

L'APPROCHE FRUGALE EN PHYSIQUE EXPÉRIMENTALE

UNE FAÇON DE PROPOSER DES INVESTIGATIONS AUTHENTIQUES ET ENGAGEANTES

- **Frédéric Bouquet et Julien Bobroff, Université Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire de Physique des Solides ; Institut Villebon - Georges Charpak**
- **Geneviève Allaire-Duquette, Université de Montréal**

INTRODUCTION

L'enseignement des sciences expérimentales en physique à l'université est souvent réalisé par des travaux pratiques (TP), ces séances pendant lesquelles les personnes étudiantes procèdent à des manipulations. Les TP sont considérés comme essentiels à la formation scientifique, et répondent à différents objectifs pédagogiques : acquisition de compétences techniques, manipulation de matériel, illustration de phénomènes vus en cours, apprentissage de la démarche scientifique, conception d'expériences et de protocoles et analyse de données (Kozminski et al., 2014).

Les TP ne sont toutefois pas toujours appréciés des personnes étudiantes, surtout dans le cas des expérimentations de type «recette» (Deacon et Hajek, 2011). Celles-ci se caractérisent souvent par un protocole fermé et très strict, qui guide les personnes étudiantes quant aux mesures à effectuer en laissant peu de place à l'autonomie, et ce, tant dans la conception du montage expérimental que dans la prise de mesures et dans l'analyse des données.

Ces activités fermées ne permettent pas de développer une compréhension de l'ensemble des étapes de la démarche expérimentale, car il y a peu d'autonomie dans les démarches à effectuer et très peu de réflexion sur la démarche d'investigation réalisée. Cette façon d'envisager la démarche expérimentale est d'ailleurs très éloignée des pratiques ouvertes et authentiques qui caractérisent le travail des scientifiques.

Dans ce texte, nous proposons d'explorer l'approche frugale, qui a pour objectif d'inciter les personnes étudiantes à mener des démarches d'investigation hors du cadre formel de la classe ou du laboratoire. Les étudiantes et étudiants utilisent du matériel de la vie de tous les jours, dans différents contextes, par exemple en étant immergés dans une fiction ou encore en étant plongés dans la forêt.

POURQUOI AVOIR RECOURS À DU MATÉRIEL FRUGAL?

Utiliser du matériel expérimental frugal, c'est-à-dire du matériel simple, commun ou peu cher, est une façon de proposer des démarches d'investigation plus ouvertes. Ces démarches permettent de faire des choix ou d'utiliser différentes ressources pour répondre à une question posée. Plusieurs avantages sont associés à cette approche (Al-Shamali et Connors, 2010; Kovarik et al., 2020)

- L'approche offre l'occasion de concevoir et de modifier le montage expérimental, ce qui permet de centrer l'apprentissage sur la démarche scientifique ainsi que sur la collecte et l'analyse des données.
- Elle rend possible un enseignement expérimental à distance. Cela peut être particulièrement intéressant pour une formation continue ou pour assurer la continuité pédagogique dans le cas d'une absence prolongée.
- L'utilisation de matériel frugal permet de demander aux personnes étudiantes de faire des mesures chez elles, ce qui ouvre des possibilités pédagogiques pour l'enseignement de la physique expérimentale, par exemple l'adoption d'une pédagogie de la classe inversée.
- L'approche frugale facilite l'approche par projet et le travail en groupe en surmontant les défis de la co-utilisation des locaux et des équipements.
- Elle offre l'occasion de sortir l'expérimentation des laboratoires formels qui peuvent donner un côté intimidant et artificiel à l'expérience.
- Elle diminue les coûts et l'empreinte écologique associés aux TP dans le contexte d'une nécessaire sobriété à l'heure de la crise climatique. L'utilisation de matériel frugal permet en effet la réutilisation de matériel déjà disponible et peut éviter l'achat de matériel neuf.

Parmi tous ces avantages, l'objectif central de l'approche frugale demeure celui de démythifier les instruments de mesure et d'ancrer les expérimentations en physique dans le réel. Cela permet de proposer autre chose que des activités d'apprentissage fermées et contrôlées. En ouvrant les démarches d'investigation, les personnes étudiantes développent également des habiletés différentes, dont le bricolage, la conception technique, le travail en équipe, l'autonomie et la créativité.

Dans ce contexte, les téléphones intelligents (smartphones) peuvent jouer un rôle pertinent. En effet, il s'agit d'un objet que la vaste majorité des personnes étudiantes possède déjà et dont l'utilisation peut être optimisée pour faire de la physique. Il contient notamment de nombreux capteurs (microphone, caméra, accéléromètre, gyroscope, etc.) qui peuvent être utilisés pour faire des mesures de phénomènes physiques variés (voir Monteiro et Marti (2022) pour un état de l'art). Plusieurs applications permettent de travailler sur les données recueillies par ces capteurs. Nous utilisons régulièrement l'application Fizziq (conçue pour l'enseignement préuniversitaire) ou phyphox (adaptée à l'enseignement universitaire) à cet égard. Ces deux applications sont gratuites et disponibles sur les appareils de marque Apple et sur ceux dont Android est le système d'exploitation. Dans ce qui suit, nous proposons plusieurs façons d'utiliser le téléphone intelligent et le matériel frugal afin de réaliser des expérimentations ouvertes en physique. Ces exemples ont tous été mis à l'essai dans nos classes universitaires.

LA PHYSIQUE AU BOUT DES DOIGTS

Cette expérimentation invite les personnes étudiantes à découvrir comment faire une mesure physique en utilisant un téléphone intelligent. Dans une salle de classe typique mais spacieuse, avec du matériel de tous les jours organisé dans des caisses (pailles, carton, mousse, ruban adhésif, papier d'aluminium, pâte à modeler, etc. (Fig. 1)), il s'agit de faire des mesures lors de séances hebdomadaires.

D'abord guidées sur la méthode, les personnes étudiantes sont de plus en plus libres, jusqu'à un dernier projet très ouvert. Ainsi, une année, nous avons commencé par l'étude du pendule (chaque groupe fabrique un pendule en suspendant un téléphone intelligent et étudie ses oscillations), puis nous avons réalisé des projets plus ouverts (propagation du son dans un tube étudié en déplaçant un écouteur dans le tube, atténuation de la lumière à travers des feuilles transparentes avec le capteur de luminosité, lien entre accélération et vitesse de rotation avec les capteurs de mouvements, son émis par une corde de guitare en fonction de sa longueur et de sa tension avec le microphone, résonance d'une bouteille en fonction du volume d'eau qu'elle contient, etc.), pour finir avec la conception collective d'un jeu d'évasion dans lequel chaque énigme ne peut se résoudre que par une mesure physique réalisée à l'aide de son téléphone.

Les rapports que les personnes étudiantes doivent produire prennent d'abord la forme de comptes rendus classiques, puis ils évoluent vers des formes plus originales : affiche, animation pas à pas, site web, etc. Dans le cas du jeu d'évasion, il a été testé par des personnes étudiantes de l'université qui n'avaient pas suivi notre cours.



Figure 1. Le matériel proposé comporte des pailles, du carton, de la mousse, des tiges en bois, du ruban adhésif, des outils de découpe, des fils et ficelles, des gobelets, des mètres mesuriers, de la papeterie variée, des blocs de construction, des élastiques, des morceaux de coton, du papier d'aluminium et de la pâte à modeler. La liste n'est pas exhaustive, et elle est régulièrement modifiée.

DES PROJETS DE PHYSIQUE AVEC DES MICROCONTRÔLEURS ARDUINO

Pour aller au-delà du côté « boîte noire » du téléphone intelligent, les personnes étudiantes utilisent des capteurs et microcontrôleurs venus du monde des laboratoires de fabrication collaboratifs (fab labs) : les cartes Arduino (Bouquet et al., 2017). Avec ces objets et du matériel de récupération, il s'agit de mener, en environ cinq jours, une étude physique dont le sujet est laissé libre : mesures de mécanique avec des capteurs de mouvements, de physique ondulatoire avec des microphones, de thermodynamique avec des thermomètres, etc. (Fig. 2). Cela permet d'utiliser une approche par projet sans trop de problèmes de matériel, mais aussi de se confronter aux défis de conception et de fabrication de dispositifs expérimentaux ainsi qu'au fonctionnement des capteurs, tout en laissant un très grand choix dans le sujet à explorer.

Laisser les personnes étudiantes concevoir leur sujet sans liste préétablie, puis le piloter de A à Z est un aspect important dans cette activité qui mène à des projets variés, comme l'étude de l'effet magnétocalorique ou du rebond d'une balle, la fabrication et le test d'une balance, l'étude de la déformation d'une poutre métallique et de l'effet d'un recuit thermique ou encore l'étude de la percolation électrique dans un mélange de billes métalliques et isolantes. Certains projets particulièrement aboutis ont pu faire l'objet de publications auxquelles les personnes étudiantes de troisième année universitaire ont participé (Henaff et al., 2018; Hilberer et al., 2018). Lors du confinement dû à la pandémie de COVID-19, cet enseignement a pu être maintenu à distance. Il a permis de maintenir un lien privilégié avec les étudiants et étudiantes, plus riche que les cours en ligne plus unidirectionnels.

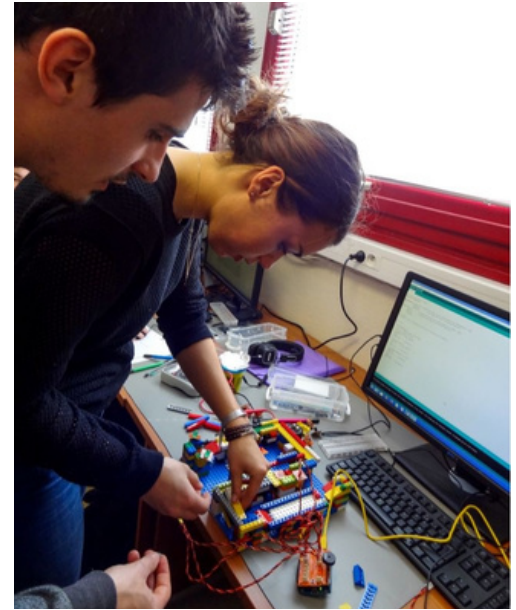


Figure 2. Construction d'un dispositif de mesure avec un capteur relié à une carte Arduino.

UTILISER UNE FICTION POUR ENGAGER LES ÉTUDIANTS ET ÉTUDIANTES

Dans cette activité, les personnes étudiantes intègrent un scénario où elles deviennent des membres d'une équipe de soutien technique (Fig. 3). Pendant deux jours consécutifs, leur équipe doit aider des cosmonautes ou des espions dans leur travail (fabriquer des dispositifs pour mesurer l'activité sismique, magnétique ou lumineuse d'une planète inconnue; concevoir, fabriquer et tester un dispositif pour émettre et capter un signal lumineux, etc.). Le personnel enseignant est présent et fait avancer l'histoire, mais il joue également des rôles dans lesquels ils n'ont pas de compétences en physique. Les équipes doivent donc décider elles-mêmes des directions à suivre. Les enseignantes et enseignants peuvent quand même faire des retours à l'équipe à travers différents artifices : experts internationaux disponibles uniquement pendant quelques minutes ou instance de certification extérieure qui envoie un rapport. Ce format permet un engagement important des étudiants et étudiantes (Bouquet, Bobroff, Delabre et al., 2023). Un site web permet à toute personne enseignante de tenter une expérience similaire avec des options adaptées à ses propres contraintes de temps et de niveau (Enseigner la physique par la fiction, 2022).



Figure 3. Les personnes étudiantes conçoivent et fabriquent des prototypes pouvant être lancés par la fenêtre, avec un temps de chute le plus près possible de deux secondes. L'atterrissage doit faire un maximum de bruit. Un test collectif est organisé au bout d'une heure et demie, à l'issue duquel ils et elles choisissent collectivement le dispositif qui répond le mieux aux besoins exprimés par un espion en mission.

FAIRE DE LA PHYSIQUE EN FORÊT

Il est possible d'exploiter le nomadisme que permet l'utilisation de matériel frugal en proposant aux étudiants et étudiantes de faire de la physique en milieu naturel (Bouquet, Bobroff, Etienne et al., 2023). Cette expérimentation permet de réfléchir à la problématique du dérèglement climatique et de montrer que la physique est un outil qui permet de décrire et de comprendre le réel, même en dehors d'une situation bien contrôlée d'un laboratoire. En encourageant les équipes à regarder la forêt avec l'œil de la physique, elles peuvent par exemple y étudier le lien entre la densité des arbres et leur hauteur, le débit d'une rivière, la chute d'un gland, l'effet de la densité des arbres sur l'atténuation sonore ou l'élasticité d'une branche (Fig. 4). Tous ces projets sont ensuite présentés dans le cadre d'une exposition éphémère conçue collectivement par la classe.



Figure 4. Groupe d'étudiantes mesurant la densité surfacique d'arbres et l'intensité sonore moyenne en forêt pour étudier la corrélation entre ces deux grandeurs.

CONCLUSION

L'approche frugale permet le déploiement d'une pédagogie authentique et riche en physique expérimentale. Les retours que nous avons reçus des personnes étudiantes nous convainquent de l'intérêt de proposer des projets plus ouverts admettant des solutions multiples. Parmi ces retours, on retrouve :

- des commentaires sur les compétences expérimentales développées lors de l'enseignement : « Prendre une mesure correctement, ce n'est pas si simple » et « la conception et les contraintes d'une expérience étaient enrichissantes ».
- des commentaires sur l'autonomie et la liberté de mener son projet : « Satisfaction d'avoir pu effectuer de A à Z un projet scientifique tout en voyant que l'on pouvait utiliser nos connaissances »; « le fait de choisir nous-mêmes le thème sur lequel on veut travailler et de monter nous-mêmes nos expériences » et « la liberté qu'on avait ».
- des commentaires sur le travail en groupe : « répartir les tâches. Discuter, faire valoir son point de vue lorsqu'on n'est pas d'accord »; « parfois, le travail en groupe, ce n'est pas facile, car on a tous des idées différentes et on ne se met pas d'accord aussi facilement... » et « le travail en groupe peut être très efficace en s'organisant ».

Enfin, l'approche frugale nous permet aussi d'atteindre un objectif absolument incontournable, autant pour les personnes étudiantes qu'enseignantes, celui de prendre du plaisir à faire de la physique : « La science n'est pas que des calculs longs et incompréhensibles. Ça peut être vraiment fun ».

REMERCIEMENTS

Ce travail a bénéficié du support et du financement de la Chaire de recherche-action sur l'innovation pédagogique de l'Université Paris-Saclay et de l'Institut Villebon – Georges Charpak. Nous remercions tout le personnel enseignant qui nous a suivis dans ces enseignements et les étudiants et étudiantes qui les ont subis.

Références

- Al-Shamali, F. et Connors, M. (2010). Low-cost physics home laboratory. Dans D. Kennepohl et L. Shaw (dir.), *Accessible elements: Teaching science online and at a distance* (p. 131-145). AU Press.
- Bouquet, F., Bobroff, J., Delabre, U., Barberet, P., Berry, V., Allaire-Duquette, G. et Moyon, M. (2023). Using fiction in physics' laboratories to engage undergrad students. Dans G. S. Carvalho, A. S. Afonso et Z. Anastácio (dir.), *Fostering scientific citizenship in an uncertain world. Selected papers from the ESERA 2021 conference* (p. 171-182). Springer.
- Bouquet, F., Bobroff, J., Etienne, L. A. et Vardon, C. (2023). Teaching physics in the woods. *American Journal of Physics*, 91(9), 685-689. <https://doi.org/10.1119/5.0143470>
- Bouquet, F., Bobroff, J., Fuchs-Gallezot, M. et Maurines, L. (2017). Project-based physics labs using low-cost open-source hardware. *American Journal of Physics*, 85(3), 216-222. <https://doi.org/10.1119/1.4972043>
- Deacon, C. et Hajek, A. (2011). Student perceptions of the value of physics laboratories. *International Journal of Science Education*, 33(7), 943-977. <https://doi.org/10.1080/09500693.2010.481682>
- Enseigner la physique par la fiction (2022). <https://vulgarisation.fr/fictions/>
Henaff, R., Le Doudic, G., Pilette, B., Even, C., Fischbach, J.-M., Bouquet, F., Bobroff, J., Monteverde, M., Marrache-Kikuchi, C. A. (2018). A study of kinetic friction: The Timoshenko oscillator. *American Journal of Physics*, 86(3), 174-179. <https://doi.org/10.1119/1.5008862>
- Hilberer, A., Laurent, G., Lorin, A., Partier, A., Bobroff, J., Bouquet, F., Even, C., Fischbach, J.-M., Marrache-Kikuchi, C. A., Monteverde, M., Pilette, B. et Quay, Q. (2018). Temperature-dependent transport measurements with Arduino. *Papers in physics*, 10, 100007-100007. <https://doi.org/10.4279/pip.100007>
- Kovarik, M. L., Clapis, J. R. et Romano-Pringle, K. A. (2020). Review of student-built spectroscopy instrumentation projects. *Journal of Chemical Education*, 97(8), 2185-2195. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.0c00404>
- Kozminski, J., Beverly, N. et Lewandowski, H. (2014), American Association of Physics Teachers recommendations for the undergraduate physics laboratory curriculum. American Association of Physics Teachers. https://www.aapt.org/Resources/upload/LabGuidelinesDocument_EBendorsed_nov10.pdf
- Monteiro, M. et Martí, A. C. (2022). Resource letter MDS-1: Mobile devices and sensors for physics teaching. *American Journal of Physics*, 90(5), 328-343. <https://doi.org/10.1119/5.0073317>