

Enseigner la physique autrement

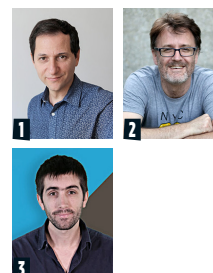
Julien Bobroff, Frédéric Bouquet, université Paris-Saclay,
et **Ulysse Delabre**, université de Bordeaux

Smartphones et cartes Arduino permettent de réinventer les séances de travaux pratiques (TP). Avec ces outils, les étudiants en physique et leurs professeurs peuvent désormais mener des expérimentations avec plus de liberté et d'initiatives à l'université. En voici quelques exemples issus de notre pratique d'enseignement.

Quels souvenirs gardez-vous de vos séances de travaux pratiques en physique, les « TP » ? Prenons la mesure de la distance focale d'une lentille. Les étudiants en binôme mesurent sur un banc optique différentes dispositions d'un objet par rapport à une lentille. Ils observent l'image de l'objet et testent si leurs résultats confirment bien le modèle théorique vu en cours. Ce TP typique permet d'étudier un phénomène physique bien calibré à l'aide d'un instrument de mesure via un protocole détaillé et sans surprise. Cette démarche présente de nombreux avantages. Elle apprend à tracer et à analyser des résultats. Elle permet de montrer les phénomènes classiques et de manipuler les outils de mesure usuels de la physique. Bref, elle permet à l'étudiant de faire ses gammes dans le monde difficile de l'expérience scientifique. Mais ce type de TP donne aussi une vision déformée de la science :

l'expérience semble ne servir qu'à vérifier la théorie et ne laisse de place ni à l'imprévu ni à la créativité. La physique s'y retrouve déconnectée du monde réel et encore plus de la recherche. Elle donne la fausse impression de ne pouvoir être mesurée qu'avec des outils de laboratoire. Le rapport aux professeurs y est très formaté : l'enseignant, qui connaît le résultat, aide l'étudiant à l'atteindre. De notre propre expérience, les étudiants manquent de motivation pour ces TP, à force de suivre une procédure trop cadrée sans comprendre forcément l'intérêt de la démarche expérimentale. Les enseignants aussi peuvent se lasser, à force de répéter les mêmes protocoles année après année. En réaction à ces limitations, une

nouvelle dynamique se développe depuis peu dans plusieurs universités pour tenter d'inventer d'autres formes de TP. Ces nouveaux enseignements ne visent pas forcément à faire du passé table rase – les TP classiques ont toute leur place et leur importance – mais à les compléter pour offrir une diversité de pratiques et une autre image de la physique aux étudiants. Curieusement, ce mouvement pédagogique n'est pas né de grandes idées sur la pédagogie, mais de l'apparition de nouveaux outils sans lien évident avec la physique : les smartphones et les cartes électroniques programmables telles les cartes Arduino. En France, 98 % des 18-24 ans possèdent un smartphone, selon ●●



PHYSICIENS

Julien Bobroff (1), Frédéric Bouquet (2) et Ulysse Delabre (3) sont enseignants-chercheurs. Spécialistes respectivement de physique quantique et d'optofluidique, ils développent des enseignements expérimentaux, qui s'inspirent du monde de la vulgarisation, du design et des fablabs.

Contexte

Les travaux pratiques (TP) constituent, avec les cours théoriques, la base de l'apprentissage des sciences. L'élève y apprend à questionner le sens d'une mesure ou à interpréter ses résultats. La procédure des séances est parfois rigide, déconnectée du monde réel. De nouvelles pratiques pédagogiques sont possibles.

●●● le baromètre du numérique 2018 du Credoc. Sans le savoir, ils possèdent ainsi les différents capteurs habituellement utilisés pour s'orienter, jouer ou filmer (accéléromètres, magnétomètres, gyroscopes...). Des applications permettent en deux minutes de mesurer une accélération, un champ magnétique, une intensité lumineuse et bien d'autres grandeurs physiques. Par exemple, l'université d'Aix-la-Chapelle, en Allemagne, a développé l'application Phyphox (1), que nous venons de traduire en français; elle trace en direct les mesures des capteurs sélectionnés par l'utilisateur, permettant leur analyse ou leur transfert sur ordinateur. Dans les mains du physicien, le smartphone devient ainsi un petit laboratoire portable. Maniable et léger, il est déjà dans la poche de nos étudiants et les mesures qu'il effectue sont souvent de grande qualité: l'accéléromètre peut détecter la vibration dans le sol émise par un homme qui saute à plus de 15 mètres de distance; le capteur de pression peut mesurer la dépression créée par la simple ouverture de la porte des toilettes dans un avion! Autre outil, la carte Arduino vient du monde des fablabs (2) et de la culture maker (3) où elle est

appréciée pour sa grande versatilité et son très bas coût – une dizaine d'euros seulement. Il s'agit d'un microcontrôleur facilement programmable avec n'importe quel ordinateur, et sur lequel il est aisé de connecter et d'utiliser de nombreux capteurs de lumière, de son, de champ magnétique... Instrument de choix des designers ou des artistes pour les installations nécessitant de l'électronique embarquée, elle est en *open source* et mobilise une vaste communauté d'utilisateurs, avec tutoriels, forums et vidéos d'aide. Les physiciens peuvent la détourner de ses usages habituels et la transformer en instrument de mesure.

Outils complémentaires

Pour faire de la physique, smartphone et Arduino partagent de nombreux avantages: le bas coût, la communauté en ligne, la versatilité et l'aspect nomade. Le smartphone est plus facile d'utilisation. Il permet de se concentrer sur la mesure et la démarche expérimentale sans se soucier de la connectique. La carte Arduino et ses extensions demandent un apprentissage un peu plus long pour apprendre à la câbler et à la coder (en C, en Scratch ou en Python). Elle est plus centrée sur l'instrumentation elle-même:

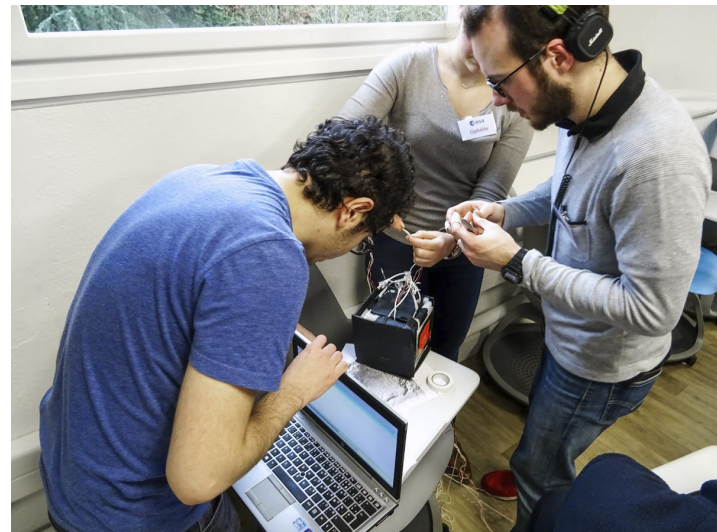


▲ Ces séances d'expérimentations permettent aux participants d'effectuer un travail collectif de réflexion et de conception.

(*) **Un fablab** (diminutif de « fabrication laboratory ») est un lieu où les citoyens peuvent réaliser des projets grâce à des machines et des outils informatiques mis en partage.

(*) **La culture maker** combine la volonté de fabriquer soi-même des objets grâce aux outils numériques et aux savoir-faire artisanaux et un esprit de partage et de collaboration.

comment une mesure se fait vraiment, avec ses limites et ses biais. Elle est aussi plus modulable, avec une grande variété de capteurs, pour la physique mais aussi pour la chimie ou les sciences du vivant (pH-mètre, thermomètre...). À la différence du smartphone, Arduino peut activer des sorties, comme allumer une LED ou actionner un moteur. Cela ouvre la porte à des projets plus appliqués (lire p.62). Le smartphone, efficace et facile d'utilisation, et la carte Arduino, outil évolutif et plus «bricolo» sont complémentaires: il faut choisir l'un ou l'autre selon son public, ses contraintes et surtout ses objectifs pédagogiques. Même si toute nouvelle technologie n'est pas forcément synonyme d'innovation



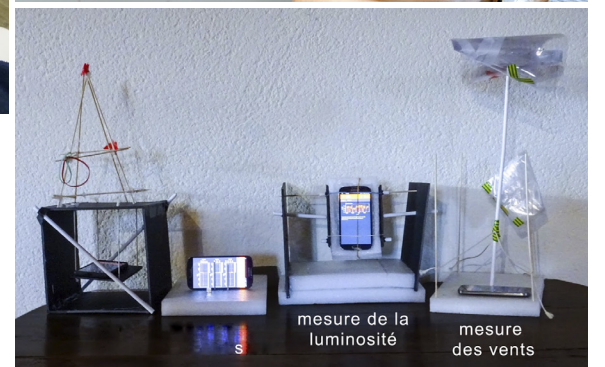
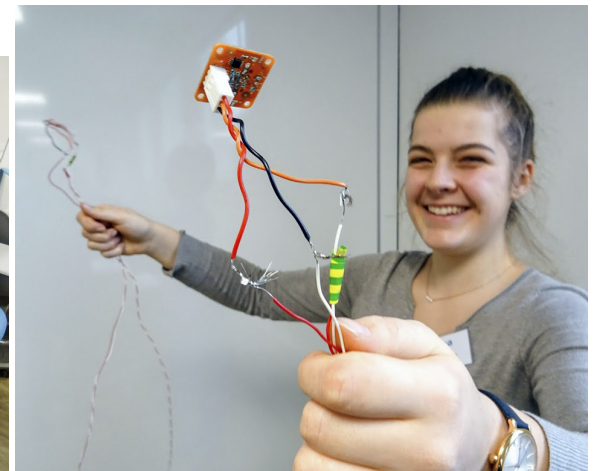
▲ À l'aide d'outils simples comme des Lego ou des cartes Arduino, ces étudiants conçoivent leurs propres instruments de mesure de l'activité sismique, du magnétisme, de la luminosité ou de la vitesse du vent. Une activité qui combine connaissances théoriques et bricolage.

pédagogique, les smartphones et Arduino modifient profondément la façon d'enseigner la physique expérimentale. Dès 2011, quelques pionniers, comme Joël Chevrier à l'université de Grenoble Alpes, ou Philippe Jeanjacquot à Lyon, ont utilisé le smartphone dans les salles de TP pour enseigner la mécanique. Nous avons suivi leur exemple avec de Bordeaux, nous avons proposé un enseignement de « smartphonique », où 350 étudiants de première année de licence doivent réaliser des expériences en lien avec le cours mais en dehors des salles de TP, en autonomie: résonance d'une corde de guitare, estimation de la vitesse du son par effet Doppler, éclairage en fonction de la distance... Ces projets faciles à mettre en œuvre peuvent s'effectuer à n'importe quel moment de la progression pédagogique, ce qui restait difficile à proposer avec des TP plus classiques à cause de contraintes matérielles. Un dernier projet plus ambitieux est laissé au choix des étudiants au cours duquel ils peuvent montrer leur créativité: trouver la masse de la Lune, analyser un salto arrière, voir les pixels d'un écran...

tout ça avec des smartphones! À l'université Paris-Saclay, nous nous sommes directement inspirés de cet enseignement en y ajoutant une dimension ludique: les étudiants passent six séances à mesurer différents phénomènes classiques de physique en élaborant eux-mêmes leur protocole. Puis, pendant deux autres séances, ils construisent ensemble un jeu collectif à base de smartphones et de physique. Cela leur permet de croiser leurs connaissances théoriques avec d'autres compétences: le bricolage, le dessin, le jeu... C'est aussi une façon de les entraîner au travail en équipe et par projet et de mieux intégrer les plus rétifs aux enseignements traditionnels.

Travail en équipe

Quand on demande aux étudiants qui ont suivi ces enseignements ce qu'ils en retiennent, ils évoquent le travail de groupe, la démarche expérimentale, l'analyse des données, la confrontation à la réalité expérimentale et la motivation. En effet, ces séances favorisent une démarche d'investigation en équipe: elles autorisent l'erreur, la progression, la découverte de



l'inconnu, tout en gardant un caractère ludique. Elles permettent aux étudiants de concevoir des dispositifs expérimentaux qui n'existent souvent pas. Elles démontrent que le physicien peut mesurer le monde qui l'entoure, que ce soit la capacité calorifique de sa bouilloire ou la hauteur de son immeuble (lire p. 60). Enfin, elles changent la posture de l'enseignant. Celui-ci découvre souvent les problèmes en même temps que les étudiants. Il enseigne alors comment chercher une solution, tester, calibrer, améliorer... À petite échelle, il initie les étudiants à son propre métier de chercheur. Ce n'est d'ailleurs pas surprenant que ce mouvement soit porté surtout par des enseignants-chercheurs. Après ces premières expériences encourageantes se pose l'enjeu de l'essaimage à plus grande échelle. L'utilisation de smartphones s'est développée dans plusieurs établissements (université de Bordeaux, Paris-Saclay, Marseille, Grenoble, quelques lycées), mais reste le ●●●



▲ À l'université de Bordeaux, des étudiants utilisent un smartphone afin de mesurer la résonance d'une corde de guitare.



▲ Avec un pendule géant et le capteur de lumière d'un smartphone, on peut connaître la hauteur de cet immeuble.

LE SMARTPHONE PHYSICS CHALLENGE

« Comment mesurer la hauteur d'un bâtiment avec un baromètre? », aurait demandé un professeur au futur Prix Nobel Niels Bohr, alors étudiant. Selon la légende, plutôt que de donner la réponse attendue (utiliser la variation de pression entre le bas et le haut du bâtiment pour déduire la hauteur), celui-ci inventa une dizaine d'expériences originales – et correctes. Combien en proposerait-il aujourd'hui avec un smartphone? Avec son Smartphone Physics Challenge, l'équipe « La Physique Autrement » (université Paris-Saclay) en a trouvé 61! Par exemple, fabriquer un pendule

géant en accrochant au sommet de l'immeuble un fil et y suspendre une masse au niveau du sol. En laissant osciller ce pendule, on observe des baisses régulières de luminosité lorsque la masse passe devant le capteur de lumière d'un smartphone. On en déduit la période d'oscillation du pendule, qui est reliée par une formule simple à la longueur du fil, c'est-à-dire la hauteur de l'immeuble. Vous pouvez tester ces méthodes en les retrouvant en ligne (1)!

(1) <http://hebergement.u-psud.fr/supraconductivite/smartphone-physics-challenge>

●●● fait d'initiatives isolées. Depuis peu, les choses changent. Les physiciens commencent à échanger sur ces pratiques dans des conférences ou des journaux spécialisés, tels *The Physics Teacher* ou le *Bulletin de l'union des physiciens*.

Nous avons nous-même développé des collaborations avec le Japon, l'Italie, l'Allemagne ou la Belgique. Nous créons des outils de diffusion, comme le site ouvert de partage et d'aide opentp.fr. En parallèle, nous continuons de tester de nouvelles façons d'enseigner, notamment à l'Institut Villebon Georges-Charpak, véritable laboratoire pédagogique. Par exemple, nous avons plongé nos

étudiants dans une fiction que nous avons inventée où ils jouent le rôle d'ingénieurs chargés d'assister une mission spatiale à distance. Manque de chance, dans le vaisseau fictif, il ne reste qu'un petit kit de base, avec, vous l'aurez deviné, quelques smartphones et cartes Arduino. Les étudiants doivent alors développer des trésors d'ingéniosité pour aider le vaisseau, à distance, à sonder puis à explorer la planète et à communiquer avec des extraterrestres.

Étudiants et enseignants semblent ravis de ces nouveaux enseignements au vu de nos enquêtes. Mais c'est souvent le cas dès que l'on propose un changement

POUR EN SAVOIR PLUS

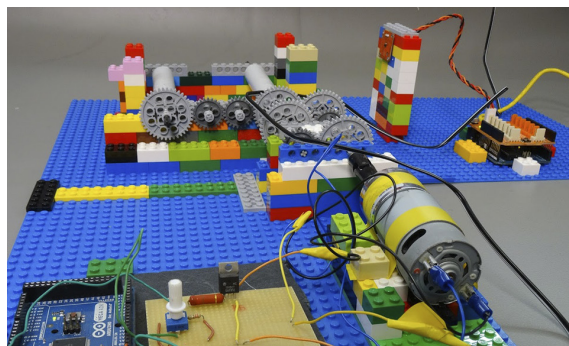
■ *Smartphonique - Expériences de physique avec un smartphone*, Ulysse Delabre, Éditions Dunod, 2019.

pédagogique. Il manque des études plus poussées concernant les effets sur les savoir-faire disciplinaires et transversaux des étudiants. Les sciences de l'éducation, du design ou la psychologie cognitive ont leur mot à dire sur ces pratiques. Nous appelons à un rapprochement entre physiciens, designers, makers et chercheurs en éducation pour repenser ensemble l'enseignement des sciences expérimentales à l'aune de ces premiers essais, afin de rendre la physique plus palpable, plus ludique, et montrer à nos étudiants pourquoi nous trouvons cette discipline si passionnante. ■

(1) <https://phyphox.org>

Des « open TP » pour imaginer ses propres expériences

Lorsque les étudiants entrent dans la salle de travaux pratiques, ils sont d'abord surpris du matériel à leur disposition : des boîtes de Lego, un bric-à-brac mêlant papier aluminium, pâte à modeler ou brochettes en bois, et des cartes Arduino. Les « open TP » sont proposés en 3^e année de licence de physique fondamentale à l'université Paris-Saclay. Au début, les étudiants doivent relever six petits défis pour s'initier à l'usage des cartes Arduino, comme allumer une LED, mesurer une résistance ou fabriquer un variateur. Puis ils ont quelques heures pour inventer un jeu sous contraintes, ce qui les initie à l'utilisation de différents capteurs (par exemple : « *Inventez un jeu d'adresse avec un capteur de champ magnétique* »). L'ambiance est au bricolage, à la créativité et au partage. Vient ensuite le projet proprement dit. Point crucial, aucun sujet n'est proposé par les enseignants : après un brainstorming collectif, chaque binôme imagine



son propre sujet de TP. Les étudiants ont ensuite cinq jours pour construire l'expérience, la calibrer, l'utiliser et analyser les résultats.

Des réalisations variées

Depuis cinq ans que nous menons cet enseignement, les projets réalisés sont variés : certains sont simples mais exigeants, comme fabriquer une balance la plus précise possible. D'autres sont ambitieux : la transition d'un métal en supraconducteur vers -200°C est mesurée avec un petit thermomètre ; l'effet magnétocalorique

▲ *Cet oscillateur de Timoshenko, fabriqué par des étudiants de l'université Paris-Saclay, mesure la friction dynamique. Le montage se compose de Lego, de cylindres et d'une carte Arduino.*

du gadolinium est mesuré à 0,01°C près ; le coefficient de friction dynamique est déterminé en utilisant deux cylindres tournant en sens opposé qui entraînent une plaque dans un mouvement oscillant, dont la période d'oscillation renseigne sur les frottements. Cette dernière expérience (dite de Timoshenko), en général délicate et coûteuse, est ici réalisée pour une centaine d'euros. Elle a même été publiée par les étudiants et enseignants ensemble dans une revue scientifique (1).

Ces travaux pratiques n'utilisent pas des Lego et des Arduino juste pour réduire les coûts ou pour « faire moderne ». Ils remettent l'instrumentation et la conception au centre du processus expérimental. En arrivant le premier jour devant une table vide, l'étudiant n'a pas de garantie que son dispositif expérimental fonctionnera. L'enseignant l'assiste sans solutions toutes faites. Cet enseignement a depuis essaimé dans d'autres établissements, et a même inspiré l'Éducation nationale pour les nouveaux programmes de Terminale, une occasion de mêler physique et programmation. ■

(1) R. Henaff *et al.*, *Am. J. Phys.*, 86, 174, 2018.