

Les lois étranges de l'infiniment petit fluide

Nikita Kavokine⁽¹⁾ (nikita.kavokine@epfl.ch) et **Lydéric Bocquet**⁽²⁾ (lyderic.bocquet@ens.fr)

(1) Laboratoire de Nanofluidique Quantique, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, SB ISIC LNQ, Station 6 (Bât. CH), 1015 Lausanne

(2) Laboratoire de Physique de l'École normale supérieure, CNRS et ENS, 24 rue Lhomond, 75005 Paris

La mécanique des fluides est un domaine remarquable par la simplicité des lois qui la régissent... qui contraste de façon frappante avec la diversité des phénomènes que ces lois modélisent. L'équation de Navier-Stokes résume la dynamique des fluides en une seule ligne mathématique. Cette équation universelle est capable de décrire les courants océaniques jusqu'à la nage des bactéries, pourtant séparés par une dizaine d'ordres de grandeurs en échelles spatiales. Ce n'est qu'à une échelle avoisinant la taille moléculaire que l'universalité de la mécanique des fluides vacille, laissant place à la complexité de la nanofluidique. Pourquoi s'intéresser à la nanofluidique ? Parce qu'aux échelles nanométriques, les écoulements ne sont plus régis par la seule hydrodynamique, mais également par la chimie des surfaces, la physique statistique et la physique des solides, jusqu'à impliquer le comportement quantique des électrons. Trouvant ainsi leur source à la croisée de plusieurs domaines, les lois fondamentales de l'infiniment petit fluide sont particulièrement étranges et complexes. Or, ces lois ont une importance technologique majeure : elles régissent notamment les processus de séparation moléculaire, de conversion et de stockage d'énergie. Dans cet article, nous proposons une approche intuitive des lois émergentes de l'infiniment petit fluide. Nous illustrons également comment la compréhension de ces lois sous-tend de nouvelles solutions technologiques pour le « nexus eau-énergie », convergence des problématiques sociétales impliquant l'eau et l'énergie.

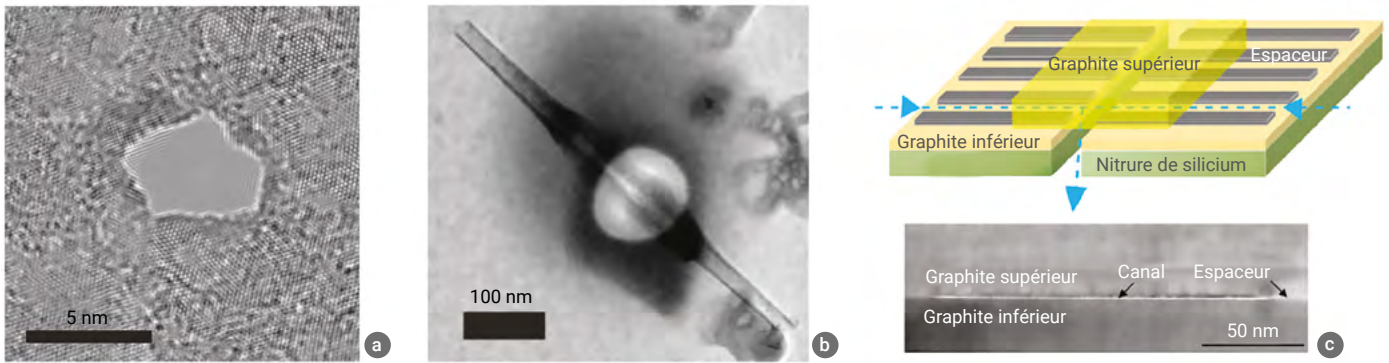
La nanofluidique – l'étude fondamentale des écoulements de fluides aux échelles nanométriques – est un jeune domaine de recherche. Les premières expériences véritablement nanofluidiques – les mesures de transport d'électrolytes à travers des nanopores ou nanocanaux – datent de moins de 20 ans. C'est là une grande différence entre la nanofluidique et la nanoélectronique, qui existe en tant que domaine depuis les années 1950. Le transport d'électrons à travers des jonctions nanométriques est un problème bien étudié expérimentalement, et qui bénéficie d'un cadre théorique solide, notamment depuis les travaux de Landauer et Büttiker. Or, s'il est relativement aisé de prédire le courant électrique à travers une jonction tunnel, il est en revanche toujours impossible aujourd'hui de prédire avec précision le débit d'eau s'écoulant au travers d'un nanotube de carbone. L'une des raisons de ce retard réside dans le fait que la fabrication même de canaux nanofluidiques individuels est longtemps restée un défi

insurmontable. Les premiers dispositifs nanofluidiques (avec un confinement en dessous de 100 nm) ont été réalisés par perçage ou gravure dans des matériaux diélectriques, tels que le verre ou le nitrure de silicium. Mais le domaine a vraiment émergé avec l'utilisation des nanomatériaux – nanotubes de carbone, découverts en 1991, ou matériaux bidimensionnels, tels que le graphène, isolés à partir des années 2000. Ces nanostructures ont permis de concevoir des canaux nanofluidiques parfaitement contrôlés. Les progrès dans la manipulation de ces matériaux ont été très rapides et, aujourd'hui, on sait fabriquer des dispositifs nanofluidiques dans diverses géométries : nanopores (0D), nanotubes (1D) et nanofentes (2D) – voir figure 1. Des nanopores peuvent être percés dans des monocouches suspendues de graphène ou de disulfure de molybdène (MoS_2) ; des nanotubes de carbone ou de nitrure de bore peuvent être manipulés individuellement et interfacés à des microréservoirs ; des

cristaux de matériaux 2D peuvent être assemblés à façon pour former des fentes bidimensionnelles dont l'épaisseur est déterminée par un nombre discret de couches atomiques [1]. Les matériaux 2D et leurs assemblages constituent désormais un véritable couteau suisse des laboratoires travaillant sur la nanofluidique. Tous ces dispositifs peuvent aujourd'hui atteindre un confinement parfaitement contrôlé en dessous du nanomètre – comparable à la taille d'une molécule d'eau (0,3 nm). Depuis, les résultats expérimentaux sur ces dispositifs s'accumulent, comme autant de manifestations des étranges lois de l'infiniment petit fluide [2].

La caractérisation de canaux de taille moléculaire requiert également des mesures ultrasensibles. Les mesures de courant ionique sont les plus répandues. Lorsqu'un nanocanal rempli d'une solution d'électrolyte est soumis à une différence de potentiel, les ions sont mis en mouvement, créant ainsi un courant électrique qui peut

>>>



1. Systèmes nanofluidiques à base de nanomatériaux.

(a) Nanopore percé dans une couche de disulfure de molybdène.

(b) Nanotube de carbone inséré dans une membrane de nitrure de silicium.

(c) Nanofente obtenue par assemblage de van der Waals de cristaux de graphène. Reproduit de [2].

Il faut noter que la nature maîtrise la fabrication d'un genre particulier de systèmes nanofluidiques : les canaux ioniques ou porines, formés par des protéines qui s'insèrent dans les membranes de nos cellules, sont en fait de minuscules tuyaux, larges d'à peine un nanomètre. Leurs fonctionnalités très précisément ajustées (sélectivité aux ions ou à l'eau, sensibilité mécanique ou chimique) sont une source d'inspiration pour les canaux nanofluidiques artificiels. Ces fonctionnalités reposent cependant sur les détails moléculaires des structures protéiques. Les canaux biologiques constituent ainsi une véritable orfèvrerie fluide, mais ils révèlent difficilement les principes généraux qui régissent les écoulements de fluides aux nanoéchelles. La nanofluidique s'est donc surtout développée autour des systèmes artificiels, et ce n'est que très récemment que des idées unifiant les canaux biologiques et artificiels ont commencé à se développer.

>>>

être amplifié et mesuré. Des courants de l'ordre de la dizaine de femtoampères peuvent être détectés, ce qui rend possible la caractérisation de nanotubes individuels. La conductance ionique fournit cependant une information indirecte et incomplète et le développement de méthodes de caractérisation alternatives est un défi expérimental majeur pour la nanofluidique. La perméabilité hydrodynamique, qui quantifie le débit de fluide sous un gradient de pression donné, reste une quantité très difficile à mesurer et les chercheurs ont introduit des méthodes indirectes pour contourner cette difficulté, par exemple la mesure de la force exercée par le minuscule jet d'eau émergeant d'un nanocanal [3]. Très récemment, des méthodes spectroscopiques, telles que la SFG – *Sum Frequency Generation*, qui renseigne sur l'orientation interfaciale des molécules d'eau – sont venues apporter des informations moléculaires sur le comportement des fluides nanoconfinés, mais elles restent très parcellaires. La recherche en nanofluidique s'apparente aujourd'hui à l'exploration d'une grande pièce sombre avec une lampe de poche : la lumière n'a été faite que sur quelques éléments disparates, et le travail du physicien – aussi passionnant que difficile – est de reconstituer la cohérence entre ces éléments, tout en cherchant les moyens d'en révéler de nouveaux.

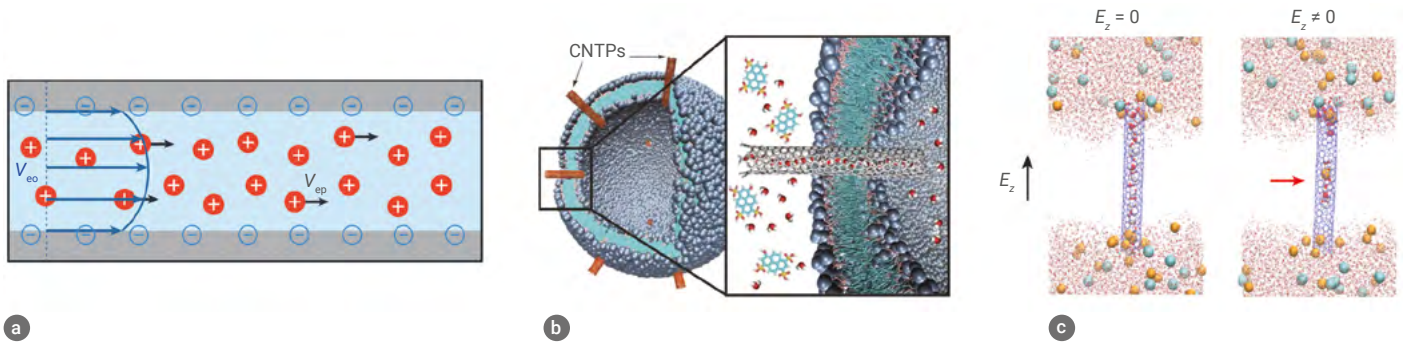
Transport ionique : par-delà le champ moyen

Dissous dans une solution aqueuse, les ions d'un sel (tel que le chlorure de sodium, NaCl) sont des porteurs de courant électrique. La loi d'Ohm s'applique *a priori* même dans des systèmes nanoconfinés, avec une conductance électrique proportionnelle au nombre de porteurs. Cependant, aux nanoéchelles, les effets de surface ont une importance accrue – simplement du fait d'un grand rapport surface-sur-volume. Les surfaces des dispositifs nanofluidiques acquièrent systématiquement une charge en solution aqueuse, souvent du fait de l'adsorption d'ions présents en solution. Cette charge de surface attire des contre-ions à l'intérieur du canal, augmentant ainsi sa conductance. La population d'ions mobiles dans le canal acquiert alors une charge nette, qui vient compenser celle, fixe, de la surface. Ainsi, un écoulement de fluide à travers le canal transporte un courant ionique : on parle de « courant de *streaming* ». L'effet inverse existe également – un courant ionique (induit par une différence de potentiel) est accompagné d'un écoulement de fluide : on parle de flux électro-osmotique (figure 2a). De manière générale, la charge de surface couple le transport d'ions et le transport de fluide. Ces phénomènes de transport couplés, qui émergent spécifiquement aux nanoéchelles, sont d'ores et déjà à la base

d'innovation technologiques, dont certaines sont mentionnées ci-après.

Les phénomènes que nous venons d'évoquer sont *a priori* décrits de façon cohérente par les équations dites de Poisson-Nernst-Planck-Stokes (PNPS). Ces équations décrivent le couplage entre phénomènes de diffusion, transport convectif sous champ électrique et flux hydrodynamique. Leur apparente simplicité cache leur caractère intrinsèquement non-linéaire, lié aux couplages électrostatiques. Elles sont en fait intimement similaires aux équations décrivant le transport de charges (électrons et trous) dans les semi-conducteurs ; cette analogie suggère une similitude directe des propriétés émergentes dans le transport nanofluidique avec celle de dispositifs électroniques. Par exemple, les diodes ioniques qui peuvent être réalisées au travers de nanocanaux asymétriques sont analogues aux diodes de Shockley [4]. Mais une différence importante est que les fluides s'écoulent sous contrainte, contrairement aux solides, ce qui induit des phénomènes de couplage du transport de charge avec les écoulements, conduisant par exemple à des effets osmotiques fortement non-linéaires [5, 6].

La description PNPS repose sur une hypothèse de milieu continu et sur une approximation de champ moyen pour les interactions électrostatiques. Elle rencontre donc ses limites quand les effets



2. (a) Principe de l'électro-osmose dans un nanocanal aux parois chargées. La charge de surface (négative) attire des contre-ions (positifs) à l'intérieur du canal. Les ions mobiles présents dans le canal ayant alors une charge nette, l'application d'un champ électrique provoque un écoulement du fluide : c'est le flux électro-osmotique.

(b) Nanotubes de carbone de 0,8 nm de diamètre insérés dans une vésicule lipidique.

(c) Clichés de simulations par dynamique moléculaire montrant la fragmentation de la chaîne de molécules d'eau à l'intérieur du nanotube, rendant compte de la violation de la relation de Nernst-Einstein observée expérimentalement. Reproduit de [2] et [8].

de structuration moléculaire deviennent importants, mais surtout quand les interactions entre ions ne sont plus assez faibles pour être négligées. Cela peut facilement être le cas dans un canal nanofluidique, où les interactions ioniques sont écrantées par la paroi du canal plutôt que par le liquide. Les ions de charges opposées ont alors tendance à s'associer en paires, dites paires de Bjerrum, qui induisent des effets non-linéaires dans la conduction ionique – en particulier, des effets de mémoire, dont des signatures ont récemment été observées dans des canaux bidimensionnels [7]. De façon encore plus surprenante, il a été observé que dans des nanotubes de tout juste 0,8 nm de diamètre (figure 2b), le transport des ions potassium est en violation apparente de la relation de Nernst-Einstein, relation fondamentale entre le coefficient de diffusion et la mobilité sous champ électrique. Ce transport anormal peut-être expliqué par un autre effet non-linéaire : la fragmentation de la chaîne d'eau confinée en plusieurs morceaux sous l'effet du champ électrique [8] (figure 2c). Enfin, les équations PNPS se fondent sur l'hypothèse d'une charge de surface constante et immobile – hypothèse remise en question par de nombreux résultats expérimentaux. Régulation de charge par la concentration en sel, mobilité de la charge de surface, mobilités ioniques non-uniformes à travers le canal... ces effets interfaciaux subtils, impliquant à la fois la chimie de surface et la physique du solide, échappent pour l'instant à une compréhension systématique.

Origines de la friction hydrodynamique

À l'échelle macroscopique, le flux laminaire d'un liquide à travers un tube est régi par la loi de Poiseuille : sous un gradient de pression donné, le débit dépend du rayon R du tube comme R^4 . Une dépendance aussi forte en fonction du rayon implique un débit infime si le rayon est de l'ordre du nanomètre. Des mesures de débit d'eau à travers des canaux de quelques nanomètres de rayon ont cependant pu être réalisées, car on observe systématiquement aux nanoéchelles des débits plus importants que ceux prédits par la loi de Poiseuille. Cela est dû au fait que le liquide « glisse » sur les parois, en contradiction avec l'hypothèse macroscopique de non-glissement, impliquant une dépendance en rayon plus faible (en R^3). En d'autres termes, alors que le débit à travers un tube microscopique est régi par la viscosité (le frottement interne du fluide), le débit à travers un nanotube est déterminé par le frottement entre le fluide et la paroi.

Bien que l'idée d'une condition de glissement partiel en hydrodynamique remonte aux travaux de Navier, l'origine microscopique du frottement entre un liquide et un solide est toujours un sujet de recherches intenses. Intuitivement, un écoulement de fluide le long d'une paroi rencontre une résistance si la paroi n'est pas parfaitement lisse : le frottement devrait donc être lié à la rugosité (à l'échelle atomique) de la paroi solide. On s'attend de plus à ce qu'il y ait un

lien entre le frottement et les propriétés de mouillage de la paroi : plus la paroi est hydrophobe, plus la première couche moléculaire du liquide tend à être éloignée de la paroi, et moins il y a de frottement. Cela implique une relation entre le coefficient de frottement hydrodynamique et l'angle de contact liquide-solide, qui est vérifiée pour de nombreux systèmes, aussi bien expérimentalement qu'en simulation par dynamique moléculaire [9].

Une violation notoire de cette relation est cependant observée pour les écoulements d'eau dans les nanotubes de carbone. L'eau y coule quasiment sans frottement et le peu de frottement mesuré dépend fortement du rayon du tube : plus le tube est étroit, plus le frottement est faible [3]. Cette observation est pour le moins surprenante : *a priori*, les propriétés de rugosité interfaciale ou de mouillage ne dépendent pas du rayon du tube. Son explication n'a été possible que grâce à un développement théorique récent : une description quantique de l'interface solide-liquide, qui a permis de rendre compte de l'interaction entre la dynamique du fluide et la dynamique électronique dans la paroi du tube [10]. Lorsqu'une telle interaction est prise en compte, il apparaît que la rugosité interfaciale n'est pas la seule source de frottement solide-liquide. En plus du frottement rugueux, dit « classique », il existe un frottement induit par les fluctuations, dit « quantique ». Le frottement quantique, parfois appelé frottement de van der Waals, rend compte du fait que le fluide en écoulement perd de l'énergie en créant des

>>>

Nous décrivons ici deux exemples du cheminement depuis la découverte de nouveaux comportements nanofluidiques jusqu'à la création de nouvelles technologies de rupture pour l'eau et l'énergie. Le premier exemple concerne l'énergie osmotique, qui exploite la différence de salinité entre eau de mer et eau douce. Son potentiel avait été identifié dès les années 1950. C'est une énergie renouvelable, non-intermittente, pilotable, avec un potentiel mondial considérable, de plusieurs centaines à 1000 gigawatts selon les estimations, soit l'équivalent de la puissance nucléaire mondiale. Pourtant son exploitation industrielle reste aujourd'hui marginale, car les technologies actuelles de conversion – élaborées dans les années 1960-1970 et basées principalement sur des membranes polymériques – demeurent peu efficaces. Depuis une dizaine d'années, les résultats de la nanofluidique ont montré qu'aux échelles nanométriques, un phénomène d'osmose non-conventionnelle, de type « diffusio-osmose », pouvait augmenter sur certains matériaux la conversion d'énergie osmotique. Ce point de vue différent a permis de concevoir des membranes à partir de matériaux biosourcés, des dérivés de cellulose, plus efficaces et bien moins chères que les membranes polymériques habituellement utilisées. Cela a été le point de départ d'une mise à l'échelle industrielle qui s'est concrétisée en 2024 par le lancement d'un pilote sur le Rhône par la *start-up Sweetch Energy* qui développe cette nouvelle technologie d'énergie osmotique. Cette approche peut être élargie à ce que l'on pourrait appeler les « technologies entropiques », utilisant les forces entropiques pour convertir l'énergie de mélange. Au-delà de l'énergie osmotique, la technologie membranaire développée peut s'étendre par exemple à la conversion des chaleurs fatales, chaleur inexploitée produite par un processus thermodynamique industriel et généralement rejetée dans l'environnement sans aucune valorisation.

Un autre exemple de chemin court entre recherche en nanofluidique et application technologique concerne le phénomène de diode osmotique évoqué plus haut et prédit théoriquement en 2013 [5]. Par analogie avec les semi-conducteurs, la caractéristique tension-courant ionique d'un canal asymétrique (par exemple en termes de charge de surface) présente elle-même une asymétrie, ou rectification. De façon plus surprenante, la théorie suggère aussi que la pression osmotique, donc le flux d'eau sous gradient de concentration ou de potentiel, est également rectifiée. Cette prédiction a pu être confirmée à l'échelle membranaire, grâce à un assemblage asymétrique tel que cela a été suggéré théoriquement [6]. L'effet diode a permis ainsi de dessaler ou de purifier l'eau sous champ électrique alternatif (AC) par rectification osmotique, quelques volts ayant le même effet que quelques dizaines de bars en pression. La démonstration de l'effet à l'échelle membranaire permet d'envisager une mise à l'échelle rapide, qui a été engagée par la *start-up Ilion*, issue de notre laboratoire, pour développer une technologie de dessalement basée sur ces effets nanofluidiques.

Dans notre quotidien de chercheur, nous rencontrons parfois des phénomènes ou des propriétés qui nous semblent avoir un réel potentiel en tant qu'application. Mais passer de l'échelle du laboratoire à l'échelle industrielle est un défi considérable, que rencontrent toutes les *start-ups* développant des technologies de rupture issues de recherches fondamentales. Cette transition nécessite en quelque sorte de réaliser le passage d'une recherche guidée uniquement par la curiosité, donc sans aucune concession, à une recherche à mission, la mission étant, par exemple, de réaliser dans un premier temps un prototype basé sur la découverte scientifique, ou de construire un pilote industriel effectif. Le mathématicien Richard Hamming expliquait avec raison : *"In science, if you know what you are doing, you should not be doing it. In engineering, if you do not know what you are doing, you should not be doing it."* En réalité, parcourir le chemin entre recherche et innovation requiert une collaboration intime entre ces deux visions en apparence contradictoires : science fondamentale et ingénierie de haut niveau. De façon concrète, nous avons créé au sein de l'équipe Micromégas une *spin-in* qui fait cohabiter notre recherche fondamentale avec de l'ingénierie fine afin d'assurer les premières étapes, souvent délicates, de la mise à l'échelle. Développer des applications sur la base de résultats de recherche reste une aventure, engagée et risquée. Mais il est enthousiasmant pour un chercheur de voir des résultats fondamentaux se concrétiser en technologie en rupture avec l'existant. La réussite de ce cheminement démontre la puissance de la recherche fondamentale.

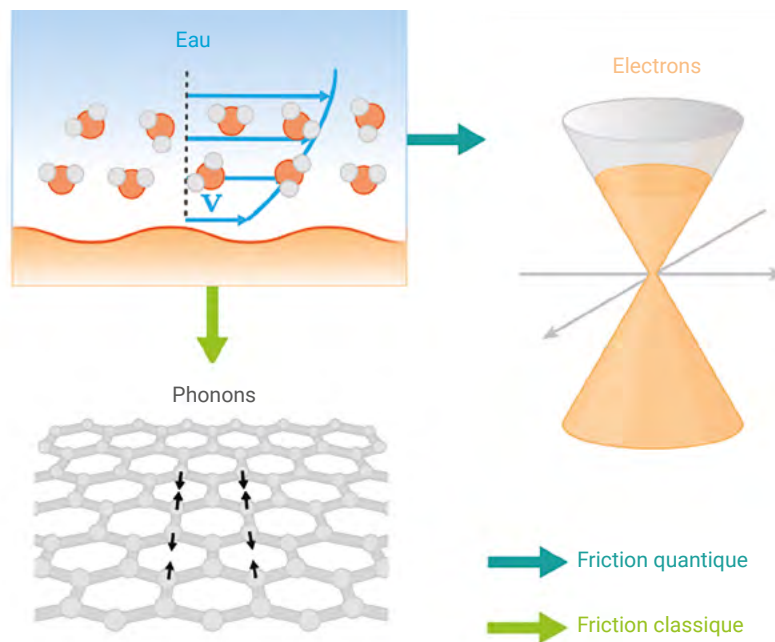
>>>

excitations électroniques dans le solide (figure 3). Ce frottement est d'autant plus fort que les fluctuations moléculaires du liquide et les excitations du solide sont proches en fréquence ; il est de ce fait très sensible aux propriétés électroniques du solide. Ainsi, l'infime frottement subi par l'eau dans les nanotubes de carbone a pu être attribué à l'effet de friction quantique ; la dépendance en rayon correspond alors à celle d'un mode collectif des électrons du nanotube, le mode plasmon de surface, associé aux oscillations collectives des électrons entre les feuillets de carbone d'un nanotube multiparoï.

Vers une « plomberie quantique »

Plus généralement, cette perspective suggère que les parois des nanocanaux ne peuvent plus être considérés comme des murs passifs (hypothèse usuelle de l'hydrodynamique) mais que ses degrés de liberté internes, notamment ses excitations collectives – plasmons, mais également phonons, excitons, etc. – peuvent se coupler avec les modes collectifs du fluide. De l'énergie et de la quantité de mouvement peuvent être échangés dans les deux sens, du fluide vers le solide et *vice versa*, à la condition que les modes soient en syntonie, c'est-à-dire que leurs densités spectrales se recouvrent en fréquence et en nombre d'onde.

Deux phénomènes que nous avons prédits récemment illustrent les opportunités offertes par cette « plomberie quantique » : le phénomène de *flow tunneling* et la conversion d'énergie dite « hydronique », décrits sur la figure 4. S'il paraît tout à fait impossible du point de vue hydrodynamique qu'un écoulement traverse un mur imperméable, le couplage du fluide aux degrés de liberté internes du mur le permet (pour certains matériaux) : un fluide s'écoulant sur une paroi d'épaisseur finie peut induire un écoulement de l'autre côté du mur ! [11] Ce phénomène est lié au transfert de quantité de mouvement entre le fluide et les électrons de la paroi, qui se propage alors de proche en proche au travers de la paroi solide, puis enfin vers le fluide de l'autre côté. L'amplitude de l'effet dépend de la syntonie entre les modes du fluide et ceux



3. Mécanismes du frottement liquide-solide. La friction classique correspond au transfert de quantité de mouvement au réseau cristallin du solide (phonons), alors que la friction quantique transfère de la quantité de mouvement directement aux électrons.

de la paroi solide ; dans des conditions optimales, des parois d'une dizaine de nanomètres d'épaisseur pourraient être traversées. Une autre prédiction théorique concerne la conversion directe d'énergie mécanique du fluide en énergie électrique au sein d'une paroi avec laquelle le fluide est en contact. Cet effet exploite le phénomène de friction quantique décrit précédemment, qui peut induire un courant électronique sous l'effet d'un mouvement du fluide. De façon surprenante, la génération de courant se fait même en l'absence d'espèces chargées en solution, grâce aux fluctuations de charge du liquide appelées *hydrons* – d'où le terme « énergie hydronique » [12]. Ce mécanisme ouvre des perspectives particulièrement intéressantes pour la récupération d'énergie dite bleue, associée à l'eau, mais *sans électrochimie*.

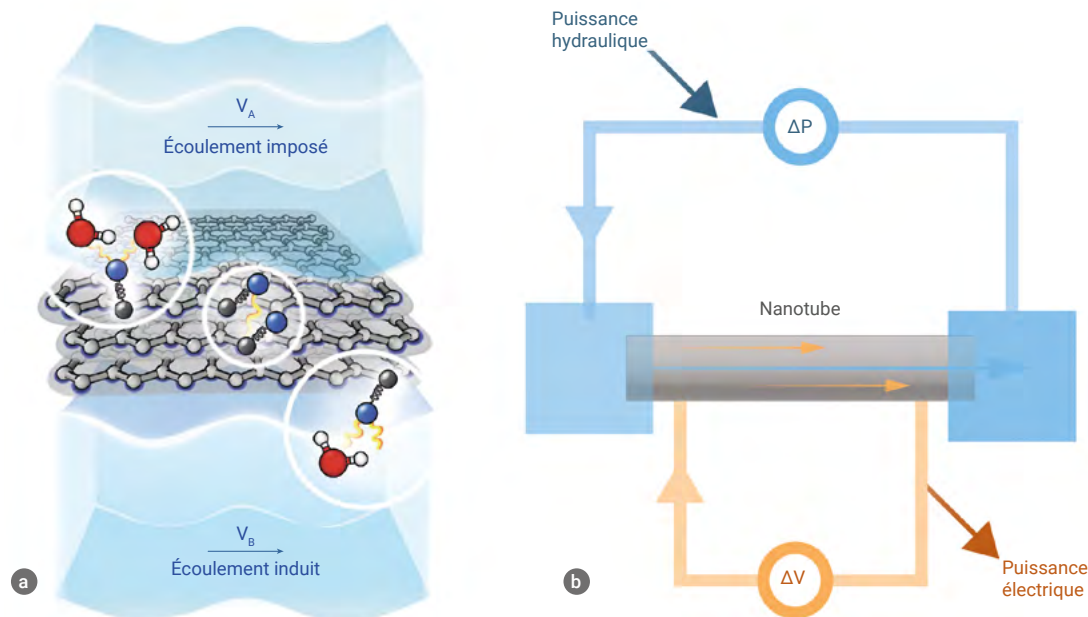
La « plomberie quantique », en permettant le couplage entre des caractéristiques quantiques des solides et celles propres aux fluides, offre tout un champ nouveau d'exploration scientifique. Ces effets, qui n'ont jamais été explorés jusqu'ici, offrent une perspective enthousiasmante pour la recherche et l'innovation en nanofluidique.

Nexus eau-énergie

Les propriétés des écoulements nanofluidiques sont ainsi étranges et uniques. Cette singularité est *a priori* un atout pour le développement de nouvelles technologies, d'autant que le chemin est court en nanofluidique entre lois fondamentales et applications, notamment pour la conversion énergétique ou le dessalement. Cette interface constitue le « nexus eau-énergie » – terme qui résume l'interdépendance systémique et incontournable entre eau et énergie : il faut beaucoup d'eau pour collecter l'énergie (par exemple pour la production d'hydrogène ou le refroidissement des centrales nucléaires) et beaucoup d'énergie pour filtrer ou dessaler l'eau. Les comportements émergents aux nanoéchelles offrent des solutions complètement nouvelles à ces problèmes intriqués, notamment dans le domaine des membranes, à la fois en termes de principes physiques et de matériaux. Concrètement, les technologies membranaires sont souvent limitées au tamisage stérique ou électrostatique de certains solutés, tel que le sel dans le cas du dessalement : ce sont ni plus ni moins des passoires. Cependant, avec un peu

>>>

4. (a) Principe du *flow tunneling* : un écoulement est transmis à travers une paroi solide grâce aux excitations internes de cette paroi.
 (b) Conversion d'énergie « hydronique » : le flux d'un liquide électriquement neutre le long d'une paroi conductrice y induit un courant électrique. Reproduit de [11, 12].



>>>

d'imagination, on peut concevoir des solutions bien plus efficaces et originales basées sur les phénomènes de transport non-linéaire, voire même de couplage quantique décrits précédemment. Ce passage à la technologie reste pourtant un défi car il ne suffit pas de mettre en évidence un comportement singulier à l'échelle d'un seul canal pour le multiplier à l'échelle de la membrane. La mise à l'échelle pour atteindre le stade de technologies industrielles est une aventure scientifique en soi.

Conclusion et perspectives

Explorer le domaine de la nanofluidique requiert de franchir un pas technologique et instrumental dans la conception et la fabrication des nanosystèmes fluidiques. Mais cet effort est largement récompensé par la richesse considérable qu'offre le transport des fluides aux nanoéchelles. Nous n'avons abordé ici qu'un pan nécessairement réduit des phénomènes mis en évidence ces dernières années dans ce

domaine, et nous aurions pu citer bien d'autres exemples comme les variations contre-intuitives de la permittivité diélectrique en confinement, la possibilité d'une phase superionique en conditions douces, la cristallisation à température ambiante dans les nanotubes, les effets de blocage coulombien, etc. Ces phénomènes ouvrent de multiples perspectives théoriques et expérimentales jusqu'ici inexplorées. C'est tout le sel de l'intrigue scientifique. ■



- 1• B. Radha *et al.*, "Molecular transport through capillaries made with atomic-scale precision", *Nature* **538** (2016) 222-225.
- 2• N. Kavokine, R.R. Netz and L. Bocquet, "Fluids at the Nanoscale: From Continuum to Subcontinuum Transport", *Annual Review of Fluid Mechanics* **53** (2021) 377-410.
- 3• E. Secchi *et al.*, "Massive radius-dependent flow slippage in carbon nanotubes", *Nature* **537** (2016) 210-213.
- 4• R. Karnik *et al.*, "Rectification of ionic current in a nanofluidic diode", *Nano Letters* **7** (2007) 547-551.
- 5• C.B. Picallo *et al.*, "Nanofluidic osmotic diodes: Theory and molecular dynamics simulations", *Physical Review Letters* **111** (2013) 244501.
- 6• S. Abdelghani-Idrissi *et al.*, "Resonant osmotic diodes for voltage-induced water filtration across composite membranes", *Nature Materials* (2025): sous presse.
- 7• P. Robin *et al.*, "Long-term memory and synapse-like dynamics of ionic carriers in two-dimensional nanofluidic channels", *Science* **379** (2023) 161-167.
- 8• Z. Li *et al.*, "Breakdown of Nernst-Einstein relation in carbon nanotube porins", *Nature Nanotechnology* **18** (2023) 177-183.
- 9• D.M. Huang *et al.*, "Water slippage versus contact angle: A quasiuniversal relationship", *Physical Review Letters* **101** (2008) 226101.
- 10• N. Kavokine, M.-L. Bocquet and L. Bocquet, "Fluctuation-induced quantum friction in nanoscale water flows", *Nature* **602**, 84-90 (2022)
- 11• B. Coquinot *et al.*, "Momentum tunnelling between nanoscale liquid flows", *Nat. Nanotechnol.* **20** (2025) 397-403.
- 12• B. Coquinot, L. Bocquet and N. Kavokine, "Hydroelectric energy conversion of waste flows through hydroelectronic drag", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **121** (2024) e2411613121.