



Normale
Physics Review

INPR

École normale
supérieure

— Fights Bohr-dom —

Édito N₂₇ : Normale Summer Review

À l'approche du solstice d'été, nous vous offrons le dernier numéro de la Normale Physics Review de l'année, pour savourer les beaux jours avec un zeste de science.

Dans ce numéro, retrouvez les recherches passionnantes d'Emmanuel Baudin, entre opto-électronique et effet Schwinger mésoscopique. Et si vous rêvez d'une trêve estivale avec la physique pure et dure, l'interview de Mehdi Moussaïd, youtubeur et chercheur en science des foules, saura vous ravir.

Et comme toujours, laissez votre esprit vagabonder et alimentez votre curiosité avec les questions et la photo mystère !

– Juliette Savoye pour l'équipe de rédaction

SOMMAIRE

Physicist's life	2
Opto-électronique et graphène : rencontre avec Emmanuel Baudin!	2
Des mouvements de foule à la foule d'abonnés : Mehdi Moussaïd	5
Sir, I have a question	8
New problems	8
Mystery photo	9
Solution of N ₂₆	9
Photo of N ₂₇	9
Acknowledgements	9



normalephysicsreview.
netlify.app



facebook.com/
NormalePhysicsReview

PHYSICIST'S LIFE

Opto-électronique et graphène : rencontre avec Emmanuel Baudin !

Enseignant-chercheur à l'ENS, spécialiste d'opto-électronique et des matériaux 2D, nous sommes allés à la rencontre d'Emmanuel Baudin ! Si son parcours peut sembler classique aux premiers abords, il est en réalité plutôt exotique par la diversité de ses champs d'études.

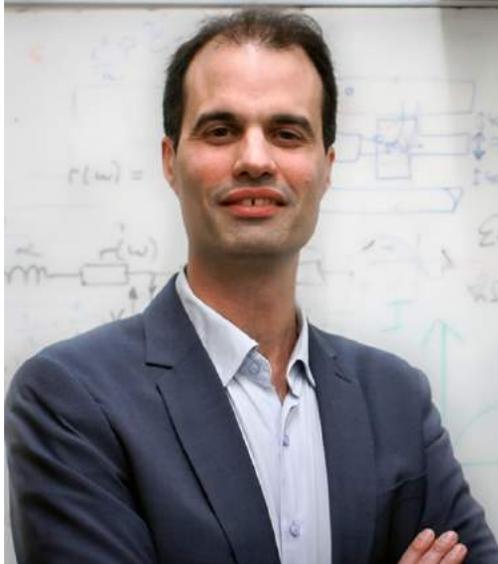


Figure 1 – Emmanuel Baudin, enseignant-chercheur à l'ENS-PSL.

Emmanuel Baudin : « Je suis Parisien, j'ai fait une classe préparatoire à Janson de Sailly en PC, puis ensuite je suis rentré à l'ENS Ulm . » Après l'ENS, le chercheur soutiendra une thèse sur la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) de l'hélium superfluide. À l'issue de celle-ci, il s'oriente en post-doc vers l'optique des semi-conducteurs. En 2012, il obtient un poste de maître de conférences à l'ENS. « Je travaille en physique, en optique et électronique des semi-conducteurs et en particulier sur les matériaux 2D qui sont une catégorie de nouveaux matériaux cristallins. »

Ces matériaux sont l'objet d'une recherche soutenue travers le monde, et ont la particularité d'être formés de plans atomiques pouvant être séparés et réassemblés à façon. L'étude des propriétés de ces matériaux nouveaux permet de déterminer lesquels présentent un intérêt scientifique « parce qu'on peut les utiliser pour explorer des phases de la matière exotiques, comme c'est le cas pour les isolants topologiques », de ceux qui présentent un intérêt industriel « sachant que le temps qu'il faut pour pouvoir développer une technologie de pointe en partant d'une démonstration en laboratoire, c'est

environ 25 ans. »

Si sa recherche porte sur ces thématiques, Emmanuel Baudin précise « J'étudie l'interaction lumière-matière, et en particulier l'opto-électronique : Par exemple, j'étudie l'émission de lumière qui peut résulter du passage d'un courant dans un matériau, ou bien la manière dont la lumière, ou même tout simplement l'environnement électromagnétique, modifie les propriétés de transport dans ce matériau. On peut utiliser mes travaux pour réaliser des sources lumineuses ou des photodétecteur, mais ce qui m'intéresse, c'est plutôt de comprendre quels sont les processus élémentaires en jeu dans ces phénomènes là. Les matériaux qui m'intéressent sont principalement le graphène et les matériaux 2D. » Cette recherche très fondamentale est possible car les matériaux étudiés sont très purs et permettent d'atteindre les régimes intrinsèques. Dans ce cas, les effets parasites liés au désordre et aux impuretés sont très faibles laissant alors émerger des phénomènes robustes, reproductibles et intimement liés aux concepts fondamentaux de la physique.

L'électroluminescence du graphène

Les découvertes se sont alors faites progressivement. « En 2015, je travaillais sur le couplage fort lumière-matière et j'envisageais d'orienter mes recherches vers l'optoélectronique des matériaux 2D. A cette époque, mon collègue Bernard Plaçais* travaillait sur le refroidissement des électrons dans le graphène. C'est pourquoi, en parallèle de mon projet naissant, pour me mettre le pied à l'étrier sur les expériences de transport, j'ai commencé à travailler sur le refroidissement du graphène avec Bernard. Dans leur expérience, son équipe[l'équipe de Bernard Plaçais, ndlr] avait tellement amélioré la qualité de leurs transistors graphène qu'ils étaient arrivés au stade où le seul mécanisme de refroidissement résiduel était le refroidissement radiatif via le champ proche optique ! Habituellement le refroidissement radiatif joue un rôle négligeable dans la matière condensée, mais son intensité est exacerbée lorsque l'environnement électromagnétique du matériau présente des modes de champ proche, car ceux-ci sont des modes supplémentaires pour transférer l'énergie. Ces modes, qui, dans le cas qui nous intéressait, étaient des phonon-polaritons, résultent du couplage fort-lumière, et c'était justement ma spécialité ! »

Mais il y avait plus, Emmanuel nous explique « Pour mesurer la température des électrons, l'équipe de Bernard utilisait la thermométrie de bruit électronique qui consiste à mesurer les fluctuations thermiques du courant dans un conducteur. L'amplitude du bruit est directement proportionnelle à la température absolue des électrons, et ceci est imposé par le

* Bernard Plaçais est membre de l'équipe de physique mésoscopique de l'ENS. La NPR l'a interviewé dans son numéro 18.

théorème de fluctuation-dissipation. Or, dans le graphène, on observait quelque chose de très étrange : Lorsque l'on augmentait la tension appliquée à ses bornes, la température commençait par augmenter, puis brusquement elle se mettait à chuter ! Et l'effet n'était pas anecdotique, on a pu observer jusqu'à une réduction par 3 de la température absolue. »

Ce comportement étrange a trouvé une explication des plus surprenantes : « En 2014, le prix Nobel a été décerné pour les diodes électroluminescentes (LED) GaN qui constituent aujourd'hui la plupart de nos sources de lumières domestiques. Chaque année, les organisateurs du colloquium du département de physique demandent à un spécialiste du domaine en France de venir faire un exposé pour expliquer le prix Nobel. Cette année-là, c'était Claude Weisbuch qui, à l'issue de son exposé [2] sur le Nobel présenta brièvement ses propres travaux de recherches et mentionna quelque chose d'amusant : quand on fait fonctionner une LED, juste avant son seuil de diode, elle émet déjà un tout petit peu de lumière, quelques picowatt. Mais surtout elle agit alors comme un réfrigérateur. C'est à dire que la puissance lumineuse qu'elle émet est plus importante que la puissance joule que vous dissipez à l'intérieur. Elle agit comme un réfrigérateur parce que l'énergie des porteurs qui sont injectés dans la LED n'est pas suffisante pour pouvoir arriver dans la région de recombinaison. Par conséquent, d'où vient l'excédent d'énergie ? Il vient de l'énergie thermique de la LED. En fait c'est vraiment un réfrigérateur qui utilise la lumière comme fluide caloporteur ! Donc en 2014, cette idée m'avait marqué parce que je l'avais trouvée intrigante. Mais, en 2015/2016, on voit ce bruit qui s'effondre et on sait que c'est un mécanisme radiatif, un mécanisme de champ proche. Donc évidemment, j'ai vite fait le rapprochement et je me suis donc demandé si on était pas juste face à une LED, mais une LED très bizarre. En fait, cette idée est presque imposée par la thermodynamique : Dans n'importe quelle cours d'introduction on apprend qu'il y a 2 types de machines thermiques, celles du premier type (moteur) qui transforment l'énergie en chaleur – c'est le principe des radiateurs électriques : je fais passer un courant et il chauffe, mais d'après le second principe il ne peut pas refroidir. Et puis il y a les machines thermiques du second type qui sont au moins ditherme et qui peuvent conduire à un refroidissement comme les réfrigérateurs. Finalement, si un dipôle électrique refroidit lorsqu'un courant circule dedans, c'est que c'est un réfrigérateur. À partir de là, on a commencé à creuser cette piste et on s'est aperçu progressivement que c'était vraiment sérieux. »

Effet Schwinger mésoscopique

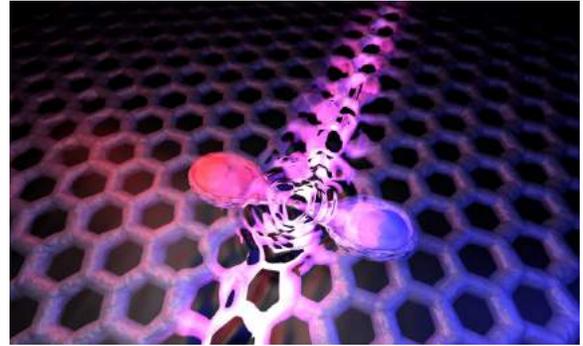


Figure 2 – Vue d'artiste de la polarisation du vide par création d'une paire électron-trou. Copyright : Emmanuel Baudin.

De là, plusieurs années de recherche ont été nécessaires pour réussir à mettre en oeuvre cette idée, la tester, etc. Emmanuel Baudin poursuit : « On a réussi à démontrer qu'on arrivait à atteindre le régime d'émissions de lumière. C'est le point où on en est aujourd'hui, mais ça nous a demandé sept ans ! » Ces sept années de recherche ont aussi récemment conduit à un article paru dans *Nature Physics* [1] relatif à la découverte d'un effet Schwinger mésoscopique dans le graphène, une première mondiale !

Emmanuel Baudin revient sur ce travail et la place qu'il a occupée : « Dans mon domaine de recherche, on ne choisit pas vraiment ce qui va se manifester car les matériaux sont nouveaux et les régimes qui nous intéressent sont loin de l'équilibre, donc il y a beaucoup d'inconnues. Par conséquent on fait une post-sélection sur ce que l'on décide d'étudier. C'est darwinien : tu vois un certain nombre de phénomènes et certains t'intriguent, d'autres ne t'intriguent pas en fonction de ta culture, de ta sensibilité, et de ta capacité à les comprendre. Cette étude de l'effet Schwinger a émergé parce qu'on essayait de regarder l'émission de lumière dans le moyen-infrarouge avec nos collaborateurs à l'Institut Langevin, mais comme à leur longueur d'onde d'émission la limite de diffraction de leur microscope était de l'ordre de 25 μ m, nos transistors habituels se sont avérés trop petits. A cause de cela, Aurélien [Aurélien Schmitt, doctorant dans l'équipe d'Emmanuel Baudin, ndlr] s'est mis à fabriquer des transistors plus grands. On a eu alors une première surprise en faisant leur caractérisation courant-tension : le courant de ces transistors saturait à forte tension. C'était bizarre au premier abord parce que la saturation du courant est attendue pour les transistors fait avec un semiconducteur qui possède un gap, mais pas avec le graphène qui n'en a pas. La saturation du courant, c'est très important en pratique parce que c'est ce qui permet de faire un amplificateur. Le facteur d'amplification des transistors d'Aurélien avait un vrai gain d'amplification, de l'ordre de 10, c'était pas mal

pour un transistor de puissance à effet de champ! »

Cet effet nouveau était en réalité plutôt attendu, explique le chercheur : « Au bout d'un moment on a commencé à comprendre d'où venait cette saturation. Sous fort champ, les électrons atteignent leur vitesse maximale. Celle-ci est atteinte lorsque leur énergie cinétique atteint l'énergie des phonons optiques du milieu. Un électron qui dépasse cette vitesse limite émet un phonon optique dans une direction aléatoire quasiment instantanément ce qui va randomiser son impulsion et donc le freiner. De facto, ce phénomène limite le courant maximal qui est donné par le nombre d'électrons de conduction dans le graphène multiplié par la charge élémentaire et par la vitesse maximale, c'est tout. Lorsque ce courant maximal est atteint, monter la tension n'a plus d'influence sur lui, mais la répartition du potentiel dans le canal de graphène change et il se forme un phénomène de pincement (ou pinch-off en anglais) qui correspond à la concentration de la chute de potentiel au voisinage de l'une des électrodes. Le pinch-off est connu de la physique des transistors depuis les années 1960, donc ce n'est pas vraiment une surprise, même si on est les premiers à l'avoir observé dans le graphène. »

« Le talent, c'est d'être capable de dire "Non, il y avait quelque chose là" et pour ça, il faut avoir été exposé à beaucoup d'idées. »

Toutefois, au-delà de cet effet déjà attendu, Emmanuel Baudin et son équipe ont pu identifier un effet nouveau grâce à leurs données d'excellente qualité. Il raconte : « Ce qui a été très fort, ce n'est pas ça, c'est le fait que ce n'était pas une saturation complète. Il y avait un petit excès de courant qui avait l'air de se reproduire d'un échantillon à l'autre et on sentait qu'il y avait quelque chose à comprendre, mais on n'arrivait pas à mettre le doigt dessus. Et puis, pendant l'été 2021 mon collègue Bernard Plaçais m'appelle très excité pendant les vacances et me dit "On est peut-être face à un phénomène de physique des hautes énergies!" » Si notre invité n'est d'abord pas convaincu de la profondeur de cette hypothèse, Bernard Plaçais défendra vivement l'idée. En effet, des résultats obtenus par l'équipe d'Andrei Geim, prix Nobel 2010 avec Konstantin Novoselov pour leur découverte du graphène, pointaient vers un phénomène similaire dans un type de graphène particulier, sans pour autant avoir suffisamment

de matière pour en tirer des conclusions claires. Pour Bernard Plaçais, c'est sûr, il faut continuer dans cette voie.

Emmanuel Baudin continue : « Donc au début, c'est lui qui a poussé, mais parce qu'il avait repéré que dans ces données, il y avait quelque chose à sauver. Aurélien et moi, on avait travaillé dessus avant en se disant "C'est amusant il y a ce petit excès de courant qui donne une bosse dans la conductance. Ça a l'air de se reproduire d'une fois sur l'autre. Qu'est-ce que c'est?". Et après le premier réflexe, c'est de se dire qu'on est tellement loin de l'équilibre qu'on n'a aucune idée de ce qui peut se passer dans ce système-là, et de passer à la suite. Mais voilà, de fait, le talent, c'est d'être capable de dire "Non, il y avait quelque chose là" et pour ça, il faut avoir été exposé à beaucoup d'idées. Cette fois-là, c'est Bernard qui a eu ce discernement : C'est lui qui a compris que le pinch-off produisait un champ électrique local très important qui pouvait conduire à l'effet Schwinger mésoscopique. Ensuite, c'est devenu un travail collectif pour assembler les pièces du puzzle et comprendre comment l'effet Schwinger – qui décrit la conversion de l'énergie d'un champ électrique en matière – émergeait dans le graphène. Pour ma part, dans ce travail, je me suis surtout concentré à essayer de comprendre en détail la saturation du courant qui s'est avérée somme toute assez subtile. De fait, je pense qu'elle n'a pas encore livrée tous ses secrets. En tout cas, avec ce travail on a ouvert une boîte de Pandore parce qu'on s'est aperçu que l'on pouvait simuler la physique des hautes énergies dans le graphène, et pas seulement l'effet Schwinger! Il y a une voie de recherche fantastique et totalement nouvelle à explorer. »

Ce travail est donc loin d'être fini et des publications restent à venir! Retrouvez la suite de cet entretien avec Emmanuel Baudin dans le prochain numéro de la NPR!

RÉFÉRENCES

- [1] Schmitt, A., Vallet, P., Mele, D. *et al.* Mesoscopic Klein-Schwinger effect in graphene., Nat. Phys. (2023).
- [2] Weisbuch, C. LEDs for lighting - the physical and materials basis, <https://savoirs.ens.fr/expose.php?id=2021>

– Lukas Péron et Aymane Legssyer

Des mouvements de foule à la foule d'abonnés : Mehdi Moussaïd

Mehdi Moussaïd est chercheur en sciences des foules à l'Institut Max Planck de Berlin. Il est également l'auteur de *Fouloscopie* (éditions Humensciences, 2019), mais vous le connaissez probablement grâce à sa chaîne YouTube, *Fouloscopie*, sur laquelle il vulgarise le domaine passionnant que sont les foules. La Normale Physics Review a eu la chance de l'interviewer ce mois-ci.

NPR : *Tu as commencé par une école d'ingénieur. Comment es-tu arrivé à basculer sur une thèse plutôt orientée éthologie et sciences cognitives ?*

Mehdi Moussaïd : Exactement, j'ai fait une école d'ingénieur en informatique au milieu des années 2000, c'était Polytech Nantes. J'ai suivi le parcours classique, comme quand on ne sait pas trop ce qu'on veut faire. À la fin de l'école, je me suis dit que je voulais être chercheur. Je voulais faire de la science parce que j'aimais beaucoup ça et je voulais vraiment faire des découvertes scientifiques. Donc en tant qu'ingénieur en informatique, j'ai fait un petit pas en arrière et j'ai cherché une thèse de doctorat, et c'est vraiment par hasard que j'ai trouvé une thèse en sciences cognitives. Il y a quand même un lien parce que les sciences cognitives s'intéressent pas mal à l'informatique. C'est vraiment comment traiter de l'information pour réussir à prendre des décisions, donc la machine et l'humain c'est un peu lié. J'ai donc fait un master en cognition et en comportement avec un peu de neurosciences. Et puis ensuite je suis arrivé en thèse sur le comportement des foules. Mais ce n'était pas vraiment une vocation. C'était plus parce que je voulais faire de la science.

NPR : *Maintenant tu es à l'Institut Max Planck à Berlin. Est-ce que la recherche en psychologie est très différente de la recherche en informatique ou en physique ?*

M.M. : Oui, à l'Institut Max Planck il y a 50% de psychologues. Mais maintenant la psychologie devient de plus en plus quantitative, de plus en plus orientée mathématique et modélisation. Il y a tout un mouvement de pensée en psychologie qui s'appuie de plus en plus sur la modélisation et la simulation. Et on retrouve maintenant beaucoup de gens qui ont un background en maths ou en informatique. Mais c'est vrai que c'est relativement récent, dans les années 80, ce n'était pas vraiment comme ça.

NPR : *Comment as-tu eu l'idée de la chaîne YouTube à la base ?*

M.M. : À l'origine, ce n'était pas vraiment pour faire une chaîne YouTube. J'ai écrit un livre de vulgarisation parce que je trouvais que les recherches qu'on faisait au labo étaient fascinantes et je voulais les partager avec plein de monde. Donc j'ai écrit un livre et je n'étais pas du tout sur YouTube. Je ne savais même pas vraiment ce que c'était, pour moi YouTube c'était juste des ados qui se filmaient en classe avec leur smartphone. J'ai fait une vidéo de promotion pour mon livre qui s'intitule "Dix conseils pour survivre dans un mouvement de foule". Et en réalité, ce n'était pas du tout le lancement d'une chaîne, c'était vraiment juste une pub cachée pour mon livre. C'est une vidéo de quinze minutes où j'explique comment fonctionnent les mouvements de foule, qu'est ce qu'on peut faire quand on est pris dedans, et puis à la fin je fais la promotion de mon livre pour ceux qui veulent en savoir plus. J'ai mis cette vidéo sur YouTube parce que c'est une plateforme qui héberge des vidéos. Et à ma grande surprise, des gens ont commencé à s'abonner, alors que je ne savais même pas qu'on pouvait s'abonner. La vidéo a pas mal marché parce que le titre est assez intrigant et beaucoup de gens se sont abonnés directement sur la première vidéo et du coup, ça met de la pression. On se dit qu'ils attendent peut-être que je leur donne quelque chose de plus. Et j'ai fait une seconde vidéo. Puis j'ai commencé à comprendre le principe du fonctionnement d'une chaîne YouTube et je me suis pris au jeu. J'en ai fait une deuxième, et une troisième. Et puis au bout d'un an ou un an et demi après la première vidéo, il y a un magazine qui m'a présenté pour la première fois comme youtubeur plutôt que de me présenter comme chercheur. Et c'était la première fois de ma vie que ça m'arrivait !

NPR : *Comment répartis-tu ton temps entre la recherche et la vulgarisation ?*

M.M. : C'est très chaotique. Sur le papier, je suis chercheur dans la journée et vulgarisateur le soir. Mais au bout d'un moment, à ce rythme, c'était fatiguant et j'ai demandé à mon institut de recherche si la vulgarisation les intéressait. Comme je porte le nom de l'Institut Max-Planck, je contribue un petit peu à leur visibilité. Et ils ont dit qu'ils étaient très intéressés et ils m'ont laissé en faire un peu pendant la journée aussi. Donc maintenant, je fais aussi de la vulgarisation sur mes heures de travail, et je peux avoir mes soirées de libre. C'est deux tiers recherche et un tiers vulgarisation, ça me prend quand même beaucoup de temps.

NPR : *Est ce que tu vas pouvoir publier les expériences que tu as fait dans les vidéos récemment avec les abonnés ?*

M.M. : Non, on ne peut pas les publier parce que ce n'est pas assez rigoureux pour faire une publication scientifique. Il y a plusieurs problèmes qui se posent et le premier, c'est qu'il

y a un biais de contexte, à savoir qu'on est sur un tournage, avec des caméras, avec des gens qui observent. On sait que ça va être diffusé sur une chaîne YouTube qui va être vue par plusieurs centaines de milliers de personnes. Donc, il y a un biais comportemental chez les participants.

Et d'autre part, et c'est vraiment le plus important, c'est la répétition. Pour une véritable expérience scientifique, il faut répéter les observations encore et encore parce que ce sont des sciences statistiques. On peut tomber sur un groupe particulier qui a un comportement particulier. Et puis pour que ça ne donne pas de fausse impression, il faut recommencer avec un autre groupe, et le faire des dizaines de fois et même des centaines de fois. Donc les expériences sociales qu'on fait comme ça où on ramène des gens sur place et on filme une expérience ce n'est pas publiable, ce n'est pas assez rigoureux.

Par contre, plus récemment, j'ai commencé à faire des projets vidéos avec une optique de publication. C'est par exemple la partie d'échecs, qui est effectivement construite comme une expérience avant d'être une vidéo. J'ai fait attention à la taille de l'échantillon ; on a 25 000 participants. J'ai fait attention aux conditions : il y a une condition contrôle, il y a des répétitions, il y a tout ce qu'il faut et ça, ça va être publié, on est en train de finaliser le projet. Mais c'est un équilibre un peu délicat, il faut faire attention à avoir d'abord la rigueur scientifique et ensuite voir si on peut en faire une vidéo. S'il n'y a pas la rigueur, de toute façon, ce n'est pas publiable.

Mass Échecs

En 2022, Mehdi Moussaïd lance une expérience avec ses abonnés : déterminer si la foule est collectivement plus intelligente dans le cas d'une partie d'échecs. Dans la vidéo *50 000 personnes contre un champion d'échecs. Qui gagne?* (<https://youtu.be/aH77WL1x8kI>), il explique le déroulement de l'expérience et les différentes conditions étudiées.

NPR : *Quels sont les biais à prendre en compte pour une expérience de psychologie typiquement ?*

M.M. : Il faut faire attention à l'échantillonnage. C'est impossible d'avoir un échantillon représentatif d'une population dans une expérience parce que nos participants, ce sont en général des étudiants. Donc on est très sélectif et on se retrouve avec des gens qui ont à peu près le même âge, à peu près le même niveau, le même milieu culturel et même milieu social. Donc ce n'est pas représentatif. Mais ça, ce n'est pas grave, il faut juste le savoir. On peut publier, on peut dire qu'on a fait une expérience sur cet échantillon un peu biaisé. Tant que c'est exposé, il n'y a pas de problème.

Des biais expérimentaux, d'une manière générale, on en a toujours. On a toujours le biais de l'observation parce que

les participants sont observés par l'expérimentateur. Ils font un petit peu attention et ne sont pas nécessairement comme dans la vraie vie. C'est pour ça qu'en général les expériences doivent être complétées par des observations empiriques dans la vraie vie. Si je fais une expérience sur la prise de décision au supermarché, au labo je vais pouvoir extraire des mécanismes. Et puis ensuite, il faut que j'aille les vérifier en filmant directement des gens au supermarché par exemple. Ça permet de contrecarrer un peu ce biais. Et puis il y a des biais qui sont plus spécifiques à chaque expérience, il faut par exemple faire attention à ce que les participants aient bien compris les instructions.

NPR : *Qu'est-ce que la vulgarisation t'apporte dans ton quotidien de chercheur ?*

M.M. : La vulgarisation est importante pour clarifier ses idées. Parfois, je pars sur un sujet pour en faire un projet de recherche et je pense que je suis au point. Mais quand on essaie de le présenter, de l'expliquer à des gens qui n'y connaissent rien, eh bien, en fait, on voit tout de suite des failles qu'on a dans notre cerveau, des petits points qui n'étaient pas bien compris. On ne s'en rend même pas compte avant de faire l'exercice de vulgariser. Et ça marche pour tout, quel que soit le projet que tu fais, si tu fais l'exercice de le présenter à quelqu'un, tu vas voir que tout de suite il y a des choses qui vont te paraître pas claires et en fait, ça aide ensuite à faire un bon projet. Le fait de présenter, c'est une façon de clarifier les choses dans son cerveau et ça donne des bonnes idées.

À présent, la chaîne YouTube est aussi cohérente avec mes recherches. Au tout début, c'étaient vraiment deux choses séparées. Il y avait mes recherches d'un côté, puis la vulgarisation de l'autre. Et puis à un moment, je me suis dit que j'ai une foule d'abonnés qui sont là, qui m'écoutent et moi je fais des recherches sur les foules. Et puis il y a eu ce petit décalé qui s'est produit où je me suis dit que je pouvais prendre des abonnés de la chaîne pour faire des expériences et connecter les deux activités. Maintenant, c'est chouette parce que ça fait d'une pierre deux coups : je peux faire des vidéos et des projets de recherche avec. Par contre, ce ne sont pas du tout les mêmes échelles de temps. Un projet de recherche dure un an ou deux, alors que les vidéos sur YouTube ont une durée de visibilité de quelques semaines. Par exemple, le projet sur les échecs qui a commencé il y a un an, va se terminer dans six mois. Et les participants ont déjà complètement oublié qu'ils l'ont fait. Ou bien s'ils n'ont pas oublié, ils s'impatientent beaucoup. Déjà deux mois après la série de vidéos, des gens m'écrivaient en me disant « Bon, alors les résultats, ça vient là, on est impatient ». Donc ce n'est pas toujours facile de réguler les deux.

NPR : *Tu participes à une exposition à la Cité des sciences. En quoi ça consiste et comment t'es-tu retrouvé à y prendre part ?*

M.M. : Avec un livre et les vidéos sur ma chaîne, je commençais à avoir un peu de visibilité. Ou plutôt le sujet de recherche commençait à avoir un peu de visibilité. C'est la Cité des sciences qui m'a contacté en premier, qui m'a demandé si j'étais intéressé pour participer à une expo en foulescopie. J'ai tout de suite accepté parce que ça marche parfaitement, ça correspond bien avec la vulgarisation. Et en plus, j'étais curieux de découvrir un petit peu le monde des expositions scientifiques, de voir comment ça marche. C'est un projet très long, une expo met beaucoup de temps à se préparer, environ deux ans. J'avais le rôle de commissaire scientifique et je travaillais avec des commissaires d'exposition. Donc le commissaire scientifique, lui, est chargé de trouver des angles de petites manip muséographiques qu'on peut faire. Et puis les commissaires d'exposition sont chargés de les mettre en pratique parce qu'ils connaissent le public et savent comment ça fonctionne. C'est vraiment le travail joint entre quelqu'un qui est un pro de l'exposition et quelqu'un qui est un pro du sujet scientifique. Et ça, ça marche bien, c'était vraiment fun. J'ai beaucoup aimé organiser ça !

NPR : *Quel conseil donnerais-tu à des étudiant.e.s qui veulent faire de la recherche ?*

M.M. : C'est un métier très prenant, qui dépasse les horaires de travail, parce que ça ressemble souvent à une chasse au trésor. C'est-à-dire qu'il y a un mystère quelque part et personne sur Terre n'a la réponse, personne ne sait. Mon travail, c'est de trouver la réponse. Et pour ça, j'ai des outils qui sont des outils mathématiques, des outils expérimentaux, etc. Je dois utiliser ces outils pour trouver la réponse à cette question en suivant des règles qui sont les règles de la méthode scientifique. Du coup c'est vraiment prenant et passionnant. Mais à 18h le cerveau continue à tourner, ainsi qu'en soirée et le week-end aussi. Donc c'est parfois un peu difficile de faire la part des choses. Ce sont des choses que l'on doit savoir quand on veut se lancer dans la recherche.

Ensuite, ce n'est pas un métier qui est particulièrement bien rémunéré, c'est assez précaire. Souvent, les chercheurs commencent avec des contrats à durée déterminée et il y a pas mal de compétition. Il y a beaucoup de candidats et pas beaucoup de places disponibles. Donc il y a aussi des inconvénients mais en général les chercheurs travaillent toujours à la passion. Ce n'est vraiment pas rare d'aller au labo le week-end et de voir des collègues en train de résoudre un problème. Donc si vous êtes passionné.es par les sciences, ça peut être un bon métier pour vous.

NPR : *Est-ce que tu lis ou regarde beaucoup de vulgarisation toi-même sur d'autres sujets ? As-tu un livre ou une chaîne Youtube à*

* Et la NPR est bien de cet avis : nous l'avons interviewé dans notre numéro N23.

conseiller ?

M.M. : Oui, j'aime bien lire, je vais un peu moins sur YouTube parce que je n'ai pas énormément de temps. Mais j'aime bien lire dans les transports en commun. Je viens de terminer le livre de Mickaël Launay qui a une chaîne YouTube qui s'appelle Micmaths, qui est un des vulgarisateurs francophones les plus connus dans le domaine des maths. Et puis il a écrit 2 livres : *Le grand roman des maths*, et *Le théorème du parapluie*. C'est de l'histoire des maths qui commence à l'Antiquité et puis qui montre comment on invente ou on découvre des concepts. Ce sont deux livres que je recommande chaleureusement et que j'ai beaucoup aimés. J'aime aussi beaucoup lire des ouvrages de chercheurs qui sont vraiment dédiés aux chercheurs, donc qui sont un peu moins vulgarisés. Il y en a pas mal en anglais qui sont chouettes.

Et sur YouTube j'aime beaucoup les vidéos de David Louapre de la chaîne *Science Étonnante*, elles sont toujours bien faites*, et lui aussi est chercheur. Et c'est à peu près tout ce que je consomme sur YouTube, mais j'aime bien les livres de sciences.

NPR : *Quels sont tes projets de recherche en ce moment ?*

M.M. : J'en ai plusieurs dans le domaine de l'intelligence collective où on se demande ce qu'on peut faire avec un grand nombre de personnes qui ne sont pas spécialisées dans un domaine. Si on les met ensemble de la bonne façon, peut-on réussir à résoudre un problème difficile que même un expert a du mal à résoudre ? J'ai plein de projets d'intelligence collective pour lesquels c'est compliqué de trouver assez de participants, que j'aimerais bien appliquer à ma chaîne YouTube.

Il y a un problème de décision collective : par exemple une foule pourrait-elle gagner au jeu *Qui veut gagner des millions*, où il faut trouver la bonne réponse sur quatre à chaque fois ? Est-ce que si on fait un simple vote parmi la foule, on peut aller au bout facilement ou est-ce qu'il va falloir utiliser d'autres techniques ?

J'ai un autre projet sur les problèmes de classement. Il faut classer une liste d'éléments selon un certain ordre, par exemple du plus petit au plus grand ou du meilleur, au moins bon par exemple. Est-ce qu'un ensemble de personnes peut d'une certaine façon réussir à classer cette liste en utilisant des concepts d'intelligence collective ? Et donc ce sont des projets que je vais démarrer bientôt et que j'aimerais bien pouvoir transmettre sur ma chaîne YouTube.

NPR : Merci beaucoup Mehdi Moussaïd !

– Oriane Devigne et Juliette Savoye

SIR, I HAVE A QUESTION

New problems

As the battle over the pension reform law nears its end, you should know one thing : there is no retirement from physics questions. Here are ten more!

- I** : Slowly pull a post-it note and look at the "unsticking front" as you do it. If you are in the dark and your eyes are used to obscurity, you may see faint light resulting from the unsticking! Why?
- II** : Why would one blow on fire to tend to it?
- III** : Could a 100 L trash bag be used as a parachute?
- IV** : Can one get an order of magnitude for the size of pores in a piece of chalk based on the trace it leaves on a smooth blackboard?
- V** : Assume a flat Earth with a single lightning rod sticking out normally from the ground to a given height. What is the characteristic radius of the area in which it attracts lightning strikes?
- VI** : Can hot water freeze quicker than cold water? Spoiler alert : yes! Can you explain how/why it happens?
- VII** : Have you ever noticed when starting a hot shower that the curtain might be drawn in towards the inside of the shower? Hmm...
- VIII** : Take a picture of a computer screen (for instance a black and white document). Why might colored stripes appear on your picture?
- IX** : How many Google searches should one do, and with which frequency, for the heat generated by the data centers to cook a pizza?
- X** : The lint on the filter of a clothes dryer can sometimes be removed in plaques : what gives lint this structure?

MYSTERY PHOTO

Solution of N_{26}



Figure 3 – Photo of N_{26}

This nice picture - taken in Vancouver, Canada - corresponds to a 22° halo. This type of optical phenomenon appears when light goes through hexagonal ice crystals, which are present in certain clouds like cirrus or cirrostratus clouds.

In these hexagonal crystals, light rays get refracted twice, and the minimum output angle is 22° . Thus you can observe that the sky appears darker inside the halo. Moreover, you can almost see (even with this medium photo quality) that the inner border of the circle is red : that is because this wavelength is refracted at a smaller angle (remember the Cauchy formula!). The other wavelengths overlay a little bit with each other, leading to this diffuse white external border.

– Juliette Savoye

Photo of N_{27}

Consider this picture of the (large) Charles river in Boston : what creates these white stripes ?



Figure 4 – Mystery photo of N_{27}

- **Aymane Legssyer** φ_{22} :
aymane.legssyer@ens.psl.eu
- **Lukas Péron** φ_{22} :
lukas.peron@ens.psl.eu
- **Juliette Savoye** φ_{21} :
juliette.savoye@ens.psl.eu
- **Victor Lequin** φ_{21} :
victor.lequin@ens.psl.eu
- **Oriane Devigne** φ_{21} :
oriane.devigne@ens.psl.eu
- **Esteban Foucher** φ_{20} :
esteban.foucher@ens.psl.eu
- **Guillaume de Rochefort** φ_{19} :
guillaume.de.rochefort@ens.psl.eu

(The Editorial Board)

<https://www.facebook.com/NormalePhysicsReview>
<https://normalephysicsreview.netlify.app>
 If you like the review, please be sure to subscribe to its mailing list on the website!

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank everyone who made this edition possible and who supported us. Special thanks go to... who else but you, dear reader ?

We need you! If you would like to contribute, submit questions or provide feedback, please contact us :