

Existe-t-il une biologie cellulaire des sons ?

De « l'écoute » des plantes à l'acoustique cellulaire

Par Olivier GALLET

Laboratoire ERRMECe (Équipe de recherche sur les relations matrice extracellulaire-cellules, CY Cergy Paris Université)

Et si les plantes pouvaient non seulement entendre, mais aussi et surtout écouter et différencier des sons pour les utiliser à bon escient dans leurs stratégies de développement et d'adaptation à leur environnement.

Il y a quelques années de cela, un concours de circonstances m'a conduit à développer une recherche collaborative sur ce sujet souffrant indéniablement d'un certain scepticisme ambiant. En décryptant une revue bibliographique récente et pointue et en proposant un protocole rigoureux en triple aveugle et utilisant des concepts simples et éprouvés de biologie, nous avons montré qu'effectivement, des plantes peuvent reconnaître et utiliser des sons de façon très subtile pour moduler leur croissance en réponse à un stress environnemental, en l'occurrence un stress hydrique lié à la sécheresse.

Perception du son et des ondes sonores par les végétaux

Que connaît-on du sujet ?

Dans notre monde moderne, chantre de la communication humaine, la communication entre composantes du vivant reste pourtant capitale pour le vivant lui-même, et notre questionnement aborde la perception des ondes sonores par des organismes, comme les végétaux, ou même par la brique élémentaire du vivant, qu'est la cellule. Nos propres cellules sont-elles douées de capacités de communication sonore ?

Les plantes savent-elles discriminer les ondes sonores ? Sont-elles douées de la capacité d'utiliser les sons pour s'adapter aux contraintes et aux dissymétries de leur environnement ? Ces capacités sont-elles mesurables au niveau cellulaire chez n'importe quel organisme ? Autant de questions très souvent considérées comme « ésotériques », mais qui commencent à trouver des réponses scientifiques de plus en plus probantes et qui, à tout le moins, suscitent l'engouement de plus en plus de chercheurs.

Ainsi, une simple requête « plant and sound » sur le moteur de recherche Pubmed de la United States National

Library of Medicine ⁽¹⁾ renvoie à pas moins de 2 837 publications scientifiques répertoriées entre 1923 et 2021, dont 72 % sur la dernière décennie. Étonnamment, en réponse à une requête aussi simple, les quatre cinquièmes des publications citées ne sont en aucun cas rattachables au sujet qui nous importe. On y trouve pêle-mêle des articles certes sur le son, mais aussi sur la planification, sur l'extraction de principes actifs chez les végétaux, sur le bruit industriel, ou s'intéressant à certaines pathologies... Mais, au final, extrêmement peu d'articles traitent réellement du son en tant que facteur environnemental pouvant moduler le développement des végétaux.

Une requête similaire « sound and cell » montre la même tendance, avec plus de 700 publications par an depuis dix ans. Mais, là aussi, on atteint rapidement les limites de l'intelligence artificielle en termes de recherche bibliographique, car la majorité des publications citées ne traitent pas vraiment du sujet ou de façon très éloignée. Si l'on formule la même requête « plant and sound » via le moteur de recherche scientifique Webofknowledge de Clarivate

(1) <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=plant%20and%20sound&timeline=expand>

analytics⁽²⁾, les données restituées sont moins nombreuses mais plus précises. Ainsi, pour la période 1984-2021, 94 publications sont citées, dont une grande majorité de celles-ci traitent bien du sujet, avec une augmentation significative du taux de citations entre 2010 (10 citations d'articles par an) et 2020 (165 citations d'articles par an).

De la perception des signaux à la naissance d'une intelligence végétale moteur d'une évolution solidaire

La relation académique et pratique aux plantes n'a pas jusqu'à récemment incité la communauté scientifique à se pencher sur ce que pourraient être les mécanismes de perception des ondes sonores chez les végétaux, voire dans une communication végétale. De nombreux pionniers en la matière ont soulevé ces dernières années la question d'une intelligence végétale, voire d'un *greenpower*. Ainsi, dès 2003, Antony Trewavas propose une redéfinition de l'intelligence en considérant que l'expression « intelligence des plantes » se réfère à la complexité de la réception et de la « transduction des signaux » chez les végétaux. Cette intelligence du « signal » permettrait aux végétaux de se positionner et de construire leurs propres images de leur environnement à chaque instant de leur vie. Aujourd'hui, il a été largement démontré, par exemple, que les plantes transforment constamment leur environnement, grâce à tout un ensemble de signaux et d'échanges chimiques opérés *via* la rhizosphère avec les micro-organismes du sol, mais aussi avec d'autres espèces végétales qu'elles sont capables de stimuler ou d'inhiber pour leur propre compte. Ces interactions biologiques relèvent de l'allélopathie qu'Elroy Leon Rice a définie, en 1984, comme tout effet positif ou négatif direct ou indirect d'une plante sur une autre plante ou sur des micro-organismes par la libération de molécules biochimiques (souvent décrites comme étant des phytoalexines) dans l'environnement naturel. De même, il a été montré (Abbadie, 2018) que des arbres y compris d'espèces différentes, situés l'un à l'ombre et l'autre à la lumière, échangent *via* cette même rhizosphère et en mobilisant le microbiote du sol (Selosse, 2018) les molécules qui manquent à chacun d'eux.

L'intelligence des végétaux résulte donc de leur fabuleuse adaptation aux contraintes de leur milieu. Ne pouvant se soustraire comme les animaux aux perturbations de leur environnement en se déplaçant, elles ont élaboré des stratégies complexes de reconnaissance des signaux traduisant les variations incessantes des paramètres biotiques et abiotiques. Par ce lien constant et étroit avec leur milieu, elles peuvent anticiper des réponses physiologiques adaptées. On pourrait résumer en ironisant : « avons-nous déjà vu un pommier prendre ses racines à son cou pour aller se mettre à l'ombre quand il fait trop chaud ou se cacher quand un prédateur approche ? » Non, bien au contraire : l'arbre va « coder » son environnement à sa façon, selon les paramètres qui lui importent, et intégrer d'éventuelles modifications pouvant potentiellement le mettre en danger. La sélection naturelle a pris le temps de privilégier les capacités génétiques nécessaires à cette adaptation.

Une des plus grandes preuves de l'intelligence végétale réside donc dans la capacité de la plante à se fondre dans son milieu et d'en tirer le maximum d'avantages au moindre coût, selon l'adage d'Isaac Newton : « La nature ne fait rien en vain ; et le plus est vain si le moins suffit ; car la nature aime la simplicité et ne s'embarrasse pas de causes superflues ».

C'est pourquoi, pour assurer ses flux hydriques et nutritifs, quoi de mieux pour la plante que d'utiliser cette énergie abondante et bon marché qu'est l'énergie solaire : par exemple, en adaptant son métabolisme hydrique à un changement d'état de l'eau (lien entre la quantité de liquide dans le sol et les tissus de la plante, jusqu'au stockage de la vapeur dans la chambre sous stomatique des feuilles).

Force est de constater, comme le fait le botaniste et ancien président de la Société européenne d'écologie, Jean-Marie Pelt, que les plantes ont une vie sociale mêlant compétition mais aussi complémentarité, jusque dans leurs stratégies d'évolution. Un point sur lequel Pelt (1984) se rapproche de la thèse de Piotr Kropotkine, géographe naturaliste et anarchiste russe de la fin du XIX^e siècle, dans laquelle il associe au transformisme lamarkien et à l'évolutionnisme darwinien les notions d'entraide et de solidarité qui caractérisent les stratégies d'adaptation et de colonisation de nouveaux territoires par les organismes vivants. C'est la stratégie ainsi développée par nos propres cellules, qui se sont constituées au fil de millions d'années par l'apport extérieur de gènes, de molécules, voire de micro-organismes tout entiers, comme nos mitochondries, les centrales énergétiques de toute vie cellulaire sur Terre ou les chloroplastes chez les végétaux véritables usines photovoltaïques de bio productions photosynthétiques.

De la reconnaissance, activement exploitée, de l'existence d'un signal à l'hypothèse d'une neurobiologie végétale

Dans le continuum statique sol-plante-atmosphère (CSPA), le végétal tire profit de la situation tout en constituant un des maillons indispensables à la régulation hydrique atmosphérique et à une certaine homéostasie terrestre de l'équilibre entre l'oxygène (O₂) et le dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique.

Les travaux du botaniste Stefano Mancuso illustrent cette capacité d'adaptation et de plasticité des végétaux en expliquant comment l'analyse des variations des paramètres environnementaux permet à ces derniers de communiquer, de s'organiser et de s'adapter pour à la fois mieux « coller » à leur milieu et prédire les évolutions potentielles de celui-ci (Baluska et Mancuso, 2020).

Pour Stéphane Mancuso et d'autres neurobiologistes, comme Marc Williams Debono, cette intelligence végétale, fondée sur la reconnaissance, la transmission, l'interprétation de signaux et l'apport d'une réponse adaptée, doit se traduire nécessairement par une sorte de « neurobiologie végétale » (Baluska et Mancuso, 2009), qui interroge sur la continuité ou la discontinuité entre les formes animales et humaines d'intelligence et celle instituée par le monde végétal.

(2) <https://apps.webofknowledge.com/>

Mais peut-on réellement parler d'une intelligence s'apparentant à celle de l'Homme ? Les modes de communication ou de résolution des problèmes chez les végétaux doivent-ils être calqués sur notre propre système de communication et d'analyse ? Selon Francis Hallé (2018), « dire que les plantes sont intelligentes, c'est peut-être les sous-estimer... » ; et la révolution végétale ne suit peut-être pas la logique humaine.

Ainsi, si nous, humains, concevons une corrélation étroite entre la communication et le développement des formes d'intelligence, cette communication se réfère à notre façon de l'aborder, donc en considérant, entre autres, la communication sonore. Finalement, quand on envisage l'intelligence végétale, on aborde anthropologiquement la communication sonore, et donc les sons et les ondes sonores avec cette perspective.

La perception des sons par les plantes

Une grande question demeure, celle de savoir si les plantes peuvent percevoir les sons, et surtout, quels types d'ondes sonores sont-elles capables d'assimiler et dans quels buts ? Pour y répondre, une revue récente réalisée par Khait *et al.* (2019) a synthétisé les travaux sur l'impact des signaux sonores sur les végétaux *via* la modulation de l'expression de leurs gènes, de la résistance acquise par les plantes à des pathogènes ou encore de modifications morphologiques et d'adaptations des plantes en réaction à ces signaux dans une approche de « phytoacoustique ». La démarche scientifique adoptant cette approche est assez récente et coïncide avec des travaux phares en ce domaine (Gagliano *et al.*, 2012 ; Mishra *et al.*, 2016 ; Fernandez-Jaramillo *et al.*, 2018 ; Frongia *et al.*, 2020) et, bien sûr, des controverses (Markel, 2020).

Deux aspects sont à considérer quand on analyse les travaux consacrés à l'impact des ondes sonores sur le développement des organismes vivants, dont les végétaux : il s'agit, d'une part, de leur sensibilité à des fréquences particulières (Ozkurt *et al.*, 2016) et, d'autre part, et de façon plus directe, de leur sensibilité à des séquences musicales (Creath et Gary, 2004 ; Chivukula et Shivaraman, 2014), voire, plus récemment, en combinant les deux en associant des bruits naturels et des séquences musicales d'origine humaine (Wassermann *et al.*, 2021). Quoi qu'il en soit, la perception des sons par les organismes vivants est le plus souvent abordée par le biais d'une approche dite de mécano-perception (Telewski, 2015), qui reprend classiquement la trilogie « capture de l'information », « transduction du signal » et « étude de la réponse physiologique adaptée ».

Perception des ondes sonores par les végétaux : l'approche expérimentale *via* les « protéodies »

L'origine de la collaboration scientifique

C'est dans ce contexte scientifique de « phytoacoustique », que nous avons mis en place depuis 2013 au laboratoire ERRMECe (Équipe de recherche sur les relations matrice extracellulaire-cellules, CY Cergy Paris Université), en collaboration avec la société Genodics, une étude originale

sur la perception des ondes sonores par des végétaux soumis à des diffusions sonores de séquences harmoniques dénommées « protéodies ». Ces protéodies sont générées en partenariat avec la société Genodics qui exploite un brevet (Sternheimer, 1992) sur la « génodique » pour des applications dans la protection des végétaux. Joël Sternheimer, inventeur du concept de « génodique », propose de générer des séquences harmoniques à partir du décodage des ondes émises par les acides aminés quand ils s'intègrent dans la chaîne polypeptidique naissante d'une protéine, à l'étape dite de traduction à partir de l'ARN messager. D'où le nom de « protéodies » donné à ces séquences.

Lors de nos premières rencontres avec l'équipe de Genodics, je dois reconnaître que j'ai été assez surpris lorsque j'ai pris connaissance de ce procédé et je restais un peu sceptique sur la possibilité de conceptualiser un protocole expérimental sur ce genre de thématique. Il est vrai qu'en 2013, amener un laboratoire académique à s'engager sur ce genre de sujet relevait de la gageure, d'autant plus que ce laboratoire, que j'ai dirigé de 2013 à 2020, est à dominante biochimie, biologie cellulaire et moléculaire. Il est spécialisé dans l'étude des inter-relations entre les cellules et leurs matrices extracellulaires (ou microenvironnement cellulaire) dans des domaines comme les biomatériaux, l'ingénierie tissulaire osseuse, les matrices biomimétiques, la cancérologie, le vieillissement ou la formation des biofilms bactériens. En revanche, une thématique de recherche du laboratoire portait sur l'identification de protéines mimétiques de protéines du sang humain présentes chez des petits pois soumis à des stress hydriques ; un axe de recherche qui pouvait facilement devenir le support d'une investigation scientifique préliminaire compatible avec les ambitions de la société Genodics en matière de protection des cultures.

Face aux doutes exprimés par nombre de mes collègues, j'ai malgré tout pris la décision d'investiguer cette piste. La curiosité scientifique et le libre arbitre devraient imposer aux chercheurs de faire fi des idées courantes et de s'engager pour rechercher toutes formes de réalités, aussi étranges qu'elles nous paraissent. La science progresse en posant des hypothèses qui sont ensuite testées. C'est dans cette optique que nous avons proposé à Genodics d'engager une série de travaux et de les publier – quel qu'en soit le résultat – en toute transparence, chose que nos partenaires de Génodics ont totalement accepté.

Le principe des protéodies et le contexte de l'étude

La théorie de la génodique s'appuie sur les résultats des expérimentations répétées depuis des années par la société Genodics sur des plantes cultivées (voir l'article de Pedro Ferrandiz publié dans cette revue). Elle propose comme hypothèse explicative une régulation épigénétique de la synthèse des protéines, en prenant en considération le fait que lors de la traduction de l'ARN messager en protéines, les vingt-deux acides aminés constitutifs des protéines sont ajoutés les uns après les autres, en fonction du code génétique, au polypeptide naissant, et émettent alors des ondes de fréquences caractéristiques de chaque

acide aminé. Selon l'équipe de Genodics, la succession de ces fréquences peut être converties, selon une méthode qui leur est propre, en ondes acoustiques audibles ; les séquences musicales ainsi obtenues pourraient moduler en temps réel la vitesse de synthèse protéique *via* une forme de résonance entre les fréquences successives. Ces séquences harmoniques peuvent être diffusées dans le sens de la synthèse des protéines (pour un effet de stimulation) ou en sens inverse (pour un effet d'inhibition), ou de façon aléatoire pour générer un contrôle expérimental.

Le principe des protéodies et l'hypothèse sous-jacente sont plus largement décrits sur le site de l'entreprise Genodics⁽³⁾.

Au sein de notre laboratoire, nous avons donc l'opportunité de travailler sur un modèle végétal développé dans le cadre d'un programme de recherche financé par l'ANR, ANR Blanc 1530-02 GreenFibronectin (2011-2015), visant à caractériser un homologue des protéines du plasma sanguin humain dans le pois (*Pisum sativum*) en réponse à la sécheresse ; une étude menée à la suite des travaux préliminaires que nous avons publiés (Pellenc *et al.*, 2004 ; Cossard *et al.*, 2005).

Puisque nos pois étaient placés dans des conditions de stress hydrique pour les besoins du projet GreenFibronectin, nous avons logiquement fait le choix de retenir le stress hydrique comme paramètre environnemental, et de diffuser des séquences harmoniques protéo-mimétiques, dénommées « protéodies », produites par notre partenaire Génodics, pour vérifier si une adaptation des pois était possible à la suite de cette diffusion « musicale » et pouvoir comparer nos résultats avec ceux obtenus sur l'induction par des fréquences sonores de la résistance à la sécheresse chez l'arabette (Lopez-Ribera et Vicient, 2017).

L'idée sous-jacente était de valider ou d'infirmer l'hypothèse de départ proposée par Genodics, c'est-à-dire la « régulation épigénétique de la biosynthèse des protéines par résonance d'échelle à partir de la séquence en acides aminés de la protéine traduite en protéodie ». En 2016, sans financement spécifique, nous nous sommes engagés dans un protocole simplifié pour travailler sur l'apport de la preuve du concept. Les résultats ont été publiés dans une revue à comité de lecture en septembre 2020 (Prévost *et al.*, 2020).

Le mode opératoire de la démarche scientifique

Nous avons ciblé une famille-clé de protéines végétales impliquées dans l'adaptation au stress hydrique : les déhydrines (DHN). Les DHN sont aujourd'hui clairement reconnues comme des protéines de stress hydrique et salin permettant aux végétaux de résister entre autres aux dérégulations climatiques engendrant des périodes de sécheresse. Bien entendu, investiguer cette cible protéique n'affectait pas notre programme principal (ANR GreenFibronectin), ce qui nous a permis de mener ces deux projets en parallèle.

La démarche a consisté à soumettre des plantules de pois (*Pisum sativum*) placées en situation de stress hydrique à des séquences acoustiques « protéo-mimétiques », dont les fréquences étaient associées à la séquence en acides aminés de la déhydrine (DHN), dans le sens, d'une part, d'une stimulation (en résonance harmonique) et, d'autre part, d'une inhibition (en dissonance harmonique) :

- Séquence des 25 premiers acides aminés de la DHN : MAEENQNKYEETTSATNSETTEIKDR
- Notes associées (généodique) : A3 C3 A3 A3 G3 A3 G3 A3 C4 A3 A3 F3 F3 E3 C3 F3 G3 E3 A3 F3 A3 G3 A3 G3 C4
- Séquence par hypothèse stimulatrice : A3 C3 A3 A3 G 3 A3 G3 A3 C4 A3 A3 F3 F3 E3 C3 F3 G3 E3 A3 F3 A3 G3 A3 G3 C4
- Séquence par hypothèse inhibitrice : F3 D4 F3 F3 G3 F3 G3 F3 D3 F3 F3 A3 A3 B3b D4 A3 G3 B3b F3 A3 F3 G3 F3 G3 D3

Pour mesurer l'impact des séquences acoustiques nous avons choisis de faire des mesures simples d'adaptation de nos germinations à la sécheresse *via* la mesure du poids frais.

Enfin, nous avons extrait les protéines et caractérisé, par la technique du *western blot* et *via* des mesures ELISA, la présence des DHN en utilisant un anticorps polyclonal anti-DHN.

Pour limiter les biais expérimentaux, nous avons mis en place un protocole de travail en triple aveugle : les personnes en charge de faire les mesures et les extractions

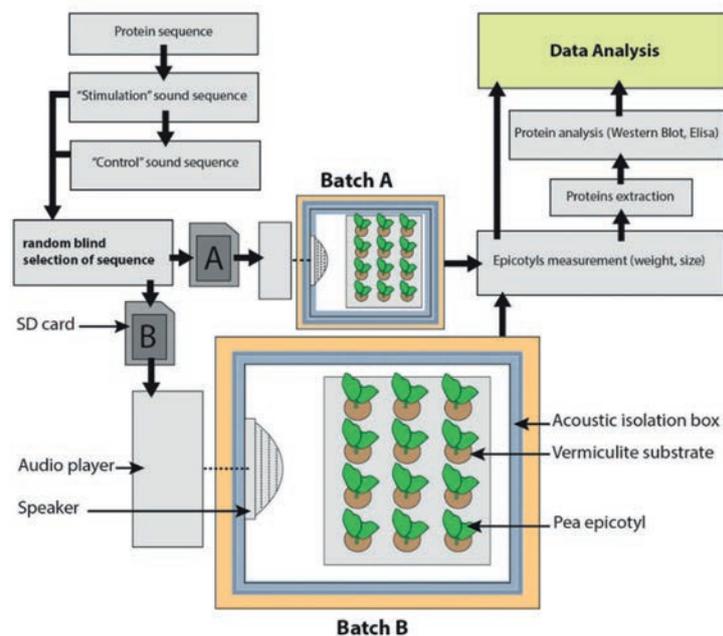


Figure 1 : Schéma du protocole expérimental mis en place (tiré de la publication Prévost *et al.*, 2020).

Les lots de pois sont mis à germer durant 8 à 10 jours dans des barquettes avec comme substrat de la vermiculite hydratée. Puis les cultures ne sont plus arrosées au cours des 8 à 10 jours suivant, ce qui entraîne un stress hydrique. Les barquettes de 30 graines sont placées chacune dans deux caissons acoustiques isolés, les germinations reçoivent une diffusion de 5 min de séquence harmonique la nuit, vers 4 h du matin.

(3) <https://www.genodics.com/genodique.php>

de protéines sont localisées au laboratoire ERRMECe et récupèrent les barquettes de pois dans les caissons, sans connaître la nature de la séquence diffusée. Dans les diffuseurs des caissons, le personnel de Genodics a placé des cartes son (SD card dans la Figure 1), avec des séquences stimulatrices ou inhibitrices, sans autre indication que A ou B. Pour chaque cas A ou B, les résultats des mesures sont envoyés à un troisième partenaire (à l'époque, un ingénieur en CDD recruté dans le cadre d'un autre programme ANR en collaboration avec un laboratoire alsacien, à Mulhouse), qui analyse statistiquement les résultats obtenus sans connaître l'origine de la série des données.

Pour avoir une traçabilité finale, il faut que les trois groupes d'opérateurs se réunissent et indiquent chacun l'élément qu'ils détiennent pour identifier l'origine des barquettes de semis : le caisson (A ou B) dans lequel elles étaient placées, et la carte son (A ou B) s'y trouvant.

Les principaux résultats obtenus : vers un « protéo-mimétisme » ?

Analyse statistique de la distribution du poids frais en fonction des protéodies diffusées

L'analyse statistique des mesures du poids frais de chaque germination de pois est mentionnée dans la publication citée en référence (Prévost *et al.*, 2020) et montre clairement une différence de poids en fonction de la modulation par les protéodies stimulatrices ou inhibitrices de la synthèse des déhydrines. Il en ressort que l'augmentation de poids frais observée pour les lots qui ont été soumis à une diffusion de protéodies stimulant la vitesse de synthèse des DHN traduit une meilleure adaptation au stress hydrique et à la sécheresse des semis de la barquette placée dans le

caisson acoustique où a été diffusée la séquence harmonique de stimulation.

Qui plus est, d'autres valeurs ont été ajoutées à celles publiées et confirment ce phénomène (voir la Figure 2 ci-après) : l'exposition aux deux séquences acoustiques « stimulation » *versus* « inhibition » induit une différence dans la fréquence de distribution du poids frais des plantules de *P. sativum*. Le poids moyen est significativement supérieur pour les lots « stimulés » (0,62 g \pm 0,01 g, n=656) par rapport aux lots « inhibés » (0,48 g \pm 0,01 g, n=674).

Caractérisation de la nature des protéines stimulées ou inhibées

Les mesures de poids frais ne sont qu'une preuve indirecte de l'adaptation des jeunes plantules au stress hydrique en fonction des protéodies diffusées dans les caissons acoustiques. Pour être sûrs que cette adaptation résulte bien d'une augmentation ou d'une inhibition du taux de synthèse des protéines ciblées *via* les séquences harmoniques, nous avons procédé à des analyses biochimiques conventionnelles par des tests immunologiques (avec un sérum polyclonal dirigé contre les DHN de pois). Le détail des résultats et une analyse plus fine sont décrits dans la publication d'origine. La synthèse des résultats montre que davantage de protéines de la famille des déhydrines impliquées dans l'adaptation à la sécheresse ont été synthétisées par la plante sous influence de la protéodie par hypothèse stimulatrice (voir la Figure 3 de la page suivante). On observe un taux basal de déhydrine de 15 kDa avec une intensité identique dans les deux lots et, en revanche, est mise en évidence une accentuation des taux des autres déhydrines (27-30 et 37k Da), en fonction des séquences acoustiques qui leur correspondent.

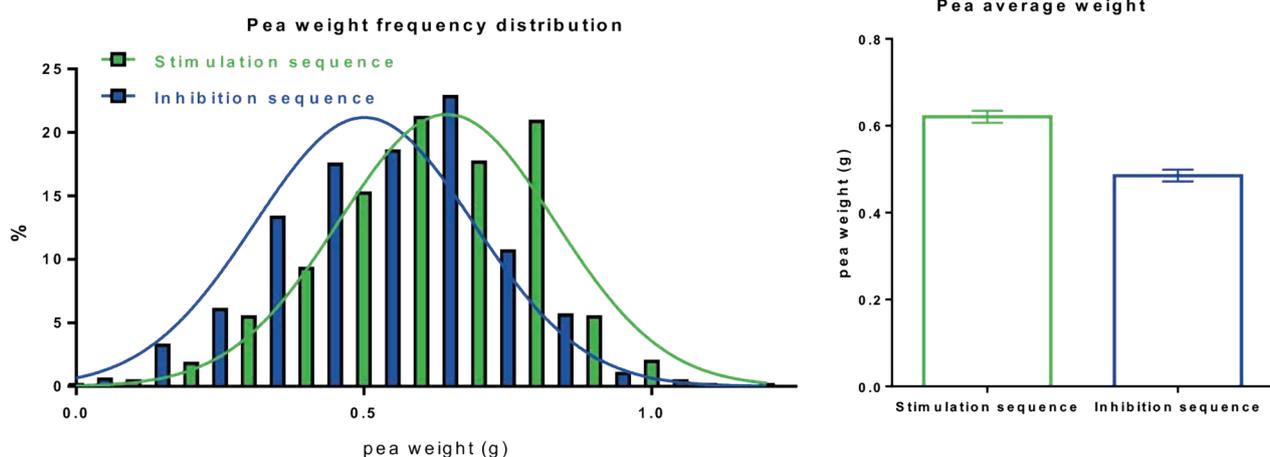


Figure 2 : Mesure du poids des jeunes germinations de pois et fréquence de distribution (résultats complémentaires à ceux de la publication Prévost *et al.*, 2020).

Les jeunes germinations de pois ont été pesées pour chaque condition expérimentale à raison de 656 germinations pour les lots ayant poussé en présence d'une diffusion acoustique de type stimulation, et de 674 germinations pour les lots ayant poussé en présence d'une diffusion acoustique de type inhibition.

Les courbes de fréquences de distribution pour les deux conditions sont présentées à gauche de la figure. Les histogrammes situés à droite sur la figure (affectés des barres d'erreur standard de la moyenne) présentent la moyenne des poids des jeunes germinations pour chaque condition.

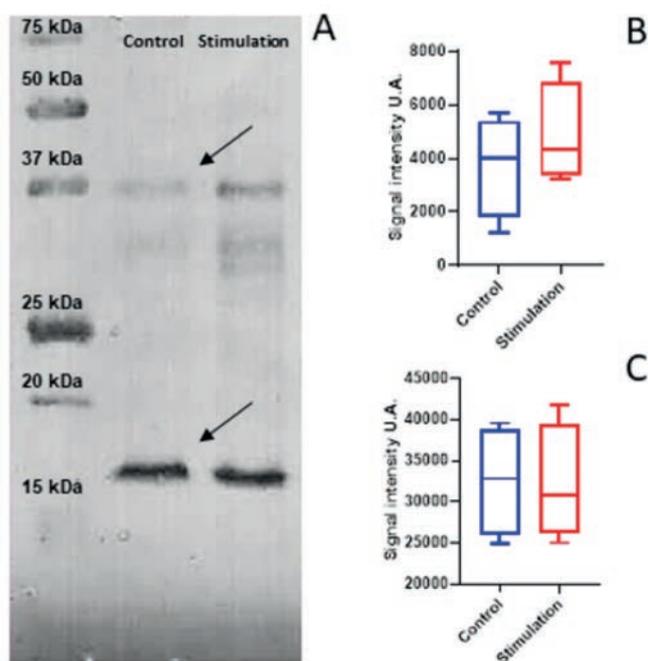


Figure 3 : Impact des « protéodies » stimulatrices sur la synthèse des déhydrines (tiré de la publication Prévost *et al.* ; Helyion 2020).

Des germinations de petits pois ont été mises en culture dans des conditions de stress hydrique avec (stimulation) ou sans (control) diffusion de séquences acoustiques. Les épicotyles ont été broyés pour en extraire les protéines. Un protocole de purification d'une fraction protéique enrichie en déhydrines (DHN) a été mis au point et les protéines ont été séparées par électrophorèse SDS-PAGE avant d'être sondées par une approche immunologique de type western blot basée sur la visualisation des protéines d'intérêt par un anticorps générique dirigé contre plusieurs familles de déhydrines. La révélation des bandes protéiques reconnues par l'anticorps est mise en évidence par les flèches sur la photographie restituant le résultat d'un test western blot. À droite, sont représentés les résultats d'analyse densitométrique de 4 western blots différents pour les bandes 37 kDa et 15 kDa ; une représentation dite de boîte en moustache qui met clairement en évidence le fait que, pour les 4 western blots différents considérés, la bande correspondant à 37 kDa est plus importante en intensité pour les lots stimulés.

Perspectives et nouvelles pistes – Retour vers la prise en compte de l'acoustique par les cellules

Sur la base de ces résultats, nous nous sommes rapprochés d'autres laboratoires et partenaires privés pour poursuivre nos travaux avec pour hypothèse une nouvelle stratégie possible de régulation de la synthèse protéique et mesurer en temps réel la réponse du vivant.

L'objectif affiché est de vérifier plus en profondeur et en détail l'hypothèse d'un changement de paradigme au regard des aspects ondulatoires et de la dimension acoustique de la régulation des processus du vivant ; une étude adossée à une méthodologie pionnière de mesure calibrée par des tests biologiques pertinents. Une partie de ces travaux sont déjà engagés avec nos partenaires au travers de deux programmes actuellement conduits sous la direction d'un jeune chercheur du laboratoire. Ainsi, malgré un fort scepticisme culturel et institutionnel, les chercheurs se mobilisent pour poursuivre ce type de recherches aux frontières du vivant en mobilisant d'autres sources de finance-

ment pour répondre à cette question : le vivant à l'échelle de la cellule capte-t-il les sons, comment peut-il les interpréter et émet-il en réponse des signaux vibratoires qui pourraient en temps réel renseigner sur son état physiologique et comportemental ?

Nos premiers résultats publiés sont encourageants et permettent d'envisager plus sereinement nos nouvelles pistes d'investigation à l'échelle de la cellule. Nul doute que de nouvelles voies inédites de recherches se profilent s'accompagnant de l'assurance de l'émergence d'innovations technologiques.

Bibliographie

- ABBADIE L. (2018), « Fertilité des sols : la qualité par la vie », *Responsabilité & Environnement* n°91, dossier « Sols en danger », juillet, pp. 10-12.
- BALUŠKA F. & MANCUSO S. (2009), "Plant neurobiology: from sensory biology, via plant communication, to social plant behaviour", *Cogn Process.*, Suppl. 1:S3-7, Feb 10, doi: 10.1007/s10339-008-0239-6.
- BALUŠKA F. & MANCUSO S. (2020), "Plants, climate and humans: Plant intelligence changes everything", *EMBO Rep.* Mar 4 21(3):e50109, doi: 10.15252/embr.202050109.
- CHIVUKULA V. & SHIVARAMAN R. (2014), "Effect of Different Types of Music on Rosa Chinensis Plants", *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 5, n°5, pp. 431-434.
- COSSARD E., GALLET O. & DI MARTINO P. (2005), "Comparative adherence to human A549 cells, plant fibronectin-like protein, and polystyrene surfaces of four Pseudomonas fluorescens strains from different ecological origin", *Can J Microbiol.*, Sep;51(9), pp. 811-815, doi: 10.1139/w05-065.
- DUSZA Y., BAROT S., KRAEPIEL Y., LATA J. C., ABBADIE L. & RAYNAUD X. (2017), "Multifunctionality is affected by interactions between green roof plant species, substrate depth, and substrate type", *Ecol Evol.* 7(7), pp. 2357-2369, doi: 10.1002/ece3.2691.
- FERNANDEZ-JARAMILLO A. A., DUARTE-GALVAN C., GARCIA-MIER L., JIMENEZ-GARCIA S. N. & CONTRERAS-MEDINA L. M. (2018), "Effects of acoustic waves on plants: An agricultural, ecological, molecular and biochemical perspective", *Scientia Horticulturae* 2018;235, pp. 340-348, doi: 10.1016/j.scienta.2018.02.060.
- FRONGIA F., FORTI L. & ARRU L. (2020), "Sound perception and its effects in plants and algae", *Plant Signal Behav.* Dec 1;15(12):1828674, doi: 10.1080/15592324.2020.1828674.
- GAGLIANO M., MANCUSO S., ROBERT D. & TOWARD S. (2012), "Understanding plant bioacoustics", *Trends in Plant Science* 17(6), pp. 323-325, doi: 10.1016/j.tplants.2012.03.002.
- HALE F. (2018), « La révolution végétale : de la neurobiologie des plantes à la sylvothérapie », *Pour la Science* n°101, Hors-série.
- KATHERINE C. & SCHWARTZ G. E. (2004), "Measuring Effects of Music, Noise, and Healing Energy Using a Seed Germination Bioassay", *The Journal of Alternative and Complementary Medicine*, vol. 10, n°1, pp. 113-122.
- KHAI T. I., OBOLSKY U., YOVEL Y. & HADANY L. (2019), "Sound perception in plants", *Semin Cell Dev Biol*, doi: 10.1016/j.semcdb.2019.03.006.
- LÓPEZ-RIBERA I. & VICIENT C. M. (2017), "Drought tolerance induced by sound in Arabidopsis plants", *Plant Signal Behav.* 12(10), doi: 10.1080/15592324.2017.1368938.

- MARKEL K. EI. (2020), "Lack of evidence for associative learning in pea plants", Jun 23;9:e57614, doi: 10.7554/eLife.57614.
- MISHRA R. C., GHOSH R. & BAE H. (2016), "Plant acoustics: in the search of a sound mechanism for sound signaling in plants", *Journal of Experimental Botany* 67(15), pp. 4483-4494, doi: 10.1093/jxb/erw235.
- OZKURT H. & OZLEM A. (2016), "The Effect of Sound Waves at Different Frequencies upon the Plant Element Nutritional Uptake of Snake Plant (*Sansevieria Trifasciata*) Plants", *Indian Journal of Science and Technology*, vol. 9, n°48.
- PELLENC D., SCHMITT E. & GALLET O. (2004), "Purification of a plant cell wall fibronectin-like adhesion protein involved in plant response to salt stress", *Protein Expr Purif.* Apr;34(2), pp. 208-214, doi: 10.1016/j.pep.2003.11.011.
- PELT J.-M. (1984), « La vie sociale des plantes », Éditions Fayart.
- PRÉVOST V., DAVID K., FERRANDIZ P., GALLET O. & HINDIÉ M. (2020), "Diffusions of sound frequencies designed to target dehydrins induce hydric stress tolerance in *Pisum sativum* seedlings", *Heliyon.*, Sep 23;6(9):e04991, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04991.
- RICE E. R. (1984), "Allelopathy", Academic Press, 2^{ème} édition.
- SELOSSE M. A. (2018), « Jamais seul : ces microbes qui construisent les plantes, les animaux et les civilisations », *Médecine/Sciences* 34 (6-7), pp. 604-607, doi : ff10.1051/medsci/20183406023.
- STERNHEIMER J. (1992), "Process for epigenetic regulation of protein biosynthesis by scale resonance", patent n°FR 92 06765, publication number: 2691796.
- TELEWSKI W. F. (2015), "A Unified Hypothesis of Mechanoperception in Plant", *American Journal of Botany: Botanical Society of America Inc*, pp. 340-348.
- TREWAVAS A. (2003), "Aspect of plant intelligence", *Ann Bot.* 92(1), pp. 1-20, doi: 10.1093/aob/mcg101.
- WASSERMANN B., KORSTEN L. & BERG G. (2021), "Plant Health and Sound Vibration: Analyzing Implications of the Microbiome in Grape Wine Leaves", *Pathogens* Jan 12;10(1):63, doi: 10.3390/pathogens10010063.