

A portrait of Lydéric Bocquet, a middle-aged man with glasses, wearing a brown corduroy jacket over a patterned shirt. The background is a blurred architectural setting.

Entretien Lydéric Bocquet

« *Nous travaillons aux frontières de l'inconnu* »

Spécialiste de la matière molle et de la mécanique des fluides, Lydéric Bocquet étudie la nanofluidique et ses propriétés particulières en vue de leur trouver des applications pratiques au service de la transition énergétique.

Il est invité pour l'année 2022-2023 sur la chaire annuelle Innovation technologique Liliane Bettencourt.

Lydéric Bocquet prononcera sa leçon inaugurale, intitulée « La mécanique moléculaire des fluides – un champ d'innovation pour l'eau et l'énergie », au Collège de France, le 2 février 2023. Ses cours débiteront le 8 février 2023.

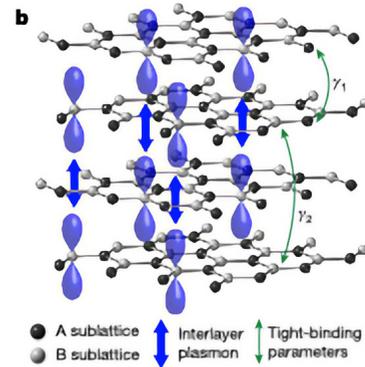
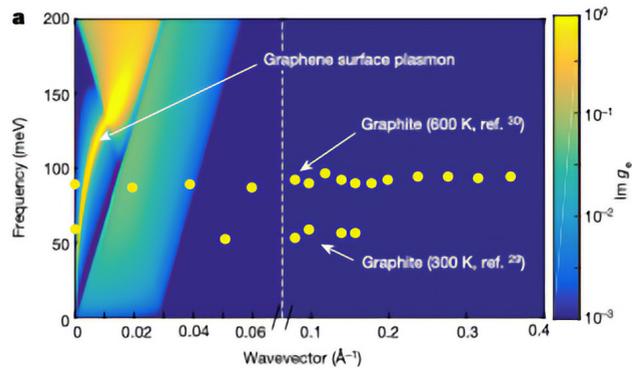
Ses enseignements seront disponibles sur www.college-de-france.fr

La nanofluidique est l'étude du comportement des fluides dans des canaux à l'échelle nanométrique. Comment en êtes-vous venu à vous intéresser à cette science transdisciplinaire ?

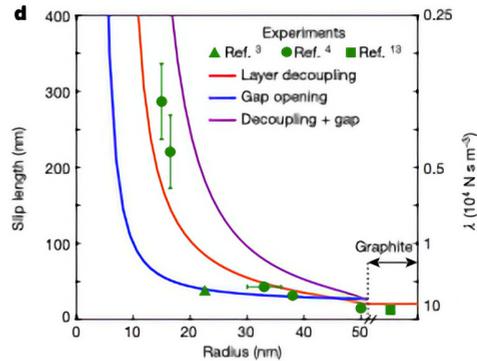
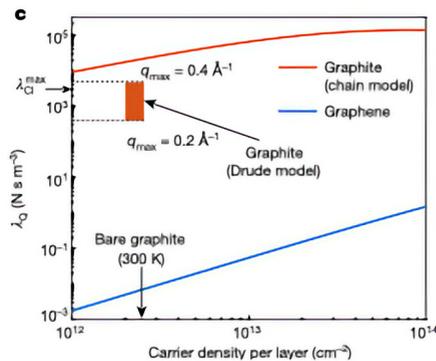
Entretien

Lydéric Bocquet : À l'origine, j'ai été formé comme théoricien. J'ai étudié la physique statistique, c'est-à-dire les systèmes physiques constitués d'un grand nombre de particules. Assez tôt dans ma carrière, je me suis intéressé aux fluides confinés et à leurs propriétés particulières, plutôt sous l'angle théorique. Mais, je me suis rendu compte que cette question des fluides aux toutes petites échelles manquait singulièrement d'études expérimentales bien contrôlées. On peut prédire théoriquement de nombreux phénomènes, cependant cela reste un peu vain si l'on n'a pas les moyens d'appréhender la réalité de la nature (car elle est souvent bien plus inattendue que l'on ne pouvait espérer). L'écueil considérable, c'est que l'on ne savait pas comment fabriquer des nanosystèmes adaptés pour étudier le transport des fluides aux nanoéchelles, et encore moins quantifier les flots moléculaires en leur sein. En 2002, alors que je suis devenu professeur à l'université Lyon 1, j'ai décidé d'opérer une bascule dans ma recherche en développant ma propre activité expérimentale. J'ai créé un groupe avec quelques collègues autour de ce qu'on appelle la « matière molle », pour me tourner ensuite vers le domaine du transport des fluides dans de tout petits systèmes. Je me suis lancé avec mon équipe dans l'exploration des écoulements des fluides dans les nanosystèmes, comme les nanotubes, ou plus récemment le graphène^[1] ; tous ces systèmes ont ouvert le champ des possibles pour aborder ces questions. Auparavant, les rares résultats de ce champ disciplinaire portaient sur des membranes, et beaucoup étaient très étonnants, voire controversés, par exemple en ce qui concerne les propriétés des membranes de nanotubes pour le transport de l'eau. Entre 2008 et 2010, nous nous sommes lancés, avec quelques collègues et des étudiants courageux, dans l'examen de ce problème en étudiant les écoulements dans des nanotubes uniques. Cela a été le début de cette aventure, et depuis, j'ai tracé mon sillon autour de ce qu'on appelle la « nanofluidique » – l'étude générale des propriétés des fluides aux nanoéchelles. J'ai essayé de comprendre les propriétés émergentes, qui diffèrent de ce qu'on connaît usuellement aux grandes échelles, ce qui en a fait un champ disciplinaire à part entière, à l'interface entre les continuums de l'hydrodynamique et de la nature moléculaire, voire quantique, de la matière condensée. Nous travaillons aux frontières de l'inconnu, et certaines de nos découvertes sont franchement inattendues.

[1] Graphène : matériau en deux dimensions (bidimensionnel), constitué d'atomes de carbone assemblés de manière régulière.



Illustrations tirée de l'article
Fluctuation-induced quantum friction in nanoscale water flows.



Vous avez récemment travaillé sur ce qu'on appelle un « neurone ionique ». De quoi s'agit-il ?

C'est typiquement une application inattendue de la nanofluidique. Ce sujet a commencé par une étude théorique des propriétés de systèmes ioniques dans des systèmes bidimensionnels. On sait en effet fabriquer depuis peu de tels canaux à partir de ce que l'on appelle des « assemblages van der Waals », développés par l'équipe du Prix Nobel Andre Geim, avec laquelle nous collaborons beaucoup. Ces assemblages sont très intéressants, car ils permettent de fabriquer des canaux extrêmement fins. Ainsi, pour la première fois, nous arrivions à réaliser et à contrôler parfaitement des écoulements de fluides ou d'ions à travers des canaux qui ne mesurent que quelques angströms^[2], donc quasiment en deux dimensions. En général, les propriétés des systèmes bidimensionnels sont très étranges ; les ions interagissent très fortement, par exemple. On avait prédit que des assemblages d'ions s'agglomèrent pour former une structure semblable à une sorte de spaghetti. Par le biais de la théorie et de simulations numériques, nous avons vu qu'il était possible de casser ces spaghettis, mais que ceux-ci pouvaient ensuite se réassembler. C'est une dynamique très complexe. Or, comme ces filaments d'ions ultra-confinés ont des tailles considérables, ce phénomène prend du temps à s'opérer ; et on voit apparaître un phénomène de mémoire. C'est une fonctionnalité qui évoque, voire mime, celle des neurones dans notre cerveau. Nous avons d'abord démontré cela théoriquement en 2021, en reproduisant quelques fonctions neuronales très basiques. Puis, en 2022, nous sommes passés de la théorie à l'expérience, et avons mis en évidence ces fonctions neuronales mimées dans nos canaux bidimensionnels. En particulier, avec ces canaux nanofluidiques, nous avons reproduit de manière très similaire les fonctions des synapses qui, dans notre cerveau, sont à la base de l'apprentissage. C'est un parfait exemple de résultat complètement inattendu : on confine de l'eau à l'échelle nanométrique et on observe des comportements qui n'ont rien à voir avec ce qu'on connaît à plus grande échelle.

[2] Angström : un angström est une unité de mesure valant 0,1 nanomètre, soit un dixième de milliardième de mètre. Il est utilisé pour effectuer des mesures à l'échelle de l'atome.

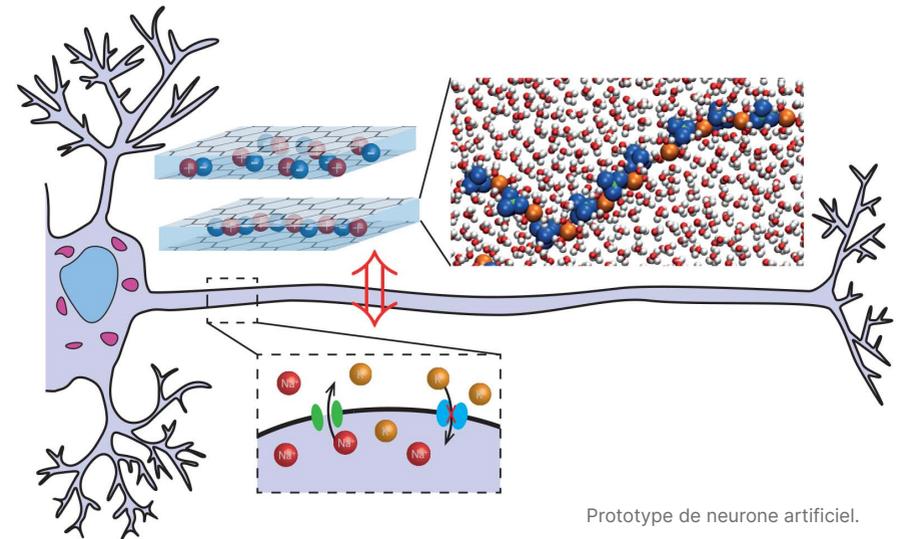
Ces résultats peuvent-ils avoir une application dans le domaine de l'intelligence artificielle ?

On est encore très loin de l'application, mais en théorie, oui, une voie s'est ouverte. Nous espérons pouvoir la suivre. Le cerveau fonctionne avec des ions et de l'eau, et il a opté pour une circuiterie ionique que nous voulons essayer de mimer. Cela n'a pas été réalisé encore. Or, nous voyons s'esquisser des possibilités avec les systèmes nanofluidiques. Pour le moment, nous travaillons avec un seul système qui ressemble à un neurone. L'idée serait de faire des systèmes parallèles qui puissent dialoguer, donc des circuits ioniques permettant de faire du calcul ionique. Il s'agira peut-être de l'un des grands enjeux de ce champ disciplinaire émergent. De façon intéressante, il y a une vraie question énergétique sous-jacente. L'intelligence artificielle consomme énormément d'énergie tandis que le cerveau fonctionne dans une économie d'énergie époustouflante (l'équivalent de deux bananes par jour !).

Cette science est en plein essor depuis quelques décennies. Quels sont ses autres enjeux majeurs aujourd'hui ?

Les enjeux de la nanofluidique sont gouvernés par deux aspects. Le premier, c'est qu'un champ disciplinaire est en train de s'établir à la suite d'une cascade de phénomènes nouveaux et de découvertes, pour beaucoup encore inexpliqués. Du point de vue scientifique, il faut se donner les moyens de comprendre ces notions nouvelles. Par exemple, on sait désormais que des phénomènes quantiques entrent en jeu, ce qui n'était pas du tout attendu, notamment en hydrodynamique. Cet aspect fondamental est très excitant, car nous avons affaire à des notions complètement nouvelles, et j'apprends tous les jours.

Le second aspect, que j'ai pu expérimenter moi-même, c'est que ces propriétés aux nanoéchelles ont des répercussions sur divers domaines scientifiques, mais aussi sur des champs d'applications technologiques, comme le dessalement de l'eau et l'énergie osmotique. Le chemin entre les découvertes fondamentales et leur application dans des domaines technologiques est court. Certaines de nos premières expériences, portant sur des nanotubes de bore-azote, ont montré que l'on pouvait générer des courants électriques très forts si l'on créait une différence de salinité entre de l'eau très salée et de l'eau douce. C'est ce qu'on appelle l'« énergie osmotique ». Nous avons breveté la technique puis cofondé une start-up, Sweetch Energy, qui emploie aujourd'hui plus de trente personnes. Elle va d'ailleurs établir un pilote industriel avec la Compagnie nationale du Rhône (CNR) et EDF, en 2023. Pour moi, c'est une belle illustration de l'impact de la science fondamentale. Il y a des possibilités de transfert rapide entre le fondamental et les applications technologiques qui sont en interaction permanente.



Prototype de neurone artificiel.

© Paul Robin, Laboratoire de physique de l'ENS (CNRS/ENS-PSL/Sorbonne Université/Université de Paris).

Ces deux aspects de votre équipe - recherche fondamentale et innovation - cohabitent-ils sans que les impératifs de l'un dévient la course de l'autre ?

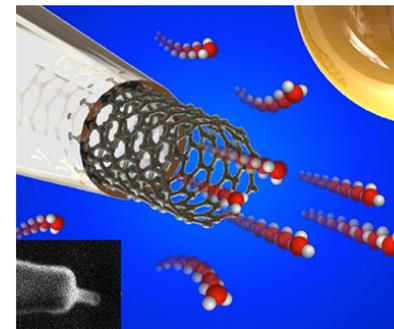
C'est un point auquel nous faisons très attention. D'une part, ces deux aspects sont en dialogue constant, car ce sont les composantes d'une seule et même équipe : Micromégas, à l'École normale supérieure. Toutefois, effectivement, leurs impératifs et leurs buts diffèrent. L'unique objectif du pendant fondamental de l'équipe est de produire des connaissances pour l'avancement de la science. La partie innovation aspire quant à elle à déposer des brevets, à mettre en place des contrats industriels et à développer, éventuellement, des start-up. Les deux sous-groupes sont donc très différents. Les faire interagir et collaborer est une richesse incroyable, notamment voir les phénomènes observés fondamentalement se traduire en innovations technologiques pour le dessalement, ou encore l'énergie. Cela reste un défi au quotidien, car les objectifs restent distincts et les échelles également. Pour réussir le transfert technologique, il ne suffit pas de dessaler l'eau à l'échelle d'un nanotube sur la base d'un phénomène nouveau, aussi beau soit-il : il faut réaliser ce phénomène pour purifier des litres, voire des mètres cubes. C'est une vision complètement différente, et donc un défi considérable... mais réellement réjouissant.

Quels sont les défis qu'un chercheur doit relever pour développer des outils expérimentaux ?

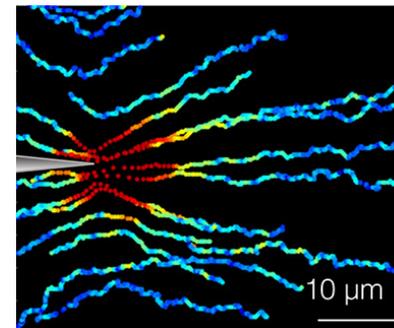
Les défis diffèrent, encore une fois, entre l'équipe fondamentale et l'équipe innovation. Pour la première, il s'agit de développer de nouveaux instruments qui permettent d'accéder à des mesures inédites. Par exemple, entre 2010 et 2016, nous nous préoccupions de mesurer ce qu'il se passe dans un seul nanotube. Vous imaginez bien qu'il faudrait un milliard d'années pour remplir un verre d'eau avec un seul nanotube. Nous nous sommes donc demandé comment mesurer un flux d'eau à cette échelle. Ne pouvant utiliser des outils standards pour ce faire, nous avons dû développer nos propres approches. C'est assez typique de nos travaux : nous fabriquons des systèmes, réfléchissons à des outils nouveaux, expérimentaux mais aussi théoriques. Par exemple, les résultats que nous avons obtenus en 2016 étaient difficiles à comprendre dans les cadres usuels ; nous avons donc émis l'hypothèse d'un phénomène quantique à l'œuvre. C'était assez inattendu, car il est difficile d'imaginer a priori de l'eau, une substance relativement classique à température ambiante, dans une « situation quantique ». Alors, nous avons esquissé un nouveau cadre théorique pour comprendre ce qu'on observait. Je développe aussi, en ce moment, un projet avec deux autres collègues : l'un de Cambridge et l'autre de l'institut Max-Planck, à Mayence. Chacun apporte sa spécialité pour mettre au point de nouveaux outils communs qui répondent à ces nouveaux cadres théoriques. Du côté de l'innovation, les défis résident pour beaucoup dans la mise à l'échelle. Encore une fois, comment passer d'une découverte fondamentale réalisée à l'échelle nanométrique à une application utile à la société ? Pour cela, il faut pouvoir effectuer une transition du nanocanal unique de nos expériences vers un matériau utilisable pour fabriquer des centaines de milliers de mètres carrés de membrane. Il faut donc réinventer la voie, à partir d'un plan établi fondamentalement. C'est ce qu'a fait la start-up Sweetch Energy. Elle fabrique des membranes à partir de matériaux biosourcés à l'échelle de mètres carrés et qui reproduisent les mêmes phénomènes que ceux observés dans nos nanotubes. Cette mise en échelle est très complexe à réaliser. La première partie est réalisée en laboratoire. On passe du nanotube à des membranes de quelques centimètres carrés – et il y a déjà un monde entre ces deux ordres de grandeur –, puis à l'échelle encore plus grande du dispositif.

Vous êtes, cette année, chercheur invité sur la chaire annuelle Innovation technologique Liliane Bettencourt du Collège de France. Qu'attendez-vous de cette expérience ?

Il y a avant tout le plaisir de l'enseignement, de la transmission des connaissances et cette excitation de savoir qu'elle peut instiller dans l'audience une vocation, une passion, ou simplement un intérêt. Par cette chaire, j'espère pouvoir montrer également au grand public que la recherche française se bat pour rester au meilleur niveau scientifique, tout en étant pleinement consciente des défis liés à la transition énergétique. Des solutions nouvelles peuvent émerger. Ces champs disciplinaires et cette démarche, un peu acharnée et souvent risquée que nous suivons mes collègues et moi depuis quinze ans, vont dans ce sens. La start-up Sweetch Energy et toutes les applications de nos travaux prennent racine dans cette volonté d'agir pour transformer nos approches en accord avec les changements climatiques que nous subissons.



L'eau au travers d'un nanotube de carbone. Illustration tirée de l'article *Massive radius-dependent flow slippage in carbon nanotubes*.



Vous avez aussi enseigné à l'université de Lyon et à l'École normale supérieure. Quelle place l'enseignement doit-il occuper dans la vie d'un chercheur ?

Cela dépend beaucoup des sensibilités ; personnellement, j'ai toujours adoré enseigner. Je pense que l'enseignement cristallise la pensée et catalyse la recherche. J'aime expliquer aux autres pour mieux apprendre moi-même, et je trouve que l'enseignement nous oblige à nous remettre en cause, à explorer des zones peu connues ou inédites. À sortir de notre zone de confort, en somme. C'est la définition même de la recherche, et on la retrouve quelque peu dans l'enseignement. On sera amené forcément à enseigner des choses que l'on ne connaît pas très bien, et cet aspect de ma carrière m'a énormément apporté. J'ai publié notamment des articles qui sont issus directement de mon enseignement, même des articles un peu anecdotiques, car j'ai beaucoup travaillé sur la physique du quotidien. Par exemple, j'ai publié un papier sur la physique du ricochet, qui trouve son origine dans un exercice que j'avais mis au point à la suite d'une question de mon fils, qui avait huit ans à l'époque (il en a vingt-huit maintenant). J'ai aussi travaillé sur la cuisson des pommes de terre, le fartage des skis et la glisse sur la neige, entre autres. J'avais réfléchi initialement à ces sujets pour l'enseignement. Ils se sont finalement transposés en sujets de recherche particulièrement intéressants. Je dois dire aussi que j'ai eu la chance de travailler avec des étudiants en thèse exceptionnels, qui sont prêts à prendre des risques et à explorer ensemble des terrains inconnus pour faire avancer la discipline. On transmet, mais on reçoit énormément.

Propos recueillis
par William Rowe-Pirra
Tous droits réservés,
Collège de France, 2023

PROGRAMME

LEÇON INAUGURALE

Jeudi 2 février 2023

Amphithéâtre Marguerite de Navarre – 18h

La mécanique moléculaire des fluides – un champ d'innovation pour l'eau et l'énergie

COURS & SÉMINAIRE

8 février > 29 mars 2023

Salle 5 – Les cours auront lieu les mercredis de 14h à 15h et seront suivis par les séminaires de 15h à 16h.

COURS : La mécanique moléculaire des fluides – Un champ d'innovation pour l'eau et l'énergie

SÉMINAIRE : Transport de fluides aux échelles nanométriques, des lois émergentes à l'innovation

8 février 2023

COURS : Nanofluidique, la science des flots moléculaires

**SÉMINAIRE : Elisabeth Charlaix
Transport de fluides aux échelles nanométriques, des lois émergentes à l'innovation**

15 février 2023

COURS : Écoulements, du glissement hydrodynamique à la friction quantique

**SÉMINAIRE : Nikita Kavokine
Quantum plumbing: where fluid dynamics meet condensed matter physics**

22 février 2023

COURS : Fluctuations aux nanoéchelles : transport et surfaces fluctuantes

**SÉMINAIRE : Benoit Coasne
Adsorption et transport de fluides dans des matériaux nanoporeux**

1er mars 2023

COURS : Transport ionique, du tamisage moléculaire au blocage de Coulomb

**SÉMINAIRE : Patrice Simon
Transport ionique en milieu confiné : application au stockage électrochimique de l'énergie**

8 mars 2023

COURS : Appariement ionique, effet Wien, transition de Kostertiz-Thouless et effets neuromorphiques : vers l'iontronique

**SÉMINAIRE : Miguel Aubouy
L'innovation comme science**

15 mars 2023

COURS : Osmose et forces entropiques : fondamentaux et applications

**SÉMINAIRE : Pascale Launois
Structuration, diffusion et dynamique de l'eau nanoconfinée**

22 mars 2023

COURS : Nexus eau/énergie et innovations nanofluidiques (I) : nouveaux matériaux membranaires et filtrations non conventionnelles

**SÉMINAIRE : Damien Voiry
Nanofluidique dans les membranes à base de matériaux bidimensionnels**

29 mars 2023

COURS : Nexus eau/énergie et innovations nanofluidiques (II) : l'énergie osmotique

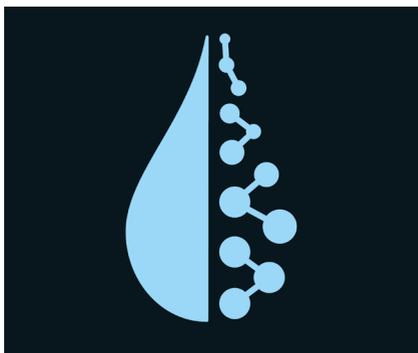
**SÉMINAIRE : Bruno Mottet
Énergie osmotique, du nanotube au mégawatt... histoire d'un upscaling**

COLLOQUE

Jeudi 25 mai 2023

Amphithéâtre Maurice Halbwachs – de 9h à 18h

Transport de fluides aux échelles nanométriques, des lois émergentes à l'innovation



Entretien

Lydéric

Bocquet