



GOUVERNEMENT

*Liberté
Égalité
Fraternité*



Expérience ChlorISS Prends-en de la graine !

Livret pédagogique de l'expérience

L'expérience ChlorISS est développée par le CNES, en partenariat avec [Sorbonne Université](#), le [ministère de l'Éducation nationale](#) et le [ministère de l'Agriculture, de l'Agro-alimentaire et de la Souveraineté alimentaire](#).

L'astronaute française de l'Agence spatiale européenne (ESA) Sophie Adenot mène la mission *epsilon*, une mission de six mois à bord de la station spatiale internationale (ISS). Parmi les nombreuses expériences scientifiques et technologiques programmées, elle mène une expérience éducative : ChlorISS.

Développée par le Centre national d'études spatiales (CNES), en partenariat avec Sorbonne Université, le ministère de l'Éducation nationale et le ministère en charge de l'Agriculture, l'expérience éducative ChlorISS consiste à faire germer, à bord de l'ISS et sur Terre, des graines d'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) et de mizuna (*Brassica rapa japonica*). L'objectif est de permettre aux élèves d'étudier l'influence de la lumière et les effets de la micropesanteur sur la croissance et le développement d'un végétal. Pour cela, des plantes, placées dans différentes conditions de luminosité, sont observées en parallèle : en micropesanteur à bord de l'ISS, par Sophie Adenot, et au sol, par les élèves accompagnés de leurs professeurs et professeuses.

Ce livret vise à accompagner la mise en œuvre et l'exploitation pédagogique de l'expérience ChlorISS, au service du développement des compétences des élèves. Le protocole de l'expérience est accessible sur [le site du CNES](#).

La démarche proposée ci-après vise à accompagner les équipes pédagogiques dans l'élaboration d'un projet pédagogique cohérent. Les pistes pédagogiques proposées dans ce livret ne sont ni exclusives ni exhaustives. Les professeurs et professeuses ont toute liberté de créer des approches différentes, au service des apprentissages de leurs élèves.

Sommaire

4 Intentions et enjeux pédagogiques

5 Démarche scientifique proposée

- 5 Comprendre le point de départ : le développement vertical des plantes sur Terre
- 6 Formuler des questions scientifiques à explorer
- 6 Concevoir une stratégie
- 8 Formuler des hypothèses et envisager des stratégies expérimentales
- 9 Préparer la mise en œuvre de l'expérience
- 11 Mettre en œuvre l'expérience
- 12 Suivre, collecter et traiter les données
- 15 Analyser et interpréter les données
- 16 Communiquer, restituer et valoriser les travaux
- 16 Bilan et mise en perspective

17 Enrichir le projet par un travail interdisciplinaire

17 Bibliographie à disposition des professeures et professeurs



Intentions et enjeux pédagogiques

L'expérience ChlorISS vise à éveiller la curiosité des élèves et à stimuler leur intérêt pour les sciences, et notamment pour les sciences et techniques spatiales. Au-delà de cet aspect motivant, l'expérience constitue le support de véritables démarches d'apprentissage, fondées sur l'expérimentation, l'exploration, etc. Les élèves y développent notamment des compétences scientifiques, telles qu'expérimenter, observer, mesurer, analyser des résultats et les communiquer, formuler des hypothèses et raisonner, mais aussi des attitudes scientifiques, telles que la curiosité, la rigueur, le doute, etc., qui peuvent être mobilisées dans le cadre du suivi d'un protocole ou de la gestion d'un projet scientifique sur plusieurs jours.

À travers la mise en place de cette expérience, les élèves sont amenés à exercer leur esprit critique et à s'interroger sur la manière dont se construit le savoir scientifique. Ils prennent conscience de l'importance de la comparaison, de la reproductibilité des résultats, du contrôle des variables, de la traçabilité des opérations, de la contextualisation des données recueillies, etc. Le projet contribue à l'acquisition de notions et de compétences des différents programmes scolaires.

Démarche scientifique proposée

La démarche proposée vise à faciliter la mise en œuvre de l'expérience ChlorISS en classe, en permettant aux élèves de s'approprier le protocole. Cette démarche peut être adaptée en fonction du niveau de classe des élèves, des stratégies et des choix pédagogiques.

Il ne s'agit pas pour autant d'une démarche linéaire et figée : la démarche proposée repose sur des allers et retours continus entre la formulation des questionnements, l'élaboration des hypothèses, la mise en œuvre des activités de recherche et l'analyse des résultats, permettant de valider ou d'invalides les hypothèses énoncées en classe, d'améliorer progressivement la démarche et d'enrichir la compréhension de phénomènes complexes.

Comprendre le point de départ : le développement vertical des plantes sur Terre

Sur Terre, la croissance verticale des plantes chlorophylliennes est déterminante, car elle permet leur survie :

- les racines s'orientent vers le bas, assurant l'ancrage, l'absorption de l'eau et des ions minéraux indispensables à la nutrition de la plante ;
- les tiges croissent préférentiellement vers le haut, ce qui permet une orientation optimale des feuilles vers la lumière, condition indispensable à la photosynthèse.

Cette organisation résulte de l'action combinée de deux facteurs majeurs :

- la gravité, qui oriente la croissance des racines et des tiges (gravitropisme) ;
- la lumière, qui oriente la croissance des tiges et des feuilles (phototropisme).

Pour aller plus loin – les plantes, partenaires indispensables des voyages spatiaux

Au-delà de la recherche en sciences fondamentales, l'expérience ChlorISS peut ouvrir une réflexion plus large sur le rôle des plantes dans la conquête spatiale. En effet, depuis les débuts des vols habités, les plantes accompagnent les humains dans l'Espace, et elles sont désormais au cœur des projets de missions de longue durée, notamment vers Mars : une telle mission, estimée à environ trois ans, ne pourra pas reposer sur des ravitaillements réguliers. En effet, le record actuel de séjours dans les stations spatiales, qui est d'environ 12 mois, comprend de fréquents ravitaillements qui assurent un approvisionnement régulier en éléments vitaux, tels que l'oxygène, l'eau et la nourriture ainsi que l'évacuation des déchets organiques (urines, fèces, etc.). Ces consommables représentent une masse annuelle de 12 tonnes par personne (Barta et Henninger, 1994). Par conséquent, rien que la charge nécessaire pour les besoins vitaux d'un équipage de six personnes rend les missions martiennes inenvisageables dans de telles conditions.

En raison de leurs aptitudes physiologiques, les plantes sont destinées à occuper une place centrale dans les supports de vie, capables de recycler et de produire sur place ce qui est nécessaire à la survie de l'équipage, plutôt que de tout importer depuis la Terre. Dans ces systèmes, les plantes ne sont pas seulement des « salades de l'espace » : elles deviennent le socle d'un écosystème artificiel. Par la photosynthèse, elles produisent du dioxygène à partir du dioxyde de carbone et de la biomasse comestible, et contribuent au recyclage de l'eau. Certains projets développés pour la colonisation martienne s'appuient sur des chaînes complètes où plantes et micro-organismes assurent à la fois nutrition, recyclage, production de dioxygène et valorisation de ressources locales, par

exemple le sol martien appelé régolithe. Dans cette perspective, comprendre finement comment les plantes perçoivent la gravité, la lumière, les radiations et les contraintes d'un milieu confiné devient un enjeu scientifique et technologique majeur pour concevoir des cultures stables, productives et durables en environnement spatial.

Source : Carnero Diaz, E., Le Disquet, I., Legué, V., & Pereda-Loth, V. [Des hommes et des plantes dans l'espace](#).

Formuler des questions scientifiques à explorer

Que se passe-t-il lorsque ces paramètres (gravité et lumière) sont modifiés ? Comment les plantes agissent et/ou réagissent-elles lorsque le champ de pesanteur est modifié, comme à bord de l'ISS ? La lumière devient-elle alors le seul facteur guidant leur développement dans leur milieu de vie ?

L'expérience ChlorISS propose aux élèves d'explorer ces questions en comparant le comportement :

- des cultures réalisées sur Terre ;
- des cultures réalisées en micropesanteur à bord de l'ISS.

Concevoir une stratégie

Pour que les élèves s'approprient l'expérience, il est possible de les amener à identifier les grands principes de l'expérience et les paramètres étudiés.

Paramètres « lumière » et « pesanteur »

- Sur Terre :
 - le paramètre « lumière » : il est techniquement simple de faire varier ce paramètre (obscurité totale, éclairage dirigé, filtres colorés permettant d'étudier l'influence des longueurs d'onde lumineuses) ;
 - le paramètre « pesanteur » : sur Terre, le champ de gravité est constant, il n'est donc pas possible de s'en affranchir. Toutefois, il est possible de modifier l'orientation de la plante par rapport à la direction de la pesanteur (en changeant l'orientation du support de la plante ou de la graine).
- À bord de l'ISS :
 - le paramètre « lumière » : comme sur Terre, il est possible de faire varier les conditions lumineuses (obscurité totale, éclairage dirigé, filtres colorés permettant d'étudier l'influence des longueurs d'onde lumineuses) ;
 - le paramètre « pesanteur » : les plantes se développent en micropesanteur. Bien que la gravité terrestre soit toujours présente, son effet est quasi nul du fait de la chute libre de l'ISS (voir encadré ci-dessous Mise au point – gravité, impesanteur et micropesanteur).

Remarques : l'influence de la lumière peut être étudiée directement sur Terre. En revanche, pour étudier l'effet de la pesanteur, il faut comparer les résultats obtenus sur Terre à ceux observés à bord de l'ISS. Sur Terre, il est toutefois possible de faire varier l'orientation de la plante par rapport à la gravité pour observer ses réactions. L'étude de la croissance du variant PGM (qui présente un défaut de synthèse de l'amidon) et sa comparaison avec le type sauvage permet également de comprendre l'effet de la pesanteur sur la croissance des plantes.

Mise au point – gravité, impesanteur et micropesanteur

L'ISS orbite autour de la Terre à environ 400 km d'altitude. À cette distance, l'attraction gravitationnelle terrestre reste très importante : elle représente environ 90 % de la gravité mesurée à la surface de la Terre. La gravité n'est donc pas absente à bord de l'ISS.

Sur Terre, la réaction du sol nous permet de rester à la surface de la Terre parce qu'elle s'oppose à l'attraction gravitationnelle (qui, en théorie, nous ferait nous enfoncer dans la planète). Dans l'ISS, la gravité n'est pas nulle, mais ses effets sont masqués par le mouvement de la station autour de la Terre. En effet, l'ISS se déplace en orbite à grande vitesse, et sous l'action de la gravité, l'ISS est en chute libre permanente : le poids des objets n'y est alors plus ressenti, cet état est appelé impesanteur.

Cependant, cette impesanteur n'est pas totale, c'est pourquoi le terme micropesanteur est préféré.

Pour plus d'informations : page [C'est quoi l'impesanteur ?](#) accessible sur le site du CNES.

L'effet du spectre lumineux

L'expérience repose également sur la comparaison de différentes conditions lumineuses afin d'étudier leur influence sur la croissance des plantes. Quatre situations sont mises en œuvre : lumière blanche, lumière rouge (obtenue à l'aide d'un filtre rouge), lumière bleue (obtenue à l'aide d'un filtre bleu) et obscurité totale.

Ces quatre conditions expérimentales sont réalisées à la fois sur Terre et à bord de l'ISS. Cette double mise en œuvre permet de comparer les réponses des plantes selon les caractéristiques du rayonnement lumineux, en présence d'un repère gravitaire (sur Terre) ou en situation de micropesanteur (dans l'ISS). L'objectif est ainsi d'analyser le rôle des différentes longueurs d'onde lumineuses dans les mécanismes de croissance et d'orientation selon les organes végétaux (phototropisme).

Point de vigilance – nature de la lumière et réponses des plantes

La lumière blanche est une lumière polychromatique, c'est-à-dire qu'elle est composée de l'ensemble des longueurs d'onde du spectre visible (dont notamment le bleu et le rouge). L'utilisation de filtres colorés permet de sélectionner préférentiellement certaines longueurs d'onde, mais ne correspond pas à une lumière « plus faible » ou « plus forte » : il s'agit d'une lumière ayant des caractéristiques différentes (les longueurs d'onde). Les plantes n'utilisent pas les mêmes longueurs d'onde pour tous leurs processus biologiques, tels que la photosynthèse, la germination, l'orientation des organes.

Le choix des deux espèces végétales

L'expérience ChlorISS s'appuie sur deux espèces distinctes, choisies pour leurs usages pédagogiques différents :

- L'arabette des dames (*Arabidopsis thaliana*) : c'est la plante modèle de référence en biologie végétale (génome entièrement séquencé, cycle de vie court, nombreux variants disponibles). Son utilisation permet d'introduire une dimension génétique au projet, puisque le kit contient des graines de type sauvage (appelées WT, pour *wild type*) et des graines du variant PGM (phosphoglucomutase). Ce variant présente un défaut de synthèse de l'amidon. Or, l'amidon est indispensable à la formation des statolithes (amyloplastes riches en amidon), organites impliqués dans la perception

de la gravité chez la plante. La comparaison entre le variant PGM et le type sauvage, réalisée sur Terre, permet d'étudier les effets d'une perception fortement réduite de la pesanteur.

- Le mizuna (*Brassica rapa var. japonica*) : appartenant à la même famille que l'arabette des dames, cette variété de chou japonais possède des graines plus grosses que celles de l'arabette des dames. La manipulation des graines d'arabette des dames (très petites) étant délicate, le mizuna permet une mise en œuvre plus aisée pour les élèves, notamment aux cycles 2 et 3, tout en offrant des résultats comparables.

Mise au point – l'utilisation d'un variant

Un variant est un organisme dont le patrimoine génétique diffère de celui de la population de référence en raison de variations apparues, par des mutations spontanées et/ou par des recombinaisons génétiques lors de la reproduction. Ces variations constituent un moteur de l'évolution et sont à la base de la biodiversité. Dans ce cadre, le variant est un mutant *EMS* obtenu par l'utilisation d'un agent mutagène (l'éthyl-méthanesulfonate, d'où le nom *EMS*) qui provoque des mutations ponctuelles de type G/C => A/T.

La différence entre un variant et un organisme génétiquement modifié (OGM) repose sur l'origine des modifications génétiques. Contrairement à un variant, un OGM est un organisme dont le génome a été modifié intentionnellement par l'être humain, à l'aide de techniques de génie génétique, qui permettent d'introduire, de supprimer ou de modifier de manière ciblée un ou plusieurs gènes, parfois issus d'une autre espèce.

Dans le cadre de cette expérience, il s'agit bien d'un variant, puisque la variation génétique a été obtenue de manière aléatoire par l'utilisation d'un agent mutagène.

Formuler des hypothèses et envisager des stratégies expérimentales

Les élèves proposent des hypothèses sur le développement des graines, au sol et dans l'ISS, en fonction de différentes conditions, puis sont amenés à réfléchir aux stratégies permettant d'éprouver leurs hypothèses : comment positionner les boîtes ? Quelles mesures et observations faire pour étudier la croissance des racines ou des tiges ? Quels résultats vont pouvoir être obtenus ? Comment comparer et analyser les résultats ? Quels dispositifs pour photographier ou filmer les observations ?

Point de vigilance – adapter l'exploitation pédagogique au niveau de classe

L'exploitation pédagogique de l'expérience dépend du niveau de classe des élèves et des notions scientifiques déjà construites et de celles à construire. Au cycle 2, il est préférable de mener un travail sur le développement des graines en fonction de la lumière, la notion de gravité étant en effet trop complexe. Au cycle 3, il semble possible d'introduire la notion de gravité. En fin de cycle 4, l'expérience peut être enrichie par une dimension génétique, en exploitant la comparaison entre le type sauvage et le variant PGM. Au lycée, l'exploitation peut mobiliser une approche génétique et moléculaire plus approfondie (rôle des gènes impliqués dans la synthèse de l'amidon, fonctionnement des statolithes, etc.). Tout au long du parcours, la notion de gravité peut être approfondie.

Préparer la mise en œuvre de l'expérience

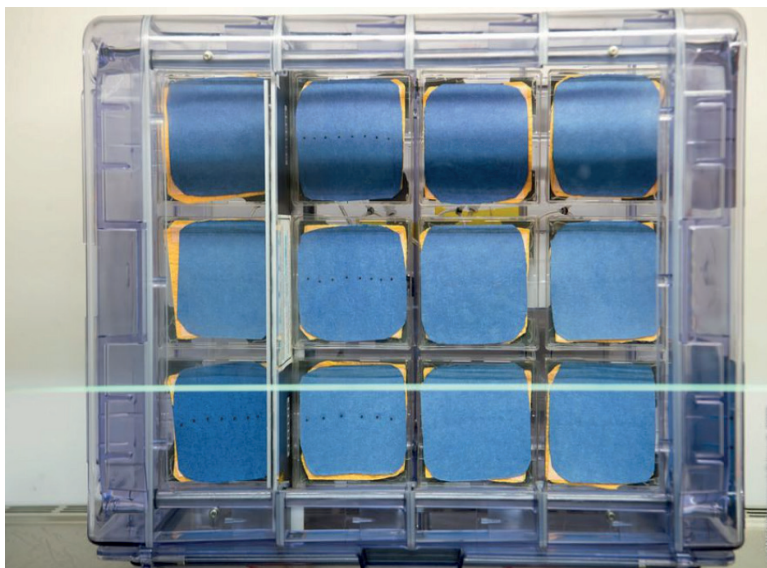
En amont de la réalisation des expériences, des temps consacrés à l'élaboration de la stratégie permettent aux élèves de s'approprier les objectifs de l'expérience, les paramètres étudiés ainsi que le protocole de l'expérience ChlorISS du CNES, et de préparer sa mise en œuvre technique au sein de la classe.

Comprendre le dispositif expérimental utilisé à bord de l'ISS

Afin de favoriser l'appropriation du protocole par les élèves et de donner du sens à la reproduction du dispositif au sol, les élèves étudient le dispositif expérimental utilisé à bord de l'ISS et la manière dont il permet d'étudier les paramètres « lumière » et « pesanteur ».

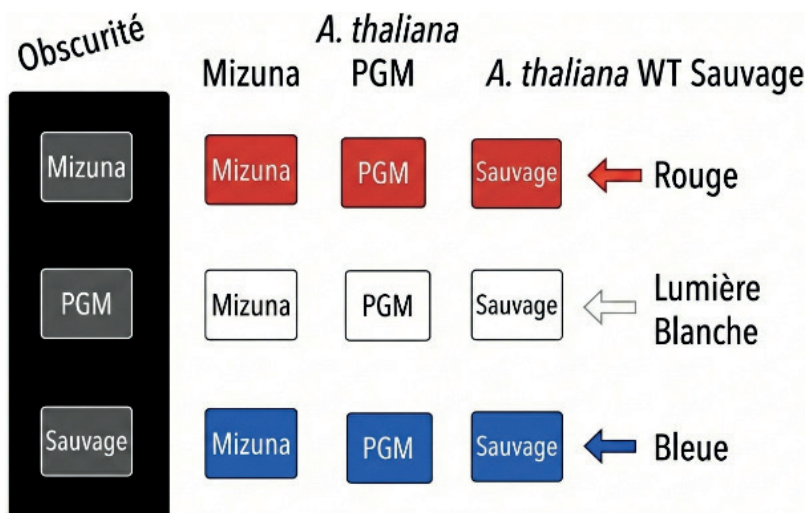
À bord de l'ISS, les boîtes de culture contenant les graines ont été disposées dans la boîte ChlorISS (figure 1). Pour des raisons de sécurité à bord, cette boîte a été conçue pour rester fermée hermétiquement tout au long du vol (voir l'encadré ci-dessous).

Figure 1 – modèle de vol ChlorISS de la mission epsilon. Vue de face et de devant Crédits : CNES/GRIMAUULT Emmanuel, 2025 (à gauche). Répartition des boîtes de culture (à droite).



La répartition des boîtes permet de soumettre simultanément les plantes à différentes conditions lumineuses (figure 2).

Figure 2 – répartition des boîtes de culture.



Le début de l'expérience correspond au moment où Sophie Adenot déclenche le dispositif d'hydratation des graines dans l'ISS.

Mise au point – un dispositif d'étanchéité pour répondre aux contraintes d'une expérience en micropesanteur

Comme pour toutes les expériences menées en micropesanteur, la boîte ChlorISS doit être fermée avec un dispositif d'étanchéité. En effet, isoler totalement la culture de l'atmosphère de la station permet de prévenir tout risque de contamination sanitaire en empêchant la dispersion de spores fongiques ou de poussières de substrat, qui pourraient avoir des conséquences sur la santé de l'équipage. Pour cela, la conception de la boîte a demandé de nombreux essais, notamment pour tester son étanchéité, au sein du [CADMOS](#) (centre d'aide au développement des activités en micropesanteur et des opérations spatiales), une structure opérationnelle du CNES qui permet aux scientifiques de préparer et de réaliser une grande variété d'expériences en micropesanteur, que ce soit à bord de la station spatiale internationale, de l'Airbus A300-Zéro G, ou parfois de capsules automatiques.

Concevoir une boîte ChlorISS

Afin de reproduire au sol les conditions de l'expérience spatiale et de tester séparément les paramètres étudiés, une boîte ChlorISS peut être conçue avec les élèves. Son objectif est de pouvoir étudier l'influence de la lumière (couleur, présence/absence) et de faire varier l'orientation des plantes par rapport à la direction de la pesanteur (en changeant l'orientation des boîtes).

La boîte peut être construite dans le cadre d'une démarche technologique (enseignement de sciences et technologie au cycle 3, technologie au cycle 4, sciences et technologies de l'industrie et du développement durable) ou à l'enseignement agricole dans le cadre de l'éducation socioculturelle.

La boîte ChlorISS à créer en classe intègre :

- un système d'obscurité totale ;
- trois filtres fournis (bleu, incolore, rouge) permettant de tester l'influence du spectre lumineux (longueurs d'onde) sur la croissance des plantes ;
- la possibilité de faire varier l'orientation des plantes par rapport au champ de gravité.

Étape 1 – prendre les dimensions de la boîte

En fonction des dimensions de la boîte, la disposition des boîtes de culture est définie. La boîte est divisée en deux parties (une partie à l'obscurité et une partie éclairée). La partie éclairée est divisée en trois zones (une par type de graine).

Étape 2 – prévoir une variation de la direction de l'éclairage

La lumière ambiante de la classe peut suffire (il n'y a pas de source lumineuse spécifique dans l'ISS). Toutefois, il est possible de prévoir un éclairage supplémentaire, si cela est nécessaire.

Comme cela est indiqué dans le protocole du CNES, il est demandé, au cours de l'expérience, de modifier l'orientation de la boîte afin de changer la direction de la source lumineuse ou de déplacer la source lumineuse sans changer l'orientation de la boîte. Les deux dispositifs ne testent pas les mêmes hypothèses et conduisent à des attendus différents. En effet, la rotation de la boîte modifie simultanément l'orientation par rapport à la gravité et la direction du stimulus lumineux, tandis que le déplacement de la source lumineuse modifie uniquement la direction du stimulus lumineux. Cela est à anticiper dès la conception de la boîte.

Étape 3 – création des séparations opaques

Une cloison opaque est créée. Elle permet d'isoler les graines placées dans l'obscurité (à gauche) des graines placées à la lumière (à droite), comme sur la figure 2.

Étape 4 – création du support pour les filtres de couleurs

Il est possible de découper le carton en trois espaces de taille identiques afin d'y fixer les filtres (bleu, transparent et rouge). Les boîtes de culture (le plus simple est d'utiliser des boîtes de Pétri fermées) sont fixées dans la boîte ChlorISS, de manière à ce que la croissance des plantes soit verticale.

La boîte ChlorISS peut être personnalisée avec les élèves.

Préparer le dispositif expérimental

L'expérience se réalise en boîte de Pétri, seul dispositif permettant d'observer simultanément le développement racinaire et des parties aériennes, et ainsi de déterminer la direction de la croissance, et éventuellement les angles de courbure.

Avant de mener l'expérience, les élèves s'approprient :

- le matériel ;
- les gestes techniques ;
- l'enchaînement des étapes du protocole CNES.

Il est possible d'organiser :

- une répartition des tâches au sein de la classe ;
- une mutualisation entre plusieurs classes ;
- des adaptations selon les niveaux et une mise en lien avec les objectifs des différents programmes.

Les élèves sont également sensibilisés :

- au respect des conditions expérimentales ;
- aux règles de sécurité ;
- à la rigueur nécessaire pour obtenir des résultats exploitables.

Mettre en œuvre l'expérience

Le protocole de l'expérience est accessible sur le [site du CNES](#).

Quelques points d'attention pour les manipulations :

- orientation des boîtes de culture : elles doivent être placées à la verticale ;
- humidification des supports : dans l'ISS, l'humidification est réalisée en une seule mise en eau par Sophie Adenot au lancement de l'expérience, au sol, un maintien à saturation est nécessaire ;
- manipulation des graines : pour éviter que les graines ne collent ou ne se déplacent à cause de l'électricité statique, on peut utiliser un cure-dent légèrement humide afin de neutraliser les charges électriques et faciliter leur manipulation ;
- conditions d'hygiène : la désinfection du plan de travail et des mains, ainsi que le lavage préalable du matériel, sont indispensables. Lorsque cela est possible, une stérilisation est préférable, par exemple en plaçant les cure-dents dans un pot en verre fermé, ainsi que les pinces, dans un bain-marie à ébullition pendant 20 minutes.

Suivre, collecter et traiter les données

Le suivi des observations constitue une étape importante de la démarche, puisqu'elle permet d'obtenir des résultats exploitables et de comparer les différentes conditions expérimentales.

Cette étape permet aux élèves d'apprendre à :

- manipuler pour observer et mesurer ;
- sélectionner les données pertinentes en fonction des hypothèses travaillées ;
- organiser les relevés de données (tableaux, codages des conditions expérimentales) ;
- faire preuve de rigueur (précision des gestes, mesures à heure fixe, conditions identiques, etc.) ;
- produire des tableaux et des graphiques pour présenter et exploiter les résultats ;
- comparer plusieurs groupes expérimentaux (filtres colorés, orientation des tiges et des racines, variant PGM *versus* sauvage).

Quelques pistes sont proposées ci-dessous. Elles sont à adapter en fonction du niveau de classe et du projet pédagogique.

Collecter des données

Pour collecter les données, il est recommandé de réaliser des photographies régulières et d'effectuer les mesures directement sur celles-ci, en veillant à utiliser un étalon de taille connue. Il est aussi possible de réaliser des mesures directement sur les plantes (orientation des tiges et des racines, angles de courbure), notamment à partir des graines de mizuna pour les classes des cycles 2 et 3.

Quelques pistes :

- cycle 3 : prises de photographies, report simple des mesures, lecture de graphiques ;
- cycle 4 : réalisation de tableaux et de graphiques, calculs de moyennes, etc. ;
- lycée : analyses statistiques simples, taux de croissance, représentations graphiques plus complexes, etc.

Les résultats sont consignés dans des tableaux papier ou numériques. Un exemple est proposé ci-dessous et est à adapter en fonction du niveau de classe des élèves et des choix pédagogiques.

Point de vigilance : rendre exploitables les données par les élèves nécessite de choisir ce que l'on observe et mesure, par exemple :

- la croissance dirigée vers la Terre (oui/non) ;
- la croissance dirigée vers la source de lumière (oui/non) ;
- la présence d'un angle de courbure (oui/non) ;
- l'angle de courbure (en degrés) ;
- la taille des racines (en mm) ;
- la taille des tiges (en mm).

Figure 3 – exemple d'un tableau pour collecter les résultats des expériences menées au sol.

	<i>A. thaliana</i> WT				<i>A. thaliana</i> PGM				Mizuna			
	Bleu	Blanc	Rouge	Obscurité	Bleu	Blanc	Rouge	Obscurité	Bleu	Blanc	Rouge	Obscurité
Croissance des racines dirigée vers le bas (vers la Terre) : oui/non												
Angle de courbure des racines (valeur mesurée en degrés, 0 en l'absence de courbure)												
Croissance des tiges dirigée vers la source lumineuse (oui/non)												
Angle de courbure des tiges : valeur mesurée (0 en l'absence de courbure)												

Prendre des photographies des boîtes de Pétri

La prise de photographies régulières permet de suivre l'évolution de la croissance et de l'orientation des plantes au cours du temps, et d'en garder une trace. L'utilisation d'un téléphone portable maintenu sur un support fixe permet d'obtenir une prise de vue strictement perpendiculaire aux boîtes de culture. Cette précaution évite les biais liés à l'angle de vue et garantit des mesures fiables des longueurs et des angles de courbure observés. Apposer un étalon de taille connue (une règle graduée, par exemple) à côté de la boîte permet ensuite d'effectuer des mesures sur la photographie.

Point d'attention : lors de la prise de vues, il est important de laisser les boîtes en position verticale. Dans le cas contraire, les plantes pourraient percevoir des signaux susceptibles d'interférer avec ceux de la manipulation.

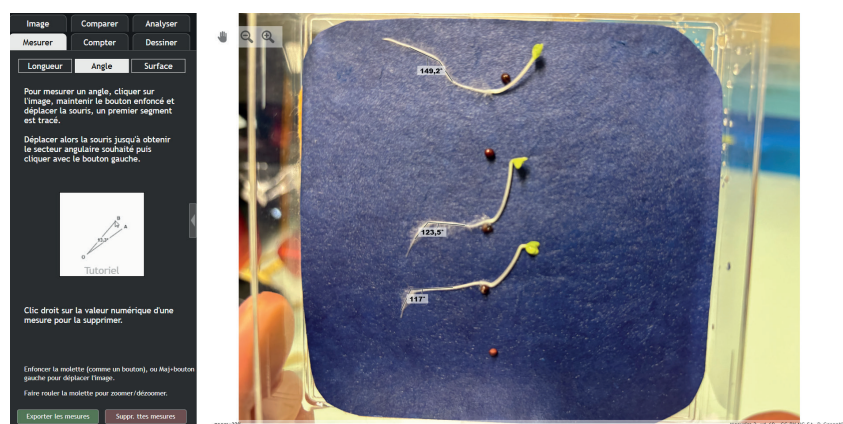
Il est également possible d'utiliser des caméras fixes dont le logiciel permet de réaliser des vidéos accélérées (mode *time-lapse*).

Point de vigilance : des observations régulières sont nécessaires, particulièrement lorsque l'orientation des boîtes de culture est modifiée : la courbure des organes végétaux peut apparaître en quelques heures seulement après le changement d'orientation.

Mesurer des angles de courbure avec le logiciel Mesurim2

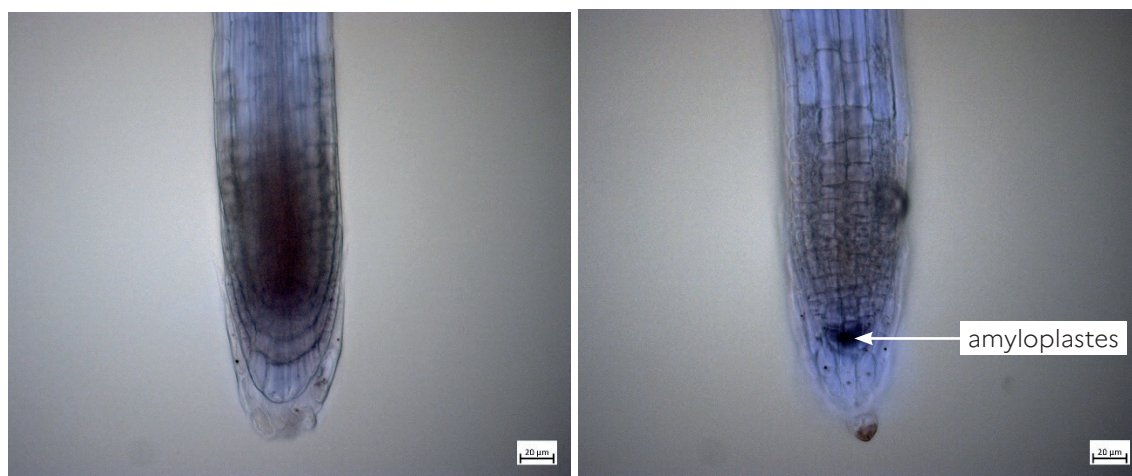
Des outils numériques, comme [Mesurim2](#), peuvent être utilisés pour réaliser des mesures.

Figure 4 – exemple de mesures d'angles avec le logiciel Mesurim2.



Révéler et observer au microscope la présence ou l'absence d'amidon dans les amyloplastes de la coiffe des racines

Figure 5 – photographies d'observation au microscope optique de la coiffe racinaire d'un variant PGM (à gauche) et WT (à droite), après coloration au Lugol (marquage de l'amidon en couleur bleu nuit). Grossissement x 400.



Partager ses données et exploiter les données obtenues par d'autres

La mise en commun des résultats permet d'augmenter le nombre d'observations, de calculer des moyennes et des médianes, d'analyser la dispersion des mesures et, ainsi, d'améliorer la fiabilité des résultats et des conclusions. La mise en commun peut se faire entre plusieurs classes d'un même établissement, voire entre établissements d'un même secteur, par exemple dans le cadre d'une liaison école/collège ou collège/lycée.

Afin d'inscrire le projet dans une démarche de sciences participatives, un dispositif dédié au partage des données pourra être proposé. La collecte et la comparaison des données sont facilitées par l'utilisation d'un nombre restreint de critères simples :

- La racine s'est-elle développée globalement vers le bas (vers la Terre) ?
- Quel est l'angle de courbure de la racine ? (indiquer uniquement un chiffre arrondi à l'unité, 0 si aucune courbure observée) ;

- La croissance de la tige s'est-elle faite de manière dirigée vers la lumière ?
- Quel est l'angle de courbure de la tige ? (indiquer uniquement un chiffre arrondi à l'unité, 0 si aucune courbure observée).

La mise en commun des données permet une exploitation statistique (comparaison des effectifs, calcul de moyennes, réalisation de tests statistiques), qui contribue à réduire l'effet des variations individuelles, et ainsi à renforcer la fiabilité des conclusions.

Analyser et interpréter les données

Les élèves comparent les résultats obtenus aux hypothèses formulées, afin de répondre aux questions qu'ils et elles se sont posées : « Les tiges éclairées latéralement s'orientent-elles vers la lumière ? », « Les variants PGM montrent-ils un retard ou une diminution de la réponse au gravitropisme ? », « Les plantules en micropesanteur (ISS) présentent-elles une croissance désorientée ? », « Les filtres colorés modifient-ils différemment la croissance et la forme des plantules ? ».

L'interprétation mobilise :

- les mécanismes biologiques étudiés (phototropisme, gravitropisme) ;
- des notions liées à la reproductibilité de l'expérience, aux marges d'erreur, etc. ;
- la comparaison avec les résultats obtenus à bord de l'ISS ou dans d'autres classes.

Des pistes pédagogiques plus précises, en lien avec les enseignements disciplinaires et en fonction des niveaux de classe, sont proposées dans des livrets complémentaires.

Mise au point – la perception de la gravité au niveau des racines des plantes

Les plantes disposent d'un système de perception de la gravité reposant sur des organites appelés statolithes, qui correspondent à des amyloplastes riches en amidon. Ces organites sont présents dans des cellules spécialisées, les statocytes, situées notamment dans la coiffe racinaire (au niveau de la columelle) et dans l'endoderme des jeunes tiges. La masse des statolithes, liée à leur teneur en amidon, leur permet de se déplacer sous l'effet de la gravité. Lors d'un changement d'orientation de la plante, ils migrent vers la nouvelle « face basse » de la cellule, par rapport au champ de gravité.

Ce déplacement déclenche une cascade de signaux cellulaires conduisant à une modification de la distribution de l'auxine, hormone impliquée dans la croissance. Cette répartition inégale de l'auxine entraîne une croissance différentielle des tissus. Au niveau des racines, ce mécanisme conduit à une courbure vers le bas, correspondant à un gravitropisme positif.

Au niveau des tiges, la croissance vers le haut résulte de la combinaison de plusieurs tropismes : le gravitropisme négatif intervient, mais le phototropisme positif, c'est-à-dire la croissance orientée vers la lumière, est généralement prépondérant.

Le variant PGM, incapable de produire suffisamment d'amidon, produit des amyloplastes très légers, qui ne sédimentent plus efficacement. La perception de la gravité est alors fortement diminuée, ce qui se traduit par une réponse gravitropique retardée, pouvant dépasser la durée de l'expérimentation.

Communiquer, restituer et valoriser les travaux

Les élèves peuvent présenter leur travail sous différentes formes, adaptées au niveau, aux ressources de la classe et aux choix pédagogiques :

- fiches de relevés annotées et illustrées ;
- carnets de bord individuels ou collectifs ;
- affiches ou posters scientifiques ;
- présentations orales (diaporama, exposés ou soutenances) ;
- podcasts ou capsules vidéo, interviews fictives, journaux de bord audio ;
- articles pour le journal, le site de l'école ou de l'établissement ;
- exposition, etc.

Ces restitutions encouragent l'appropriation de l'expérience, la créativité, et le développement d'autres compétences, telles que celles liées à la communication orale et à la communication écrite. Ces restitutions participent à la valorisation du projet et au rayonnement de l'école et de l'établissement.

Bilan et mise en perspective

La séquence se termine par un temps de bilan et de prise de recul, qui peut s'appuyer sur les questionnements suivants :

- Quelles hypothèses ont été validées ou infirmées ? Quelles nouvelles hypothèses pourraient être énoncées ?
- Quels résultats sont fiables et lesquels ne le sont pas ? À quelles conditions ces résultats peuvent-ils être considérés comme fiables ?
- Quelles limites reconnaît-on à la démarche menée en classe ?
- Quelles démarches ont permis d'obtenir les données les plus pertinentes ?
- Comment expliquer les différences entre les résultats obtenus sur Terre et ceux obtenus à bord de l'ISS ?
- Peut-on généraliser ces résultats à d'autres espèces ?
- Qu'est-ce qui a été le plus surprenant ?
- Qu'avons-nous appris ?
- Quelles autres questions cela nous pose-t-il ?
- Quelles applications concrètes ces expériences pourraient-elles avoir, par exemple pour des missions spatiales ?
- Des questions éthiques, sur l'intérêt de travailler sur un mutant génétique, sur l'introduction du vivant dans l'espace, etc.

Un bilan collectif peut être formalisé sous forme de trace écrite.



Enrichir le projet par un travail interdisciplinaire

Un travail interdisciplinaire (sciences, technologie, mathématiques, documentation, histoire-géographie, français, arts plastiques) ou autour d'éducatons transversales (éducation au développement durable, compétences numériques du CRCN), peut enrichir le projet. Des pistes pédagogiques adaptées aux différents niveaux de classe et en lien avec différents programmes d'enseignement et référentiels sont proposées dans des livrets complémentaires.

Bibliographie à disposition des professeures et professeurs

- Reportage sur la [photothèque/vidéothèque](#) du CNES.
- Site [CADMOS](#) – CNES.
- [Le gravitropisme des végétaux](#). ENS – Planet-Vie.
- [La morphogenèse végétale : Action dirigée des facteurs de l'environnement](#). ENS – Planet-Vie.
- « Phototropism of *Arabidopsis thaliana* in microgravity and fractional gravity on the International Space Station », Millar, K. D. L., Johnson, C. M., Edelmann, R. E., & Kiss, J. Z., *Planta*, 2016, vol. 243(5), p. 1313–1324.
- « Gravitropism in roots of intermediate-starch mutants of *Arabidopsis* », Kiss, J. Z., Wright, J. B., & Caspar, T., *Physiologia Plantarum*, 1996, vol. 97(2), p. 237–244.
- « [A novel blue-light phototropic response is revealed in roots of *Arabidopsis thaliana* in microgravity](#) », Vandenbrink, J. P., Herranz, R., Medina, F. J., Edelmann, R. E., & Kiss, J. Z., *Planta*, 2016, vol. 244, p. 1–15.