

Génodique

L2 Mineure Environnement, UE Projet

Gajanaa Kenkatharan, Maylis Leterrier, Maxence Deroome

1. Résumé du projet :

Notre projet s'intéresse à la théorie de la génodique, développée à partir de 1970 par le physicien français Joël Sternheimer (1943-2023), élève de Louis de Broglie, lauréat du prix Nobel de physique en 1929 pour ses travaux sur les ondes de matière. Cette théorie repose sur l'idée d'utiliser la séquence sonore, ou lumineuse, associée aux acides aminés d'une protéine cible afin d'en stimuler la biosynthèse, ou au contraire de l'inhiber au moyen d'une séquence miroir. Il s'agit du « procédé de régulation épigénétique de la biosynthèse d'une protéine par résonance d'échelle ».

Concrètement, les longueurs d'onde de De Broglie attribuées à chaque acide aminé de la protéine sont traduites en une mélodie, appelée « protéodie », ou en une séquence de flashes lumineux.

Dans le domaine de l'agroécologie, cette théorie pourrait notamment permettre d'optimiser les rendements agricoles en renforçant la protection des cultures face aux stress biotiques et abiotiques, tout en favorisant leur potentiel de croissance.

Dans un contexte marqué par le changement climatique et par les limites de l'agriculture conventionnelle — usage intensif d'engrais, appauvrissement des sols et pollution chimique —, la génodique apparaît comme une piste d'innovation prometteuse, à la fois non invasive, durable et économique.

L'objectif de ce projet est de tester scientifiquement cette méthode au moyen d'une expérience en laboratoire portant sur la germination de graines de petits pois soumises à un stress hydrique. Nous reprendrons le protocole mis au point dans l'étude intitulée « Diffusions of Sound Frequencies Designed to Target Dehydrins Induce Hydric Stress Tolerance in *Pisum sativum* Seedlings », publiée dans la revue *Heliyon* (vol. 6, no 9, septembre 2020). Cette étude a été menée par Victor Prevost, ingénieur chez Genodics. Par ailleurs, nous souhaiterions également observer les dispositifs installés sur le terrain par l'entreprise Genodics, directement chez un agriculteur partenaire.

Ce projet s'inscrit dans une démarche interdisciplinaire, à la croisée de la biologie, de la physique et des sciences de l'environnement. Il vise à évaluer avec rigueur la théorie de la génodique, une approche encore marginale, mais porteuse d'innovations potentielles pour l'agriculture de demain.

2. Protocole de mise en œuvre du projet

1. Protocoles

1. Protocole de plantation

1. Se laver les mains.
2. Préparer le matériel : vermiculite, bac de trempage, cadre de drainage, multi-plantoir, quatre quarts de godet et graines.
3. Peser les graines afin de constituer quatre groupes de 16 graines, pour une masse d'environ 4,23 g par groupe (soit environ 0,28 g par graine).
Noter dans le cahier la masse de chaque groupe, puis les classer du plus lourd au plus léger en leur attribuant les couleurs bleu, gris, rouge et orange.
Écarter les plus petites graines, jugées non significatives.
4. Remplir les bacs de vermiculite à ras bord, sans tasser, puis les peser.
5. Remplir le bac d'eau avec un volume précis permettant une immersion des godets jusqu'à la moitié de leur hauteur (4L ici). Vérifier si possible l'horizontalité à l'aide d'un niveau à bulle, afin de garantir une hauteur de colonne d'eau homogène.
6. Mettre les bacs à tremper dans l'eau, sur les cadres de drainage, pendant environ 45 secondes, pour un volume compris entre 825 et 875 mL d'eau par bac.
Secouer ensuite les bacs jusqu'à ce qu'aucune eau ne s'écoule. Cela correspond, dans nos conditions, à environ 850 mL d'eau par bac. Ajuster si nécessaire le niveau d'eau.

7. Noter la masse des bacs humides afin de déterminer la masse d'eau absorbée, par différence entre la masse humide et la masse sèche mesurée précédemment.
8. Se laver les mains avant de manipuler les graines, puis réaliser les trous à l'aide du multi-plantoir.
Les trous doivent avoir une profondeur correspondant à la moitié de la hauteur de vermiculite, soit environ 3 cm dans ce protocole.
9. Déposer les graines au fond des trous. Les enfoncer si nécessaire à l'aide d'une pince ou du dos d'un crayon propre.
10. Reboucher soigneusement les trous, de manière à éviter toute poche d'air, sans pour autant tasser la vermiculite.
11. Placer les bacs dans la chambre de culture, toujours dans le même ordre et centrés sur la grille.
12. Sécher et ranger le matériel, puis nettoyer la paillasse.

Remarque : La hauteur de la colonne d'eau est un paramètre important, car elle influence la remontée de l'eau dans la vermiculite : plus cette hauteur est importante, plus l'eau atteint rapidement la surface.

2. Protocole de diffusion sonore

13. Renommer en son01.wav le fichier audio correspondant à la protéodie à diffuser une fois par jour pendant la semaine de germination.

14. Noter la taille du fichier en octets afin de pouvoir identifier, à la fin de l'expérience, s'il s'agit du fichier témoin, d'inhibition ou de stimulation.
15. Une fois le protocole de plantation terminé, brancher le haut-parleur et le chargeur au système de diffusion, puis insérer la carte SD dans le microcontrôleur.
16. Vérifier que le son nommé coucou.wav — ici un bruit d'oiseau — est bien lu, afin de s'assurer du bon fonctionnement du système de diffusion.
17. Refermer la chambre de culture. La protéodie sera diffusée cinq minutes après le son coucou, puis toutes les 24 heures.

3. Protocole de récolte

1. Prendre des photos des pousses avant toute manipulation.
2. Sortir les germes un par un.
3. Noter, pour chaque bac, le nombre de graines : pourries (P), non germées (NG), ayant germé mais n'ayant pas émergé de la vermiculite (A).
4. Si possible, aligner les germes sur une planche en respectant leur position d'origine ou leur ordre de sortie, par exemple du haut gauche vers le bas droit, puis prendre une photographie avec une règle visible.
Cela permettra d'observer si certaines zones présentent une meilleure croissance ou davantage de pourriture au fil des protocoles.
5. Mesurer, pour chaque germe : la longueur de la tige, la longueur de la racine étendue, la masse de la graine, à l'aide d'une balance de précision au centième de gramme au minimum.
Pour les mesures de longueur, arrondir au demi-centimètre et mesurer jusqu'au milieu de la graine.
6. Peser l'ensemble des germes, puis diviser la masse totale par leur nombre afin d'obtenir la masse moyenne.
7. Calculer les moyennes des différentes mesures et vérifier que la moyenne de la somme des masses individuelles est cohérente avec la masse totale mesurée à l'étape 6.

Remarque : pour les deux derniers protocoles, quelques germes représentatifs de la moyenne seront congelés en vue de futurs tests ELISA et Western blot.

4. Traitement des données

Les données seront saisies et traitées sous Excel.

L'analyse statistique reposera sur une ANOVA, afin de comparer les moyennes obtenues pour les différents protocoles (témoin, inhibition, stimulation), ainsi que leurs marges d'erreur. Cette analyse permettra d'évaluer si les résultats observés soutiennent ou non, dans le cadre de cette étude, l'hypothèse de la génodique.

3. FabLab de Grigny et de la Sorbonne

1. Soudage

Le soudage du système de diffusion et du haut parleur ont été faits au FabricoLab de Grigny avec l'aide du FabManager Florian Becker. Florian a réalisé les 4 systèmes de diffusion pour les 4 petites chambres de culture qu'utilise l'entreprise Genodics dans son laboratoire expérimental à la MEN (maison des enfants et de la nature) de Grigny.

Concrètement, nous avons utilisé un post de soudure avec de l'étain pour souder les broches de fixation, pour accrocher le xiao esp32s3 à la plaque de cuivre, l'adaptateur jack à l'ampli I2S et les fils électriques au haut parleur (avec rallonges protégées par des manchons).

2. Code Arduino

Florian nous a également envoyé le code Arduino pour le microcontrôleur, joint dans les fichiers. Nous l'avons amélioré à l'aide de Chatgpt plus.

1. Fonctionnement général

Le microcontrôleur ESP32 agit comme un lecteur audio autonome. Lors du premier démarrage du boîtier, le haut-parleur dans la chambre de culture émet le son « coucou », un bruit d'oiseau permettant de vérifier que le système fonctionne correctement. Une fois ce son terminé, l'appareil se met en veille pour compléter une durée totale de 5 minutes (lecture comprise).

Au réveil suivant, et pour tous les cycles suivants, l'ESP32 lit le fichier « son01.wav », qui correspond à la protéodie. Une fois la lecture terminée, il se met en veille pour compléter un cycle total de 24 heures. Le dispositif se réveille ensuite automatiquement chaque jour pour rejouer cette protéodie de manière autonome.

2. Paramètres du code :

Le code définit d'abord les broches utilisées pour la communication avec la carte microSD (stockage des fichiers audio) ainsi que celles utilisées pour l'interface I2S qui envoie le signal audio vers l'amplificateur, lui-même connecté à un haut-parleur (environ 5 ohms).

Contrairement à la version précédente, le code n'utilise plus un compteur de démarrage (bootCount), mais une variable persistante en mémoire RTC (premierDemarrage). Cette variable permet de distinguer uniquement deux états :

- premier démarrage → lecture de « coucou.wav »
- démarrages suivants → lecture de « son01.wav »

Les durées de cycle (5 minutes et 24 heures) sont exprimées en secondes et utilisées pour programmer le temps de veille.

3. Gestion de la lecture audio et du temps

Lors de la lecture d'un fichier audio, le programme calcule sa durée en analysant l'en-tête du fichier WAV. Il mesure ensuite le temps écoulé depuis le début de la lecture pour déterminer quand le son est terminé.

Une fois la lecture terminée, le programme ajuste la durée de veille afin que la somme « temps de lecture + temps de veille » corresponde exactement à la durée cible (5 minutes ou 24 heures). Cela permet de conserver un rythme stable malgré la durée variable des fichiers audio.

Pendant toute la lecture, la fonction `audio.loop()` est appelée en continu. Elle assure l'envoi fluide des données audio vers l'amplificateur I2S, garantissant un son continu sans interruption.

4. Gestion de l'énergie

À la fin de chaque cycle, le microcontrôleur entre en « deep sleep » (veille profonde). Dans ce mode, la consommation électrique est très faible. L'ESP32 programme son propre réveil à l'aide d'un minuteur interne.

La fonction dédiée à la veille profonde ajuste automatiquement la durée de sommeil en fonction de la durée réelle du fichier audio et applique un léger facteur de correction pour compenser les dérives de l'horloge interne.

5. Résumé

Ce code Arduino, chargé sur l'ESP32 via USB, permet la lecture automatique de deux fichiers audio (« coucou.wav » et « son01.wav ») stockés sur une carte microSD. Le système joue un son de test au premier démarrage, puis une protédie une fois par jour. L'amplificateur audio permet de restituer le son sur un haut-parleur, tandis que la gestion de la mémoire RTC et du deep sleep assure un fonctionnement autonome, économe en énergie et sans intervention humaine sur de longues durées.

3. Modèle 3D des Godets

Pour avoir nos propres godets sur-mesure et solidaires, nous avons choisi de les imprimer en 3D. Les dimensions d'une grille de la chambre de culture sont 55*54*7cm. Un pot plastique pour faire germer des graines est traditionnellement de taille 6*6*6 cm environ.

Les imprimantes 3D disponibles au FabLab prototypage sont des Raise3D Pro2 et des Prusa MK4S avec un plateau d'impression de taille 30*30*20cm. Nous choisissons d'utiliser les Prusa car elles sont plus rapides et bien plus fiables. Il faudra imprimer plusieurs morceaux de godets pour ne pas

dépasser le plateau d'impression.

Pour répondre à ces différents critères de taille, le plus simple a été d'imprimer quatre morceaux cubiques de 4*4 godets chacun. Un godet a pour dimensions 5*5*6cm avec des parois séparatrices de 1,2mm et un fond de 2,4mm d'épaisseur. Ces parois pleines sont suffisamment rigides pour résister aux contraintes exercées par la vermiculite humide.

Il y a donc au total 64 godets en réunissant les quatre quarts pour chaque semaine de germination.

Nous avons ajouté cinq petits trous au fond des godets pour mieux répartir l'humidité tout en permettant un apport maximum d'oxygène aux racines.

Pour le premier prototype nous avons renseigné nbX=1 et nbY=1 pour imprimer 1 godet test.

Les raccourcis F5 permettent de prévisualisation du modèle, F6 permet d'avoir le rendu avec calcul des arrondis et enfin F7 pour exprimer le code en format STL compatible avec un slicer.

4. Prusa slicer

Le modèle doit ensuite être envoyé dans le "slicer" compatible avec l'imprimante utilisée, "prusa slicer" pour les imprimantes Prusa. Le "slicer" permet de transformer un modèle 3D en code fichier .bgcode ou .gcode pour l'imprimante. Ce logiciel permet de spécifier tous les réglages que l'imprimante doit utiliser lors de l'impression.

De ce que nous avons compris :

sachant que la buse de l'imprimante fait 0,4 mm il faut renseigner 3 dans "périmètres" pour que les parois de 1,2mm soient pleines. L'imprimante passera 3 largeur de buse.

Pour le fond de 2,4 mm avec 3 périmètres il reste 1 mm vide qui est comblé par le "remplissage" choisi à 20% et en mode "Gyroid" qui crée des nervures aléatoires pour solidifier sans combler totalement le vide.

Vient ensuite le choix crucial des vitesses d'impression. Il faut choisir le bon compromis entre une impression rapide, solide, nette et sans effondrement selon l'objet imprimé et les caractéristiques de l'imprimante. La Prusa est optimisée pour être précise malgré les vibrations engendrées par la vitesse. Nous avons donc choisi ???

100 périmètres, 80 périmètres externes ...

Nous avons aussi diminué l'accélération de déplacement de 4000 à 1000mm/s² pour ne pas provoquer trop de vibrations lorsque le plateau bouge

Enfin le troisième type de réglage important est la température d'impression qui dépend surtout du type de filaments utilisé. Le filament basique est le PLA, bioplastique issu d'amidon de maïs ou de canne à sucre. Il est poreux et rigide, parfois cassant et déformable au-dessus de 50 degrés celsius. Il y a ensuite le PLA+ plus solide et étanche grâce à des additifs (élastomères ou minéraux) c'est celui ci que nous avons choisi pour maximiser les chances de réussite de l'impression.

Il faut vérifier que les paramètres de température par défaut sont bien à 60 degrés pour le plateau et 220 degrés pour la base afin que le PLA+ ne soit ni trop solide ni trop liquide lors de l'impression et qu'il ne crée pas trop de tension quand il refroidit..

5. Impressions 3D

Pour débiter l'impression, il faut exporter le modèle avec ses paramètres d'impression au format bgcode puis mettre le fichier dans une clé USB et la brancher à l'imprimante.

Enfin, il faut lancer le préchauffage de l'imprimante puis sélectionner le bgcode de la clé avec la molette ou l'écran tactile.

Pour un tel objet d'une durée d'impression autour de 20 heures, il est nécessaire de contrôler la première heure d'impression pour s'assurer que les couches de la base soient bien imprimées et collées au plateau sinon la suite de l'impression sera forcément un échec.

La moitié du temps correspond au remplissage des parois externes pleines. Chaque quart consomme autour de 250g de PLA+

Revision #10

Created 13 February 2026 15:47:51 by Abdenouri Salma

Updated 19 March 2026 16:52:00 by Deroome Maxence