé d'organismes qui ne tolèrent pas bien les polluants.



**PARTIE 1**

Question : Quel est l'organisme le plus abondant dans votre quadrant ? **Décrivez** ses caractéristiques en vous référant aux points ci-dessous.

- Est-il visible à l'œil nu ?
- À quel domaine du vivant appartient-il ?
- Indiquez s'il est lié d'une manière ou d'une autre à d'autres organismes/êtres humains ET décrivez brièvement cette relation.

Réponses :

VILLE

Le Coli est l'organisme le plus abondant dans ce quadrant. Il s'agit d'un micro-organisme, il n'est donc pas visible à l'œil nu. Il appartient au domaine bactérien des *E. coli* qui peuplent généralement les intestins des humains et d'autres animaux à sang chaud, fournissant à leur hôte des vitamines utiles à leur croissance.

AGRICULTURE

Le Nitroso est l'organisme le plus abondant dans ce quadrant. C'est un micro-organisme, plus précisément une archée, invisible à l'œil nu. Le Nitroso a un lien avec l'humain ! Le Nitroso est un micro-organisme qui intervient dans le cycle de l'azote dans le sol, où il aide à fixer l'azote atmosphérique sous des formes accessibles aux plantes. Cela en fait des organismes importants pour la production alimentaire par les cultures. Bien que les détails de cette relation soient inconnus, les nitrosos sont également présents sur la peau humaine.

INDUSTRIE

L'organisme le plus abondant dans ce quadrant est le Biodégradeur de pétrole. Il s'agit d'un micro-organisme, une bactérie plus précisément, donc invisible à l'œil nu. Il est également lié à l'humain et à d'autres organismes. Les Biodégradeurs de pétrole peuvent aider l'humain à restaurer les écosystèmes pollués en décomposant les produits chimiques toxiques. Cela signifie que ces organismes peuvent être utilisés comme moyen de restaurer les écosystèmes endommagés. En outre, les Biodégradeurs de pétrole vivent en symbiose avec des organismes tels que les pandas et les plantes.

NATURE

Les Posidonies sont les organismes les plus abondants dans le quadrant. Ce sont des organismes multicellulaires appartenant au domaine Eukarya. Les Posidonies constituent la base d'habitats importants pour des organismes tels que les poissons et les invertébrés marins, comme les vers et les oursins.

En séquestrant des millions de tonnes de CO₂ qui, autrement, resteraient dans l'atmosphère et contribueraient au réchauffement climatique, les Posidonies contribuent à lutter contre le changement climatique.

PARTIE 1

Question : Prédisez pourquoi cet organisme est le plus répandu dans ce quadrant et justifiez votre réponse.

Réponses :

VILLE

La présence humaine dans la zone pourrait indiquer des rejets fréquents de matières fécales dans les eaux usées. Les Colis peuvent coloniser les environnements où de tels rejets ont lieu.

AGRICULTURE

L'abondance de Nitrosos dans ce quadrant est logique étant donné que des engrains azotés sont utilisés pour stimuler la croissance des plantes et que ces organismes vivent en symbiose avec les racines des plantes, utilisant les engrais pour se multiplier.

INDUSTRIE

Les Biodégradeurs de pétrole sont résistants aux polluants et peuvent utiliser les glucides présents dans le pétrole brut comme source d'énergie. Cette résistance aux polluants peut constituer un avantage pour les Biodégradeurs de pétrole par rapport à d'autres micro-organismes qui sont affectés négativement par les polluants.

NATURE

Le quadrant Nature est relativement éloigné des impacts directs des activités humaines. Cela crée l'espace et l'opportunité pour les espèces indigènes d'exister dans leurs habitats intacts.

PARTIE 2

Gardez à l'esprit : Le changement climatique peut entraîner des modifications durables de la quantité de précipitations reçues par un écosystème. Des précipitations extrêmes ou leur absence pendant de longues périodes peuvent modifier considérablement l'environnement physique et la biodiversité d'un écosystème.

Question : Mettez en évidence sur la carte les éléments de l'environnement physique qui peuvent favoriser la propagation des engrais et autres produits chimiques vers d'autres parties de l'île.

Réponses :

VILLE

Les courants marins peuvent contribuer à la propagation des engrais dans d'autres parties de l'île. En outre, les eaux souterraines en circulation et les réservoirs peuvent également favoriser la propagation de ces produits chimiques vers d'autres parties de l'île.

AGRICULTURE

Les courants marins peuvent contribuer à la propagation des engrais dans d'autres parties de l'île. En outre, les eaux souterraines en circulation et les réservoirs peuvent également favoriser la propagation de ces produits chimiques vers d'autres parties de l'île.

INDUSTRIE

La présence d'une rivière, d'eaux souterraines et de courants marins peut contribuer à la dispersion des engrais et autres produits chimiques dans différentes parties du quadrant.

NATURE

La présence d'une rivière, d'eaux souterraines et de courants marins peut contribuer à la dispersion des engrais et autres produits chimiques dans différentes parties du quadrant.

Question : Prédisez quels facteurs abiotiques de l'encadré pourraient avoir changé après les fortes pluies, **et justifiez votre réponse.**

répartition des polluants et des produits chimiques, quantité de polluants dans la mer, quantité d'oxygène dans l'atmosphère, quantité de CO₂ dans l'atmosphère, salinité autour des estuaires

Réponses :

VILLE

- La distribution des polluants et des produits chimiques pourrait augmenter en raison des fortes précipitations. Une augmentation du volume des eaux usées due aux précipitations pourrait entraîner une propagation plus importante de la bactérie Coli dans la ville.

La quantité d'engrais dans la mer pourrait également augmenter si les engrais provenant des terres sont transportés vers la côte par la pluie.

PARTIE 2**AGRICULTURE**

- La distribution des polluants et des produits chimiques pourrait augmenter en raison des fortes précipitations. La quantité d'engrais dans la mer pourrait également augmenter si les engrais provenant des terres sont transportés vers la côte par la pluie.

INDUSTRIE

- La distribution des polluants et des produits chimiques pourrait changer à la suite des précipitations. La distribution des polluants peut être encore aggravée par la présence d'une rivière, de sources d'eau souterraine et des courants marins.
- La quantité de polluants dans la mer pourrait augmenter avec les fortes pluies qui transportent les produits chimiques de la terre vers la mer.
- En raison du mélange de l'eau douce de la rivière avec l'eau salée de la mer, la salinité autour des estuaires est déjà plus faible que celle des eaux marines. De fortes précipitations pourraient encore réduire la salinité autour des estuaires.

NATURE

- La distribution des polluants et des produits chimiques pourrait changer à la suite des précipitations. La distribution des polluants peut être aggravée par la présence de rivières, de sources souterraines et de courants marins, provoquant la propagation des produits chimiques dans le quadrant Nature.
- La quantité de polluants dans la mer peut augmenter avec les fortes pluies, qui transportent les produits chimiques d'autres parties de l'île vers la mer.
- En raison du mélange de l'eau douce de la rivière avec l'eau salée de la mer, la salinité autour des estuaires est déjà plus faible que celle des eaux marines. De fortes précipitations pourraient encore réduire la salinité autour des estuaires.

Question : Identifiez les organismes affectés par les fortes pluies et suivez l'évolution des facteurs abiotiques autour d'eux en les entourant sur la carte de la première page.

Réponses :**VILLE**

Poisons verts, Foraminifères, Marins verts, Nécrophages, Colis

AGRICULTURE

Marins verts, Super pullulateurs, Poisons verts, Nitrosos, Fixeurs d'azote

INDUSTRIE

Biodégradeurs de pétrole et Super nettoyeurs

NATURE

Posidonies, Super pullulateurs, Abeille des mers, Salés-ou-pas, Platys Ados

**PARTIE 2**

Question : Discutez de la manière dont ces organismes sont affectés par ce changement soudain.

Réponses :

VILLE

- Poisons verts : Suite à l'épandage d'engrais, il peut se multiplier et former des efflorescences qui produisent des toxines se propageant dans la chaîne alimentaire marine, pouvant entraîner la mort d'animaux marins et d'oiseaux.
- Foraminifères : Certaines espèces de foraminifères peuvent mourir car elles ne tolèrent pas les polluants.
- Marins verts : Les Marins verts prospéreront grâce aux engrais qui atteindront la côte de la ville et stimuleront leur croissance.
- Nécrophages : Si les engrais atteignent la côte de la ville et provoquent une prolifération d'algues toxiques qui tue les mammifères marins, les Nécrophages peuvent profiter de l'augmentation du nombre d'organismes morts et se multiplier.
- Colis : Les Colis peuvent se propager plus loin dans la ville avec les précipitations. Cette propagation peut également entraîner la propagation de la résistance aux antimicrobiens à d'autres communautés bactériennes.

AGRICULTURE

- Les Marins verts, Super pullulateurs et Poisons verts profitent des engrais et se développent de manière excessive. Les Poisons verts et les Super pullulateurs produisent des toxines qui peuvent s'accumuler dans des organismes tels que les poissons et les crustacés. Lorsque des organismes tels que les êtres humains, les oiseaux marins et les mammifères marins, comme les baleines et les dauphins, consomment ces poissons et ces crustacés, ils peuvent être empoisonnés et mourir.
- Les Nitrosos et Fixeurs d'azote sont très tolérants à la pollution par les engrais. Ils peuvent même utiliser l'excès d'engrais pour pousser davantage.

INDUSTRIE

Les Super nettoyeurs sont de plus en plus nombreux car ils sont tolérants aux herbicides et autres produits chimiques fréquemment utilisés dans l'industrie et l'agriculture. Ils sont généralement tolérants aux polluants chimiques et peuvent donc survivre dans des conditions difficiles lorsque ceux-ci se répandent dans leur habitat.

NATURE

- Les Posidonies ont une faible tolérance aux polluants. La propagation de produits chimiques provenant d'autres parties de l'île vers le quadrant Nature peut entraîner la mort de ces plantes. De plus, les fortes précipitations peuvent augmenter le débit des rivières et la turbidité de l'eau le long de la côte. La fréquence accrue de ce phénomène peut avoir des effets négatifs sur la population de Posidonies.
- Les Super pullulateurs peuvent se multiplier et provoquer des efflorescences qui produisent des toxines nocives pour les organismes tels que les mammifères marins et les oiseaux de mer.
- Les Abeilles des mers et les Platys Ados ont élu domicile dans les herbiers de Posidonies. Un recul de la population de Posidonies dans la région pourrait entraîner une diminution du nombre de ces espèces, voire leur disparition.

PARTIE 3**POUR TOUS LES QUADRANTS**

Question : Bien que les activités humaines soient la principale cause des problèmes auxquels les écosystèmes sont actuellement confrontés, certaines d'entre elles peuvent avoir un impact positif en aidant les écosystèmes à se rétablir. Vous trouverez ci-dessous quelques mesures qui peuvent être prises pour aider l'écosystème du quadrant **Nature** à se rétablir. Choisissez la ou les mesures qui correspondent le mieux à votre objectif.

- Gestion plus efficace des déchets, y compris le recyclage
- Bioremédiation des zones polluées
- Programmes d'élevage et de réintroduction d'espèces indigènes
- Protection des habitats par la limitation des activités humaines

Identifiez ET expliquez brièvement la ou les mesures qui pourraient aider l'écosystème naturel à se remettre du changement environnemental.

Réponses :

- Programmes d'élevage et de réintroduction d'espèces indigènes

Si un événement a causé des dommages importants à la population indigène d'organismes, l'élevage et la réintroduction d'espèces indigènes peuvent aider la population à se rétablir.

- Bioremédiation des zones polluées

Cette stratégie peut aider le milieu physique environnant à se débarrasser des produits chimiques nocifs et apporter un soutien sur le long terme à la restauration de l'écosystème.

- Protection des habitats par la limitation des activités humaines

Limiter l'utilisation d engrais commerciaux par les humains pourrait contribuer à prévenir les dommages causés par ces produits chimiques aux écosystèmes.

En savoir plus

Nous contacter

Nous vous invitons à nous contacter pour en savoir plus sur nos activités et sur les possibilités de collaboration.

Enseignement des sciences et mobilisation du public de l'EMBL

EMBL
Meyerhofstraße 1
69117 Heidelberg,
Allemagne

Tél. : +49 6221 387 8805
E-mail : emblog-ells@embl.org Site
web : embl.org/ells



Bulletin d'information

Inscrivez-vous à notre bulletin d'information pour recevoir régulièrement des informations sur les activités de l'EMBL en matière d'enseignement des sciences et de mobilisation du public, ainsi que sur les ressources pédagogiques et les événements organisés.



<https://www.embl.org/ells/newsletter/>

Conditions d'utilisation

Cette ressource éducative est placée sous la licence Creative Commons (Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale - Partage des Conditions Initiales à l'Identique 4.0) internationale (CC BY-NC-SA 4.0). Pour consulter une copie de cette licence, rendez-vous sur le site <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Version 2 : Septembre 2023