



Normale
Physics Review

INPR

École normale
supérieure

— *Fights Bohr-dom* —

Résumé

La Normale Physics Review fait sa rentrée, et avec elle évidemment tous les étudiants. Après l'avoir fêtée en septembre avec des crêpes servies en Courò, quoi de mieux qu'enchaîner sur un bon chocolat chaud tandis que la saison se refroidit ? Eh oui, soyez nombreux à 13h en E239 ce mercredi, c'est le retour du chocolat des physiciens !

Cela a été un grand plaisir pour deux nouveaux comme Jean et moi de faire le Micro Lhomond de ce numéro : le rêve de pouvoir se promener librement et toquer à toutes les portes ! Retrouvez ensuite notre visite du laboratoire des systèmes complexes de Frédéric Lechenault, puis le récit d'un stage de L3 au LOMA sur les turbulences bidimensionnelles dans les films de savon.

– *Ethan Uzan pour l'équipe de rédaction*

SOMMAIRE

Class life	2
The physicists' chocolate returns!	2
Physicists and crepes : a love story	2
Physicist's life	3
Micro Lhomond	3
Simple visite dans le monde des systèmes complexes	8
Stage de L3 : turbulences bidimensionnelles dans les films de savon	13
Sir, I have a question	14
New problems	14
Mystery photo	14
Solution of N_{21}	14
Photo of N_{22}	14
Acknowledgements	14



normalephysicsreview.
netlify.app



facebook.com/
NormalePhysicsReview

CLASS LIFE

The physicists' chocolate returns!

Dear physicists,

The physicists' chocolate is back! Organised every Wednesday from 1pm to 1.30pm by the licence students, it takes place in the theoretical physics' library (E239) or in the Conf IV (E244) on the weeks when there is colloquium. Come enjoy the drinks and biscuits available, including the famous hot chocolate! Everyone is welcome, from the student in gap year who only sees ENS once a year to the researcher who never left it in forty years : the goal is to start conversations across groups and ages. Be sure to bring a mug, an ecocup or another container to avoid waste.

Looking forward to meeting you there from Wednesday, the 5th of October!

– The organisation team of the chocolate

Physicists and crepes : a love story

On Wednesday, the 7th of September, students of all departments gathered in Courô to introduce their department to the new students. Of course, students from ϕ_{21} decided to cook some delicious crepes and once again the physicists showed their expertise in this domain. With 4 crepe makers

working simultaneously without interruption we estimate that 200 crepes ($\pm 20\%$) were cooked in two hours (or the equivalent of three quarters of a Bilal, according to the recipe established by the department's head of studies, who is now deferently used as a unit for crepe quantity). During this cooking masterclass we presented the physics department to all students. We hope to have convinced students from other departments that physics can be really fun! If some might even take physics discovery classes, they all seemed at least convinced that we were the best cooks.



Figure 1 – People around the crepe stand

It was also a time where we met the new L3 physics students. We presented the NPR and met new members of the NPR's redaction team. This new year has started off well!

– Oriane Devigne

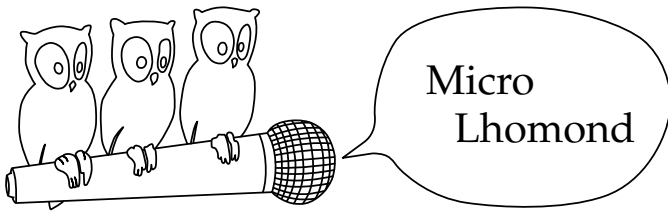


Figure 2 – What a team!



Figure 3 – Yummy!

PHYSICIST'S LIFE



Voici une nouvelle série des interviews courtes du Micro Lhomond, avec de toutes nouvelles questions !

– **propos recueillis par Ethan Uzan, Jean Goudot et Oriane Devigne**

Tanu Singla, postdoctoral researcher at LPENS

NPR : *Could you introduce yourself and the topic of your research?*



T.S. : I am Tanu Singla, I come from India where I did my PhD and then I went to Mexico for some time, and last year I arrived in France. Here I'm working on turbulence, so we generate turbulent flow and then measure the velocities at different points and do the statistics of the flow.

NPR : *What is the typical day in the lab?*

T.S. : Some days I do the experiments below down there and it takes about four to five hours, but I don't have to stay there : I just run it and keep on recording the data. Sometimes I can control it from here so I don't have to go down. Other days I do the analysis, and eating at lunch hours and every now and then talking to colleagues, and that's it.

NPR : *Have you ever had a moment of illumination to tell us?*

T.S. : I changed my topic for non-linear dynamics after arriving in France, so I was learning the topic in the beginning. I was kind of stuck at some concept which I didn't know before and while learning I understood the concept and it was kind of an illumination of the topic.

NPR : *Do you have a favorite equation or theorem?*

T.S. : In non-linear dynamics there is an equation called the logistic map which demonstrates chaos in a very simple equation, yet the kind of behavior that it shows is very profound. It is an equation which has only one variable and one parameter, and by changing that parameter you can see periodic solutions and chaos and many more phenomena with a simple recursive relation :

$$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n).$$

It's a recursive relation and for a fixed value of a , you will have to start with an initial value of $x = x_0 \in [0, 1]$, and you keep on calculating x_1, x_2, x_3, \dots for a fixed value of a and as you change a , you start seeing periodic solutions like constant values or periodic values or chaotic trajectories.

This was proposed to study the population of any organism. So let's say x is the presence of a population of an organism in one year. If there are many individuals of a species then there are less resources for each of them and the population might decrease next year, but if there are less individuals then there are plenty of resources and it might increase next year. It demonstrates competition and how they help each other.

Amir Kian Kashani Poor, enseignant-chercheur au LPENS

NPR : *Pouvez-vous vous présenter ainsi que vos recherches ?*

A.K.K.P. : Je suis Amir Kian Kashani Poor et j'étudie la théorie des cordes.

NPR : *Avez-vous une journée type ?*

A.K.K.P. : Si je n'enseigne pas, j'arrive vers 9h30 après avoir déposé mes deux petits garçons à l'école, je regarde sur arXiv.org – pour moi c'est hep-th – les articles qui ont été soumis ce jour-là, et après ce n'est pas super intéressant mais c'est aussi des mails à regarder bien sûr. Je travaille toujours sur plusieurs sujets de recherche donc ensuite soit j'ai des Zoom avec mes collaborateurs, soit j'ai un calcul faire ou un article à lire ou un article à écrire et voilà.

NPR : *Avez-vous déjà eu dans votre carrière de chercheur un moment d'épiphanie ?*



A.K.K.P. : Eh bien il y en a de tout petits bien sûr : pour chaque article il y a normalement un moment où on comprend quelque chose qu'on n'avait pas compris avant. Mais est-ce qu'il y a eu de grands moments où je me suis dit « tiens, j'ai compris quelque chose de superbe »... Il y a une question qui est jolie dans le contexte de la compactification dans la théorie des cordes, mais qui difficile à expliquer en une minute ou deux. Le problème était lié à une certaine symétrie qui n'avait pas le droit d'être brisée sous une certaine conjecture, et après on a compris comment la symétrie était protégée par certains effets.

NPR : *Est-ce que au contraire vous avez été confronté à une question frustrante ?*

A.K.K.P. : Déjà la théorie des cordes, ça veut dire qu'on cherche une théorie quantique de la gravitation et on n'a pas une bonne formulation de cette théorie donc ça, c'est frustrant, et on essaye de trouver une formulation non-perturbative.

Sinon il y a un truc que j'ai fait qui s'appelle la corde topologique, et donc là il y a un objet qui encode beaucoup de propriétés physiques, qui n'est pas tout à fait une fonction mais disons que c'est une fonction et qui dépend de plusieurs paramètres. Ce qu'on aimerait bien avoir c'est une forme analytique de cette fonction, par exemple $\sin xy$ mais ce n'est pas ça. Les manières de le calculer sont perturbatives donc on obtient juste une série dont on connaît seulement un certain nombre d'expansions. Et si dans une classe d'exemples on arrive à resommer la série pour avoir par exemple $\sin x$, il y a un autre paramètre qu'il faut utiliser comme paramètre d'expansion. Donc on n'arrive jamais pour le moment à une forme analytique pour tous les paramètres et ça c'est assez frustrant.

NPR : *Avez-vous une équation préférée ?*

A.K.K.P. : Il y a beaucoup d'équations que j'aime bien, en théorie des cordes topologiques il y a les *Holomorphic Anomaly Equations* (HAE) et c'est rigolo parce que... mais bon la blague il faudrait aussi l'expliquer ! Au départ on pense qu'il y a un problème avec la description des choses parce qu'il y a une quantité qui devrait être holomorphe, mais en fait il y a des problèmes et elle n'est pas holomorphe. Et il se trouve qu'à cause de ce manque d'holomorphie on peut obtenir des équations pour mieux calculer cette quantité, qui sont les HAE. Donc « *Holomorphic Anomaly* » parce que ce n'est pas holomorphe, il y a anomalie dans l'holomorphicité.

« En théorie des cordes topologiques il y a les Holomorphic Anomaly Equations et c'est rigolo parce que... mais bon la blague il faudrait aussi l'expliquer ! »

Rémi Monasson, chercheur au LPENS

NPR : *Pouvez-vous vous présenter vous et vos recherches ?*

R.M. : Je suis au LPENS, j'ai une formation de physique statistique et je m'intéresse maintenant beaucoup aux systèmes biologiques. Je m'intéresse aux applications, à la modélisation et au développement de nouveaux outils de la physique statistique pour comprendre les systèmes biologiques notamment à partir de données. Avec Simona Cocco on travaille sur deux grands sujets : le premier en neurosciences où on s'intéresse à l'hippocampe, une région du cerveau des mammifères impliquée dans la représentation de l'espace. C'est cette région qui nous permet de cartographier notre espace et de faire de la planification de mouvements. L'autre domaine de travail est la modélisation de protéines et d'ARN. On essaye de faire des modèles à partir de séquences de protéines et de concevoir de nouvelles biomolécules sur ordinateur dont on peut ensuite tester les fonctionnalités in vivo ou in vitro.



NPR : *Quelle serait votre journée type ?*

R.M. : Je passe une fraction importante du temps à enseigner, bien que je ne sois pas enseignant chercheur. J'enseigne ici au master et à l'école Polytechnique. Et le reste de la journée, je vois les étudiants, les postdocs, les autres chercheurs du laboratoire ou des visiteurs. Et puis on travaille à la rédaction des articles, à essayer d'avoir des idées si possible intéressantes pour les futures recherches. On travaille aussi à écrire des projets pour avoir de l'argent ce qui permet d'accueillir des postdocs, des visiteurs ou d'organiser des congrès. On travaille aussi à commander des ordinateurs, à faire des tas de trucs intéressants d'un point de vue administratif, des rapports d'activités etc. Y'a des jours où on fait juste une chose et parfois on fait un peu tout.

NPR : *Avez-vous eu un moment d'illumination ou de déblocage ?*

R.M. : Oui oui mais y'a aussi des moments moins positifs à raconter. Des moments où j'étais bloqué pendant longtemps et où j'ai décidé d'arrêter parce que cette idée là que je trouvais super et qui au bout de 6 mois ne marche pas, il faut se rendre compte que ça ne marche pas et qu'il faut tout arrêter.

Mais c'est vrai qu'il y a eu des moments où on ne comprend rien et puis tout d'un coup clac! Le soir en sortant du cinéma ou chez soi on comprend. Après le temps passé à y réfléchir, ça devient évident et ça ne pouvait pas être autre chose.

Par exemple, on regardait la dynamique d'un algorithme de résolution de problèmes d'optimisation. C'est un problème d'informatique mais on peut le voir comme un problème de physique avec une dynamique d'un ensemble de variables qui changent au cours du temps. C'étaient des algorithmes différents de ceux qu'on utilise en physique comme Monte Carlo, ici c'étaient des algorithmes Branch and Bound et je me suis dit qu'on devait pouvoir les étudier avec des outils de physique. Parfois le temps pour résoudre était linéaire et parfois exponentiel en la taille du système, il y a avait une transition bizarre qu'on ne comprenait pas. Et tout d'un coup on a compris!

NPR : *Avez-vous une équation ou une loi préférée ?*

R.M. : J'aime beaucoup les méthodes sur lesquelles j'ai travaillé en postdoc. Je pense d'ailleurs qu'on est beaucoup à avoir adoré les choses qu'on a fait en étant jeunes, peut-être parce que ce sont les choses qu'on comprend le mieux. J'ai travaillé en postdoc chez Giorgio Parisi, prix Nobel de physique, et j'aime beaucoup la méthode des répliques qui a été développée dans son groupe. Ce sont des méthodes très spécifiques pour comprendre les systèmes désordonnés, des systèmes où les interactions entre spins sont aléatoires. Ce n'est pas contrôlé d'un point de vue mathématique mais ça marche tout le temps. On comprend la physique mais pas encore tout l'aspect mathématique.

Bernard Legras, chercheur au Laboratoire de Météorologie Dynamique

NPR : *Pouvez-vous vous présenter vous et vos recherches ?*

B.L. : Je suis directeur de recherche au laboratoire de météorologie dynamique donc je m'intéresse à l'atmosphère. Plus particulièrement je m'intéresse à ce qui se passe dans la haute atmosphère, ce qu'on appelle la stratosphère. En ce moment je m'intéresse aux panaches qui sont issus des grands feux de forêts ou des grandes éruptions volcaniques comme par exemple celle qui a eu lieu en janvier 2022 sur l'archipel des Tonga.

NPR : *Quelle serait votre journée type ?*

B.L. : Le chercheur n'a pas vraiment de journée type. On ne peut pas non plus distinguer un chercheur qui réfléchit d'un chercheur qui dort (*rires*). Les activités sont distribuées en

fonction de ce qui vient, il y a souvent des problèmes administratifs à résoudre qui sont souvent urgents et qui perturbent l'organisation qu'on peut avoir. Quand on est sur un sujet un minimum intéressant, on essaye de se concentrer dessus. Par exemple sur ces affaires d'éruption on a produit quelques articles mais ça nous a demandé pas mal de concentration pendant plusieurs mois.

NPR : *Avez-vous eu un moment d'illumination ou de déblocage ?*

B.L. : D'illumination carrément! (*rires*) Non pas vraiment, après il y a des moments où on avance et des moments où on est bloqué et puis y'a des moments où les choses se débloquent. Des moments où on a des idées et où on fait des connexions entre différentes choses, ça ne vient pas nécessairement du hasard. On peut avoir des idées intéressantes mais elles ne sortent pas comme ça, il faut se préparer à ça. C'est le travail du chercheur et de toute une vie d'avoir ces sortes d'illuminations si vous voulez appeler ça comme ça, et cela permet de voir des choses que les autres n'ont pas vu?



NPR : *Pouvez-vous nous parler des moments plus frustrants que vous avez pu vivre dans vos recherches ?*

B.L. : Comme dans toute activité, il y a des moments de frustration quand ce qu'on essaye de faire n'arrive pas. Souvent le mieux c'est d'aller dormir et d'attendre le lendemain matin et d'attendre que ça se résolve. Bien entendu il y a des moments qui peuvent être frustrants. Dans la recherche on peut programmer son activité mais il y a des moments où on ne trouve pas et on tourne en rond. Dans ces cas là la meilleure chose c'est d'aller dormir ou de passer à autre chose et laisser reposer. On peut revenir avec des idées plus fraîches. En général on y arrive à un moment mais après il y a des sujets qui sont très difficiles. Sur certaines questions scientifiques, les gens sont au pied du mur depuis 50 ans, ça n'a pas bougé. Dans ma carrière j'ai essayé de changer de sujet assez fréquemment mais je rencontre des gens qui sont sur des sujets qui m'intéressaient au début de ma carrière et qui sont toujours devant le mur.

NPR : *Avez-vous une équation ou une loi préférée ?*

B.L. : En ce moment c'est la loi de Clausius-Clapeyron parce qu'elle détermine pas mal de choses intéressantes dans l'atmosphère : $dP_{\text{sat}}/dT = P_{\text{sat}}(\Delta H)_{\text{sat}}/(RT^2)$.

Jean-François Allemand, enseignant-chercheur au LPENS

NPR : *Pouvez-vous vous présenter vous et vos recherches ?*

J-F.A. : Mon thème de recherche est la biophysique, plus précisément les micro-manipulations de molécules individuelles.

NPR : Quelle est votre journée type ?

J-F.A. : J'aimerais bien en avoir une ! Globalement, c'est d'arriver tôt pour être au calme et d'essayer de faire avancer les choses, et éventuellement avoir du temps pour essayer de faire un peu de manips, peut-être un peu de programmation. Sinon, comme vous le savez, je fais des cours certains jours ; en début d'année j'avais beaucoup de soutenances de stage : ça occupait quasiment mes journées. En plus, parce que je suis directeur-adjoint du laboratoire, j'ai des réunions et beaucoup de mails auxquels répondre, et ça se finit parfois tard le soir...

NPR : Est-ce que parfois vous avez un moment d'illumination ou de déblocage ?

J-F.A. : Si j'étais illuminé ? (*rites*) D'un point de vue scientifique, si vous voulez, un moment marquant qui me revient spontanément, c'est d'avoir réussi, au cours d'une discussion, à trouver la méthode permettant de mesurer des forces de l'ordre du piconewton sur des dispositifs qu'on a mis au point ici, appelés des « pinces magnétiques ». C'est la première « illumination » : je vous souhaite d'en avoir une bientôt !

NPR : Est-ce qu'au contraire, au cours de votre carrière, il y a eu une période de frustration d'un point de vue de recherche ?

J-F.A. : Alors oui, les manips qui ne marchent pas, ça arrive plus souvent que l'inverse, mais quand ça dure un peu trop longtemps c'est quand même assez frustrant. Néanmoins, ce n'est pas un moment en particulier.

NPR : Dernière question : quelle est votre équation préférée ?

J-F.A. : $S = k_B \ln(\Omega)$: beaucoup de choses de la physique statistique en découlent ; et puis Boltzmann était un personnage à part en sciences. Ça représente beaucoup dans une seule équation.



Raphaël Jeanneret, chercheur au LPENS

NPR : Pourriez-vous vous présenter et nous parler de vos projets de recherche ?

R.J. : Je suis chercheur CNRS ici au LPENS. J'étudie la matière active biologique des particules de phytoplanctons, je regarde la physique des déplacements de microorganismes, des effets collectifs en réponse à des stimuli. Je m'intéresse à la phototaxie, phyllotaxie, etc : pour la phototaxie, il s'agit de l'habileté à se déplacer dans un champ de lumière, c'est un phénomène de transport actif en réponse à un stimuli.

NPR : Avez-vous une journée type ?

R.J. : La première chose que je fais est de regarder les papiers sortis ce jour-là sur arXiv, ce sont les papiers qui vont être publiés dans les mois qui viennent. Je vais en biologie pour m'occuper des cultures d'algues de manière journalière, de temps en temps je prépare aussi mes cours. Je passe du temps dans le labo à préparer des expériences quand j'ai le temps, mais ce n'est pas vraiment la journée type car j'ai moins le temps qu'avant. Je suis souvent en réunion, je lis, et rédige soit des demandes d'argent soit des papiers.

NPR : Auriez-vous un moment d'illumination suite à une période de blocage à raconter ?

R.J. : Je n'ai pas de moment particulier à raconter, mais souvent on débloque quelque chose quand on fait complètement autre chose : à manger, dans le métro, etc. Quand l'esprit divague : pof, y a un truc qui se débloque dans le cerveau !

NPR : Au contraire, avez-vous vécu des moments plus frustrants ?

R.J. : C'est le quotidien haha ! Plus sérieusement, pendant ma thèse j'ai été très frustré, je travaillais sur une manip compliquée, assez subtile, demandant un contrôle très important sur tous les aspects. Pendant deux ans je n'avais pas de résultats scientifiques : j'ai fait du prototypage sans avoir de résultats. C'est sur les huit derniers mois que ça s'est débloqué et que j'ai pu faire les manips et analyses en mode "machine".

Pourtant j'ai gardé patience parce que j'étais bien encadré, et ça m'a pas dégoûté du métier. Justement, le réconfort au



final a été tellement important que ça m'a remotivé pour continuer.

NPR : Sur quoi portait votre thèse ?

R.J. : Je l'ai faite à l'ESPCI. J'utilisais des outils microfluidiques, et j'étudiais la réversibilité cinématique sur une émulsion de gouttes. Vous avez deux minutes pour que je vous montre un film ? (vidéo démontrant la réversibilité cinématique pour une goutte : https://www.youtube.com/watch?v=QcBpDVzBPMk&ab_channel=scheeko)

Il s'agit d'un écoulement visqueux à très faible nombre de Reynolds, donc modélisé par l'équation de Stokes (sans terme inertiel) où le temps n'intervient pas. Cela signifie que si j'inverse les contraintes à mon système, l'écoulement sera le même mais dans la direction inverse. J'ai donc étudié ce phénomène mais dans une émulsion de gouttes, plutôt que sur une simple goutte comme sur la vidéo. On applique un écoulement périodique à l'émulsion et on regarde si les gouttes reviennent à leur position initiale, si leur dynamique est réversible. Il y a une transition de phase dans le système dynamique, c'est-à-dire que si on oscille sur des suffisamment petites longueurs cela va revenir à sa position, mais à partir d'une longueur très précise la dynamique devient complètement chaotique et il y a un mélange.

NPR : Avez-vous une équation préférée ?

R.J. : L'équation de Fokker-Planck, c'est le type d'équations que j'applique le plus. Elle se présente sous plusieurs formes comme par exemple :

$$\frac{\partial P}{\partial t} = D\Delta P - \text{div}(P\vec{v}).$$

Victor Lequin, étudiant trainant dans les couloirs

NPR : Est-ce que tu pourrais te présenter, et nous expliquer ton projet ?

V.L. : Je suis en M1 au département de physique, et le cadre de mon travail ici est le projet de recherche du M1. J'y travaille un jour par semaine, sur des populations d'algues qui fuient la lumière, et j'essaie de comprendre les propriétés de l'interface entre une phase dense et une phase diluée en algues.

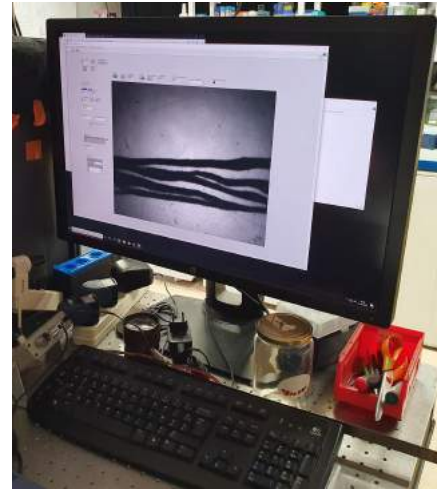


Figure 4 – Les algues forment des bandes noires (phases denses) en se rassemblant

NPR : Est-ce que l'étude de cette interface peut avoir des applications dans d'autres domaines, de biologie ou même plus généralement ?

V.L. : Bien sûr : c'est en fait un exemple intéressant de système actif en général. Ce sont des systèmes qui contiennent des particules actives (qui consomment de l'énergie pour bouger), et on a beau bien comprendre les fluides passifs où les molécules sont inertes, on a encore beaucoup de questions sur les systèmes actifs notamment à l'interface.

NPR : Comment pourrait se résumer une journée de ton stage ?

V.L. : Le matin je vais chercher ma bouteille d'algues dans l'incubateur (un genre de frigo chaud), je les dilue pour propager la culture pour le lendemain et avoir celles que je veux utiliser aujourd'hui. Je les compte pour savoir la concentration, je modifie éventuellement mon setup, puis je fais des acquisitions pour pouvoir les analyser pour la semaine prochaine.

NPR : Y a-t-il eu déjà des périodes de blocage qui ont conduit à des moments d'illumination ?

V.L. : A un moment oui, je me suis dit « Fourier ! » En effet c'est plus sur l'exploitation de données que ça bloquait longtemps, expérimentalement il n'y a pas de difficultés particulières même si on pourrait raffiner le système (ce qui n'a pas vraiment d'utilité pour l'instant). Il y a eu des surprises par contre, notamment des phénomènes qu'on ne comprend pas encore, donc il y aura peut-être des révélations bientôt !

NPR : Ah justement, as-tu vécu des moments de frustration ?

V.L. : Plutôt des moments de doute, souvent je ne sais pas si les données que j'ai sont des points au hasard qui ne veulent rien dire, ou s'ils ont une signification physique particulière. C'est toujours agréable de pouvoir répéter les expériences deux fois et d'avoir les mêmes résultats, par rapport à celles qu'on a encore du mal à reproduire. Par exemple, depuis quelque temps la bande d'algues se scinde en deux sur certaines expériences, et je ne l'explique toujours pas !

NPR : As-tu un théorème ou une équation préféré(e) ?

V.L. : Je suis un fanatique d'Hamilton-Jacobi, c'est quand même assez sublime ce truc. C'est une onde de choc dans un espace de phases, c'est incroyable quand même !

$$\frac{\partial S}{\partial t} + H\left(\vec{q}, \frac{\partial S}{\partial \vec{q}}, t\right) = 0.$$

NPR : Est-ce que tu t'attaches à tes algues ?

V.L. : Alors j'en tue 70 millions par jour, du coup moyen... Il y en a qui sont restées en vie plus longtemps qu'elles n'auraient dues, mais c'est plutôt parce que je n'ai pas vidé les bouteilles lorsque je devais le faire !



Simple visite dans le monde des systèmes complexes

« Il faut comprendre qu'on s'autorise à regarder tout ce qui peut nous intéresser, ce qu'on trouve sympa, » énonce avec défi Frédéric Lechenault, chercheur CNRS au LPENS. Son équipe ? Mécanique, matière molle, morphogenèse... liste un peu vague et traversée par les idées de physique du non-linéaire, d'instabilités, de grandes déformations – bref, des systèmes complexes. « C'est pas comme si tu étais en train de résoudre une théorie des champs : la théorie des champs, tu sais déjà comment elle est faite. Là, non : il faut faire la théorie. Chaque fois, la refaire. Il y a cet aspect très difficile : on repart à chaque fois de quasiment zéro. »

La fougue et la fierté se mélangent chez le chercheur, revendiquant la différence de sa physique et la vastitude de ses petits problèmes. Mais c'est avec déférence qu'il évoque ses prédécesseurs : « C'est cette pièce. C'est une pièce où pas mal de gens assez marquants ont travaillé, notamment Yves Couder, qui a vraiment fait vivre cette physique non linéaire, de coin de table. Avant lui, il y a eu Yves Pomeau, qui est un peu un des précurseurs de toute cette physique-là avec Martine Ben Amar. Des gens qui travaillaient sur le papier froissé par exemple : moi, j'ai travaillé pendant dix ans sur les origamis. C'était un peu ma contribution à cette école de pensée. »

« C'est de la physique de la complexité : il faut inventer les équations. »

Tout dans la salle est très tangible, occupe l'espace avant d'occuper l'esprit (jusqu'aux souvenirs : « Je suis arrivé devant une grande table en bois, c'était la table des manip d'Yves Pomeau »). « Avec toujours en tête l'idée de projeter la science vers l'extérieur, d'être ouvert à la vulgarisation, à la jeunesse, aux stagiaires de dix-huit ans, à la communication autour de ce qu'on peut faire : des systèmes simples dans lesquels il se passe de belles choses, mais qui sont visuels et dont on peut parler. »

« De fait, ça peut regorger de choses très différentes, très variées. » C'est un euphémisme : il semble qu'à chaque regard dans la salle on découvre un nouveau montage, parfois là depuis plus de cinq ans, révélant peu à peu ses secrets. Voici quelques uns de ces problèmes, présentés par le physicien et ses étudiant·e·s.

La danse de la Lune

« Il y a un peu deux aspects dans la physique des systèmes qu'on regarde : soit la mécanique avec de la morphogenèse, soit d'un autre côté des systèmes dans lesquels il y a des phénomènes collectifs (de la physique statistique). »

« La morphogenèse, c'est la génération de la forme. La forme des feuilles des arbres, la forme de tout ce qu'on voit. Dès qu'un objet naturel a une forme intéressante, il y a sûrement un mécanisme morphogénétique sous-jacent qui a produit cette forme et dont on essaie de comprendre les mécanismes physiques élémentaires. »

Nous nous approchons d'une plaque de métal suspendue en son centre à l'axe d'un moteur. « Ça consiste à regarder le drapé d'une plaque élastique. C'est un problème qui n'est

pas nouveau : Léonard de Vinci avait ramé pour en faire des dessins. On peut s'intéresser au problème statique : qu'est-ce qui se passe quand on met une nappe sur une table ? Ça fait de jolis plis sur les côtés. En fait, on comprend à peu près pourquoi et comment. Ensuite, on peut s'amuser à faire tourner cette membrane. Et là, il se passe quelque chose de très très intéressant... »



Figure 5 – La plaque reposant à l'équilibre

Ce phénomène, c'est celui qu'on observe sur la robe des derviches quand ils tournent. La membrane se plie et une ondulation apparaît mais ce motif tourne beaucoup plus lentement que la robe elle-même, qui glisse rapidement dans la forme ainsi dessinée.

« En fait, ce truc là est complètement générique. Ici, on est dans un régime où le système est essentiellement réglé. Ça veut dire qu'il ne va pas se distendre : la surface reste la même, donc la déformation est entièrement sous forme de flexion de la robe. Mais ce phénomène arrive aussi dans le régime hyper non-linéaire, où on oublie totalement la gravité, mais par contre où il y a une énorme déformation du périmètre en un motif en fleur, avec une non-linéarité telle que les bords arrivent à être ré-entrants. Et on n'est pourtant plus du tout dans la même physique : dans ce régime là, l'élasticité, les forces centrifuges et l'hydro se mettent à avoir un rôle énorme dans les forces normales à la membrane – mais pas dans les forces tangentielles, qui vont piloter la dérive (à savoir la différence de vitesse entre les motifs et la robe). »

Mais alors, pourquoi le motif est-il toujours entraîné ? De surcroît, à vitesse relativement indépendante de celle de la membrane ? « Après avoir exploré différentes hypothèses plus saugrenues les unes que les autres, la solution m'est apparue en rêve (*rires*). Je me suis dit "bon sang, ça doit être ça !" puis on a réussi à le vérifier. Pourquoi la Lune fait-elle face à la Terre, lui montre-t-elle toujours la même face ? C'est un *tidal locking*. » Petit rappel sur le verrouillage par effet de marée pour comprendre cet eurêka.

Tidal locking

Partons d'une différence arbitraire dans les vitesses de rotation ω_T de la Terre et ω_L de la Lune. Par son attraction gravitationnelle, la Terre déforme la Lune (figure 6.a). Puis, cette déformation tourne avec la Lune, ainsi cisailée (6.b). L'attraction de la Terre étant plus forte proche de celle-ci (effet de marée), la Lune subit un moment tendant à aligner sa vitesse de rotation à celle de la Terre (6.c). Ainsi, à terme, $\omega_L \rightarrow \omega_T$.

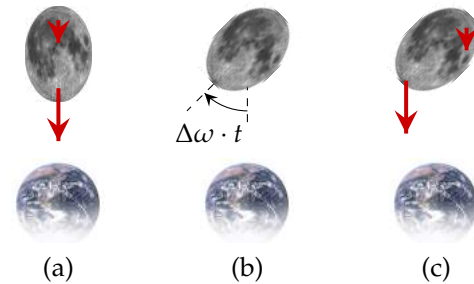


Figure 6 – Tidal locking (aucune échelle n'est respectée)

« Ici, c'est la même chose qui se passe en fait ! À savoir que, imaginons que j'oublie tout le reste, si je fais tourner la membrane, le motif est cisailé donc il va vouloir adopter la même vitesse que la membrane pour ne plus être cisailé. Donc ça, ça nous donne une force d'entraînement. Mais ce qu'il faut comprendre ici, c'est que c'est la partie dissipative du matériau qui entraîne le motif. Et dans une feuille d'élastomère, la dissipation est toute petite : c'est pour ça que le motif tourne très doucement par rapport à la vitesse de la membrane, qui peut être de $\omega_{\text{membrane}}/2\pi \simeq 5$ ou 6 Hz, alors que la vitesse de rotation du motif sera $\omega_{\text{motif}}/2\pi \simeq 0,7$ ou $0,8$ Hz. »

Ce faible entraînement en $\omega_{\text{membrane}} - \omega_{\text{motif}}$ sera ensuite rapidement compensé par la traînée hydrodynamique fonction de ω_{motif} , donnant la vitesse quasi constante observée pour le motif.

« Ce qui est bien, c'est que la partie réelle de la relation de dispersion de ce problème on sait entièrement la calculer. C'est des énormes calculs de mécanique infernaux mais on arrive à l'avoir. Vraiment, le problème c'était la partie imaginaire : maintenant, on a tout. On peut écrire l'ensemble du diagramme de phase de ce problème, notamment les transitions qui existent entre les parties gravito-réglées et les parties hyper-déformées. »

« Ici, à basse vitesse on est essentiellement dans un motif qui résulte du flambage de la robe. À très haute vitesse c'est un motif qui résulte plutôt d'une instabilité de type drapeau : c'est les forces de pression de Bernoulli qui font que si tu as une petite flexion, un différentiel de pression vient l'amplifier. La transition entre ces deux régimes peut être continue (les

forces hydrodynamiques vont prendre le relais pour faire relever les bosses du flambage) mais ça peut aussi être discontinu, selon la taille de la membrane : si elle est un peu plus rigide et un peu plus petite, elle passe par un état plat qui, ensuite, se déstabilise vers un drapeau. Donc le diagramme de phase est assez riche, notamment ce point où on passe d'une transition continue à une transition discontinue : c'est un point catastrophique dont la nature exacte reste encore à déterminer. » Comme s'il fallait encore convaincre de la complexité du problème.

Mailles sismiques



Figure 7 – Frédéric Lechenault photographié en 2018 pour Le Monde

Autre activité emblématique de l'équipe, le tricot. Étonnant ? Pas quand on voit la richesse physique du système : le premier objet d'étude a été la distribution des forces dans les mailles mais aujourd'hui, c'est un phénomène statistique qui est étudié par la doctorante Adèle Douin.

« C'est un méta-matériau », explique-t-elle, « c'est-à-dire que le fait que le fil soit tricoté, ça lui donne des propriétés physiques plus complexes que le fil seul. Le thésard qui était là avant moi, en étudiant toute cette notion de régime élastique, s'est rendu compte qu'il y avait localement des événements de *stick-slip*, dans le cas où on tire très lentement sur le tricot. C'est la façon dont se réagencent les mailles pour permettre l'élongation du matériau qui est à l'origine de ce *stick-slip*. Ces perturbations locales se propagent ensuite de

proche en proche et certaines parties du tricot glissent par rapport à d'autres parties. »

Alors, quelle belle idée se cache derrière ce système-ci ? Prenez vos paris... Et si l'on mentionne l'existence d'une "faille de glissement" après un tel *stick-slip* ? « La plupart des observables dans ce cas là (taille des failles, glissements moyens, etc.) ont des statistiques qui ressemblent énormément à celles des avalanches ou des tremblements de Terre. » Voilà donc un inattendu analogue aux événements sismiques, permettant de récolter beaucoup de données en laboratoire. « Et qui dit énormément de données expérimentales, sous-entend *machine-learning*. Cela ouvre la porte pour essayer de prédire tout ça. Un intérêt c'est que dans le labo, on a un système qui nous permet de mesurer deux objets différents : la force globale du tricot, et localement le champ de déplacement des mailles. Cela permet d'avoir les deux informations alors que souvent, dans les expériences analogues, on a soit l'une, soit l'autre. »

« Prédire des séries temporelles avec des événements rares, ça se fait en géophysique, en biologie, en finance, etc. : tous ces milieux là ont commencé à incorporer des outils de *machine-learning*, et notamment de prédiction grâce à des réseaux de neurones, parce qu'ils se sont rendus compte que la capacité d'apprentissage était phénoménale, » détaille la physicienne, dont le *machine learning* n'était qu'une part marginale de la formation. La physique se lance donc elle aussi dans l'apprentissage automatique, et les problèmes informatiques rencontrent les enjeux mécaniques – voire ici les enjeux sociétaux. « On a donc fait une première couche de *machine learning* qui apprend à classifier les événements. Une seconde couche, après coup, récupère toutes ces prédictions et les met dans un environnement numérique imaginaire, avec une ville imaginaire dans le tricot soumise aux événements sismiques. On cherche alors à savoir si, à partir des prédictions que notre modèle entraîné va nous donner, on peut décider d'évacuer une ville ou pas. La question est donc de définir un compromis entre éviter le danger et ne pas évacuer pour rien. »

« Une fois qu'on a eu cet environnement, qui à la base servait à tester les prédictions du *machine learning*, on s'est amusé à rajouter une couche de *reinforcement learning*. Le *reinforcement learning*, c'est de l'entraînement non supervisé : l'idée était de savoir si, en entraînant l'agent avec un certain nombre d'informations passées, cette succession de prédictions peut servir de levier pour améliorer la décision par rapport au cas où il n'y aurait pas cette deuxième couche de *machine learning*. Et il s'avère que la réponse est oui. »

Mozzarella en grandes déformations

Retour sur de la morphogenèse avec Frédéric Lechenault, qui offre au prochain problème une présentation dont la concrétude a rarement été égalée en physique : « si tu prends

ton bloc de mozza et que tu le coupes, la tranche est dégueulasse, elle est courbée et pas du tout comme tu voulais. » Pourquoi cette rébellion fromagère? Avouez qu'il faut oser poser la question. Pour mettre en place l'étude, ce sont plutôt des élastomères moulés qui sont utilisés au laboratoire, forts de leurs petits modules de compression.

Avec l'énergie qui le caractérise, le chercheur empoigne une scie et un fin tuyau en métal pour en faire un emporte pièce. Sous le bruit de la scie, on distingue : « Je vais éviter de me couper les doigts, si possible. Je suis assez mal barré... Normalement quand on scie, on fait un peu attention à ce qu'on fait, on bloque dans un étau... Mais bon. Pour les vertus de la démonstration... »

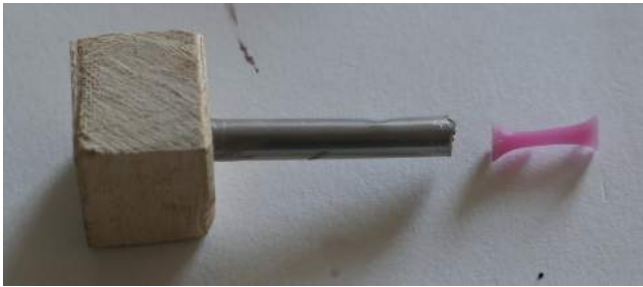


Figure 8 – L'emporte pièce (« un peu de fortune, je dois bien avouer ») et l'élastomère découpé

« J'encourage à refaire l'expérience : je vais juste bêtement enfoncer ça dans le bloc. Jusqu'au bout... Et là, *lo and behold* : quelle est la forme de l'objet que j'ai découpé? Quelle est sa taille? C'est quand même bizarre! » s'exclame-t-il en montrant le résultat de l'opération, découpé pourtant dans un bloc tout ce qu'il y a de plus homogène (voir figure 8). « Si j'avais pris de la pâte à tarte, ça aurait fait un cylindre. L'idée, c'est que quand tu appuies sur un objet élastique, il s'étend transversalement, ce qui fait que tu le découpes dans un état où il est déformé, d'un facteur quatre! Il est vraiment étendu! Ensuite, une fois qu'il est coupé, il revient dans sa configuration de repos. »

Les explications plus précises impliquent d'abord de la mécanique des milieux continus classique : « À l'entrée, tu imposes à cause du frottement ton diamètre d'entrée, et à la sortie aussi car ça frotte avec la table. Typiquement, la région de transition (la longueur pour établir le régime stationnaire au milieu) va scaler avec le diamètre car dans un système élastique, il n'y a pas d'échelle de longueur intrinsèque. C'est un argument de type Saint Venant : l'échelle de longueur, c'est celle que tu imposes avec ton objet. »

Mais rapidement, des outils plus avancés sont nécessaires : « On peut écrire la mécanique de manière très simple, linéaire, et ça nous permet de comprendre mille trucs. Mais il y a des situations où les déformations, c'est 400% : et là ça ne marche plus! » conclut-il d'un bruyant clap des mains. « Donc, il faut entrer dans la complication des mécaniques des grandes déformations, où la configuration de référence et la configura-

tion courante ne sont pas les mêmes. C'est une question qui s'est posée dans notre résolution de ce problème : ici, on crée une nouvelle surface, son coût énergétique va être celui de la découpe, de la même façon qu'il y a une tension de surface pour créer des surfaces dans un liquide ou autre. La bonne surface, c'est laquelle? C'est celle du matériau pendant que je le coupe, ou celle dans sa configuration de référence? C'est pas du tout clair! »

« Il se trouve que c'est la surface déformée qui est importante, puisque c'est la dissipation du frottement qui compte. On arrive à conclure ça parce que si tu mettais l'autre énergie, il te faudrait une force extérieure trois fois celle que l'on impose. La découpe, c'est un sujet de physique qui commence, sur lequel on est vraiment en train d'être précurseurs, et la morphogenèse il y en a à plein d'endroits dans ce problème. »

Matière à rêver

Faisons le point : robes en rotation, tricot sismique, massacre de la mozzarella. Que vient-il ensuite dans la liste? De quoi remplir la promesse de matière molle du labo : des nuages. « Les nuages, c'est encore très mal compris, parce que ça couple des échelles toutes petites (l'échelle des gouttes, qui elle-même va du micron à la goutte de pluie, ce qui est immense) à l'échelle du nuage, » prévient Florian Poydenot, doctorant dans l'équipe étudiant les échelles plutôt basses des nuages (gouttes et assemblées de gouttes).

« En fait, une goutte a des effets radiatifs, qui conduisent à des effets thermiques, et ces effets thermiques changent la circulation globale. Donc un nuage, c'est compliqué, parce que toutes les échelles sont couplées, alors qu'en général en physique on aime bien les trucs découplés. Du coup, dans les modèles climatiques, ils n'arrivent pas à s'en sortir : en gros, ils tracent une paramétrisation qui passe par tous les points et voilà. »

Un problème intéressant particulièrement le doctorant, c'est la formation de la pluie, qui ne peut pas être expliquée par condensation – trop longue. « En fait, les gouttes croissent par collision. C'est avec les collisions qu'on passe d'une goutte qui vient de nucléer sur une poussière à une goutte de pluie. » Collisions dont le principe exact n'est pas évident : les forces en jeu sont telles que selon l'hydrodynamique, deux gouttes ne devraient jamais s'atteindre. Il faut donc regarder précisément l'interface d'une goutte pour comprendre ce qui la régule.

Mais des gouttelettes, dans les dernières années, il n'y en a pas eu que dans les nuages : « j'ai aussi travaillé sur le Covid : en fait, sa transmission est quasiment uniquement aéroportée. Dans les poumons, il y a du fluide, et à cause de tout un système d'instabilités hydrodynamiques, ça décroche des petites gouttelettes aux interfaces présentes dans les poumons. Donc, s'il y a des particules virales dans les gouttelettes, elles peuvent être transportées quand on respire. Déjà, pour en

arriver là, il a fallu six mois de controverse... »

Mémoire mécanique

Le projet de la doctorante Laura Michel ressemble quant à lui quasiment à un exercice de prépa : on part d'une chaîne de ressorts reliés par des masses (figure 9.a). Oui mais attention : des ressorts bistables, c'est-à-dire admettant deux positions d'équilibre (9.b).

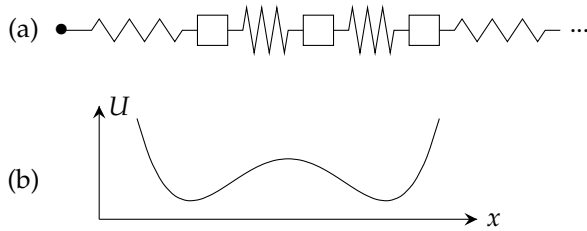


Figure 9 – (a) La chaîne de ressorts à l'équilibre et (b) le potentiel d'un ressort

La position d'équilibre de chaque ressort peut être vue comme une variable binaire, contenant un bit d'information. Une chaîne de N ressorts représente ainsi une mémoire de N bits ! On peut alors formuler un problème très complexe : est-il possible de passer d'une configuration arbitraire de cette mémoire à une autre, simplement en appliquant la bonne force $F(t)$ sur le premier ressort ?

Les études théoriques de ce problème se sont concentrées autour des équilibres mais l'équipe a trouvé une façon inventive d'explorer un domaine bien plus grand : ici aussi, du *machine learning* non supervisé. Après avoir implémenté cette méthode, il a été constaté que l'algorithme réussissait toujours à trouver la force à appliquer pour passer d'une configuration aléatoire à celle désirée. Reste à identifier nous-mêmes ce que l'ordinateur a compris sur la physique du système...

Prochaine étape : une implémentation expérimentale, qui permettra de confronter le *machine learning* à un système réel, avec ses imperfections et beaucoup moins d'échantillons sur lesquels se baser pour apprendre.

Film à suspense

Dernier dilemme exposé par Frédéric Lechenault : « c'est complètement débile encore une fois, c'est juste une bobine de fil. Un ruban, qui est enroulé sur lui-même. »

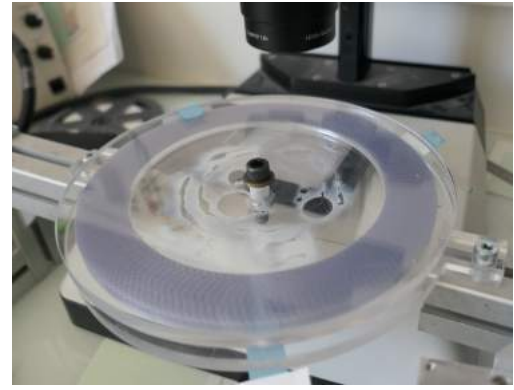


Figure 10 – Le ruban enroulé, sous une caméra pour observer son déroulement

« L'idée c'est que tu enroules ton ruban, tu bloques la bobine puis tu tires pour le serrer. Quand tu fais ça, ça grince. Quand on a abordé ce sujet là, on se disait que nous, quand ça grince, on aime bien : on sent qu'il va y avoir un problème de physique statistique sous-jacent intéressant. Là en fait, pas du tout ! Il ne se passe pas du tout de physique statistique, il se passe un truc orthogonal à ce qu'on pensait, à savoir qu'il y a des fronts de serrage qui sont éjectés vers l'extérieur en partant du centre. Il y a une cinématique de réenroulement, avec un objet qui sépare un truc à l'intérieur et un truc à l'extérieur. Ce front, il est très très rapide : en tirant 1 cm, le front a fait cent tours. »

« On n'arrive pas du tout à comprendre ce que c'est que cet objet... Soit c'est un front qui sépare deux régions de déformation différente de la bande, soit c'est une bulle d'air, bref, on ne sait pas. On rame sur ce truc, on a écrit déjà des kilomètres d'équations et en fait à la fin on n'arrive pas encore à passer dans les points expérimentaux. C'est un problème ouvert qui va être difficile. »

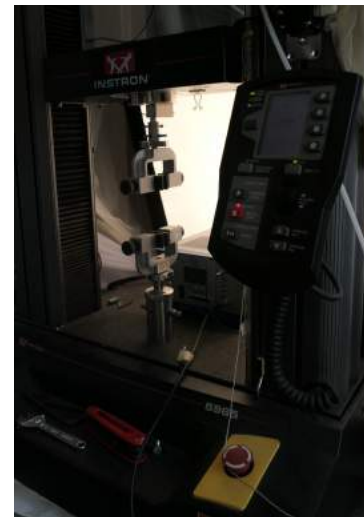


Figure 11 – Tendue dans cette grosse machine, « un fil avec un nœud. Des choses presque à la limite du simpliste mais dans lesquelles il y a toujours de très bonnes questions. »

– Victor Lequin

Stage de L3 : turbulences bidimensionnelles dans les films de savon

J'ai fait mon stage de L3 au Laboratoire Ondes et Matière d'Aquitaine (le merveilleux LOMA qu'on vous a présenté dans le numéro précédent) dans l'équipe Turbulences & Instabilités d'Hamid Kellay. L'idée était de former un film de savon cylindrique entre deux plateaux tournants que l'on pouvait chauffer. On fait tourner les plateaux en contrarotatif et on chauffe par en bas. Le film de quelques millimètres de haut subit alors de la convection thermique et les cellules de convection qui essayent de se former sont cisailées, puis tadam on observe de la turbulence (figure 12)!

Un écoulement turbulent peut être caractérisé par la loi d'échelle de sa densité spectrale d'énergie. On va chercher comment scaler : $E(k) \propto k^\alpha$. Kolmogorov a montré qu'en 3D on a $\alpha = -5/3$ mais un film de savon est un écoulement bidimensionnel et la physique n'est plus la même. Cet écoulement turbulent bidimensionnel est soumis à une double cascade avec d'autres exposants caractéristiques. Cependant Hamid et son équipe ont trouvé des exposants différents de la théorie dans certaines géométries!



Figure 12 – La turbulence!

J'ai donc testé le nouveau montage mis en place par Hamid qui permet de faire des mesures de profils de vitesse et de spectres sur ce film de savon. On tire un film cylindrique entre ces deux plateaux qui est chauffé et cisailé. On peut y observer les turbulences à l'oeil nu et c'est vraiment magnifique! J'avoue que je suis restée très longtemps à regarder ces jolis motifs passer. J'ai tout de même travaillé et j'ai réalisé des

profils moyens de vitesse de l'écoulement par deux méthodes : la vélocimétrie par image de particule (PIV : *Particle Image Velocimetry*) et la vélocimétrie Doppler (VLD : *Vélocimétrie par Laser Doppler*). Bilan de cette découverte : l'imagerie c'est plus dur que l'on croit mais les deux méthodes ont donné des profils moyens de vitesse cohérents.

Cependant pour pouvoir réellement étudier le spectre des fluctuations turbulentes ce n'était pas suffisant de se pencher sur l'écoulement moyen. J'ai donc utilisé la vélocimétrie Doppler pour mesurer le spectre des fluctuations turbulentes dans diverses conditions. Ces spectres ont permis d'obtenir que pour ce montage on trouve $E(k) \propto k^{-2,2}$ dans différentes conditions expérimentales : en faisant varier le cisaillement et la hauteur. Cette loi d'échelle ne correspond à aucune des cascades classiques d'un écoulement turbulent bidimensionnel mais cet exposant coïncide avec les expériences précédemment menées par l'équipe d'Hamid! Il semblerait donc qu'on observe un nouveau régime de turbulence 2D dans les films de savons soumis à de la convection et du cisaillement. Ce résultat nécessite évidemment de nombreuses vérifications et expériences supplémentaires mais ce fut passionnant d'observer cela pendant mon stage.

De plus j'ai passé un super moment au LOMA, les chercheurs étaient très sympas, les pains au chocolat du lundi matin étaient un délice et la ville de Bordeaux est agréable. Mention spéciale à la journée du LOMA qui a bien illustré la bonne ambiance générale qui règne au labo avec conférences, concert, bataille d'eau et cognac!

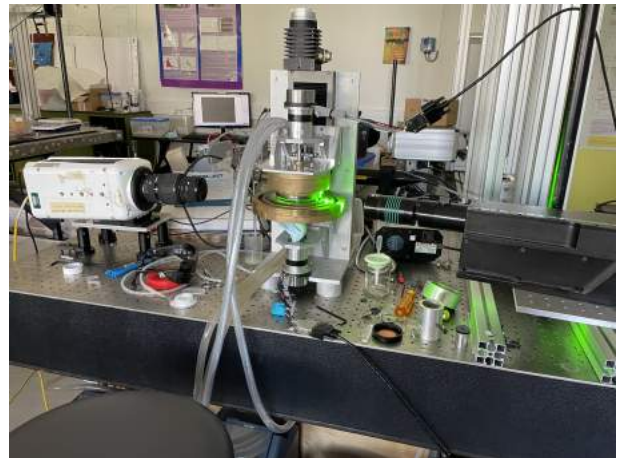


Figure 13 – Une plus grande vue du montage

– Oriane Devigne

SIR, I HAVE A QUESTION

New problems

Did the conscripts think that they were through with the mind-breaking physics problems after having made it out of prépa? Here are ten questions to prove them wrong :

- I** : Why is there often wind blowing into subway entries?
- II** : How could one model the evolution of the number of people taking part in a strike, say at RATP?
- III** : How much does Usain Bolt compress the air in front of him when running?
- IV** : Imagine a star made entirely of coal (say, carbon). What minimum size should it have for it to sustain thermonuclear fusion? Then what would its temperature be at core and surface and how long would it live?
- V** : Why does a dirt field crack into small patches when it is dried up?
- VI** : Why do snowflakes have this particular shape?
- VII** : Water in rivers is not salty, but it is so in the ocean : how does the transition happen?
- VIII** : How many jackhammers would it take to create an earthquake of a given Richter magnitude?
- IX** : Why does the shape of springs allow the metal to produce a restoring force?
- X** : Which statistics does the luminosity of a bonfire follow?

MYSTERY PHOTO

Solution of N_{21}

The picture shows a typical pattern one can observe by removing a viscous liquid (here a polyacrylamid solution) previously pressed between two plates. When one separates the two plates, the dewetting is not homogenous, resulting in such patterns. One can change the branching of the pattern by tweaking the physical properties of the liquid or the speed with which the plates are separated.



Figure 14 – Photo of N_{21}

– Ludovic Brivady

Photo of N_{22}

Here's a messy picture... but there is some order to it. Can you guess what creates these stripes before the answer is revealed next month?

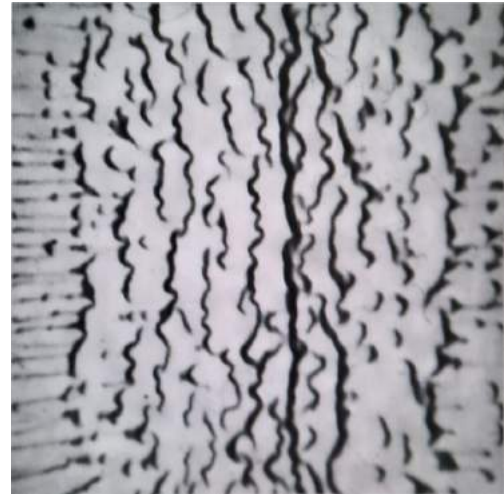


Figure 15 – Mystery photo of N_{22}

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank all who contributed and took time to answer our questions! We also thank everyone who sent us their feedback and encouragements. Particular thanks go to all conscripts who showed interest in the review and are in the process of getting into the team. And as always thank you, dear reader!

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

- **Paul Balavoine** φ_{21} :
paul.balavoine@ens.pls.eu
- **Juliette Savoye** φ_{21} :
juliette.savoye@ens.pls.eu
- **Victor Lequin** φ_{21} :
victor.lequin@ens.pls.eu
- **Oriane Devigne** φ_{21} :
oriane.devigne@ens.pls.eu
- **Esteban Foucher** φ_{20} :
esteban.foucher@ens.pls.eu
- **Guillaume de Rochefort** φ_{19} :
guillaume.de.rochefort@ens.pls.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!