

# Physique pour l'environnement, l'urbain et l'alimentation

Les enjeux de la physique pour 2030 dans le domaine de l'alimentation, l'urbain et l'environnement sont principalement liés aux transitions auxquelles nous sommes confrontés, le changement climatique allant de pair avec une plus grande exigence de sobriété liée à la finitude des ressources, mais aussi de résilience et d'adaptation. Sur ces thématiques, il nous a paru tout aussi important d'identifier les défis et urgences à relever que les sujets de physique émergents.

Environnement, urbain et alimentation sont des systèmes complexes en eux-mêmes, pour lesquels une approche systémique est nécessaire; qui plus est, ils sont interconnectés et on ne peut traiter l'environnement, la ville, les sols, l'eau et l'alimentation indépendamment. Une alimentation saine et durable, une diminution de la pollution, la mise en place d'un environnement urbain de qualité: tout cela contribue à ce que l'on peut nommer la «santé globale». Soulignons que, dans le cadre d'une compréhension globale, on peut de moins en moins ignorer le facteur humain et les effets de rétroaction qui en découlent, que ce soit au niveau de l'acceptabilité par les citoyen·nes des modifications de leur environnement physique ou des produits qu'ils ont à consommer. Par rapport aux approches actuelles en physique, une évolution est nécessaire vers une meilleure prise en compte de la complexité du réel, un peu comme l'ont fait les biophysicien·nes depuis une vingtaine d'années en passant de l'étude de systèmes très modèles à des objets biologiques plus réalistes.

Nous avons structuré le document en deux temps, en dégageant les enjeux dans les domaines de l'environnement, de l'urbain et de l'alimentation, puis en les reliant aux thématiques de physique. Ainsi, nous décrivons d'abord les enjeux à partir de la vision que les expert·es nous en ont donnée. C'est dans la suite du document que sont abordées les questions à explorer dans les prochaines années du point de vue de la physique.

## LES ENJEUX PAR THÉMATIQUES

### ENVIRONNEMENT

Les socio-écosystèmes sont en évolution rapide, voire en crise. Les changements climatiques provoquent des modifications environnementales rapides et marquées. Les organismes et les écosystèmes sont soumis à des

facteurs de stress et de risques multiples: polluants, particules fines, radiations, perturbateurs endocriniens, antibiotiques, pesticides, nouvelles maladies, bruit, etc. Qui plus est, ils ne sont pas indépendants mais connectés entre eux par des flux de matière, d'énergie, d'organismes et de contaminants avec des rétro-actions entre grande et petite échelle. Les processus biotiques, abiotiques et anthropiques sont couplés. Nous sommes face à un système dynamique complexe, en situation de «forçage» hors d'équilibre, dont il s'agit idéalement de prévoir la réponse à différentes échelles spatiales et temporelles, ainsi que les trajectoires d'évolution possibles.

Des enjeux se dégagent dans tous les milieux environnementaux pris individuellement, et dans le couplage entre eux. Pour l'océan, un premier constat est que l'on manque encore fortement de connaissances générales, alors qu'on a besoin de prédire son évolution globale via celle des différents phénomènes dont il est le siège (captation du CO<sub>2</sub>, transport de chaleur, cycles de matière et couplage au vivant...) et des changements qui l'affectent (acidification, pollution, hausse de la température...). Pour répondre à ces questions, il faudra d'abord réaliser plus de mesures (capteurs embarqués, données satellites...) et savoir les analyser. On connaît également très mal les conditions extrêmes de l'océan profond et les modifications qu'apportent à ce niveau le changement climatique et la pollution, ainsi que les zones littorales et les traits de côtes.

De nombreuses questions se posent en ce qui concerne l'eau (eau douce, eau potable, eaux usées, stations d'épuration), qui est sujette à de la contamination et/ou raréfaction. Il s'agit en premier lieu de prédire et piloter sa quantité et sa qualité, en particulier dans les situations transitoires liées aux événements extrêmes et à la pollution: sécheresse, canicule, crues, etc. Pour cela se dégage un besoin de mesures en ligne, de développement de procédés de stockage frugaux et innovants, de dépollution, de filtration et de réduction des pertes d'eau.

Deux grands enjeux se dessinent en ce qui concerne le sol: sa remédiation et l'augmentation de ses performances. Le sol, pollué par les intrants chimiques et divers types de contaminants (métaux, micro ou nanoplastiques, etc.), asséché ou inondé sous l'effet des événements extrêmes, est très appauvri en surface, ce qui diminue les rendements agricoles. Se pose donc la question de rendre vivant un sol mort et, de surcroît, d'amé-

liorer sa fonctionnalité (rendement, rétention d'eau) : pour cela, il faut comprendre les interactions entre ce milieu physique, la (bio-) chimie qui s'y déroule et le vivant aux petites échelles (micro-organismes, petits animaux). Les cinétiques de ces divers mécanismes sont très différentes et il faut considérer une large gamme d'échelles temporelles, le sol « macroscopique » évoluant sur des temps longs comparés à ceux des flux qu'on y trouve. Les questions du fonctionnement des arbres en tant qu'objet physique (réseau hydraulique résilient de captation et de distribution, matériau composite structuré à grande résistance mécanique) et de l'interaction plantes-sol sont à l'ordre du jour pour leur potentielle capacité au rafraîchissement des villes, à l'absorption du CO<sub>2</sub> ou à la bio-remédiation des sols. Finalement, de même que pour l'océan, on connaît mal le « sol profond » et son interaction avec la couche supérieure, sujets importants pour les questions très actuelles de géothermie et de stockage dans le sol (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>).

En termes de pollution, ce sont les particules de taille inférieure au micron, jusqu'au nanomètre (aérosols carbonés, bio-aérosols, nanoparticules en milieu aquatique, sol, compost, eaux usées, milieux confinés), qui sont les moins connues et génèrent le plus de risques en termes de santé globale et de modification des écosystèmes. Notons que cette pollution peut avoir de grandes conséquences sur des temps courts, voir l'exemple de la résistance aux insecticides, et que la prise en compte de l'adaptation rapide des écosystèmes est centrale ici, comme dans toute question environnementale (ce qui ne simplifie pas la tâche du biologiste ni des physicien·ne·s).

Les questions émergentes dans ces domaines sont :

- 1) d'identifier les sources de pollution, qui peuvent être à des échelles locales ou globales ;
- 2) de caractériser la distribution chimique spatiale et temporelle de ces polluants, en tenant compte de leur potentielle transformation physique ou chimique dans l'environnement ;
- 3) de déterminer leurs zones d'accumulation et l'exposition des populations ;
- 4) de caractériser leur écotoxicité ;
- 5) de décontaminer, de trouver des substituts, et de mettre en place des marqueurs pour la santé des écosystèmes.

Cependant, il faudrait idéalement pouvoir modéliser le système complet de la pollution, qui est aussi un système économique, depuis la production de déchets jusqu'à leur fin de vie. Dans un tout autre champ, la pollution sonore dans les villes, mais aussi dans les océans, qui impacte le vivant, et la pollution lumineuse sont des questions évidemment en émergence.

Notre civilisation produit énormément de déchets et la question du recyclage concerne de nombreux matériaux : déchets électroniques, radioactifs, plastiques, métaux, matériaux de construction (bitumes, bétons...), intrants chimiques. Elle se pose différemment selon le type

de matériau, et nous n'avons pas eu l'occasion d'explorer l'ensemble des filières au cours de nos entretiens. De manière générale, il y a un besoin d'amélioration au niveau de la collecte et du tri, des procédés, de la sobriété (eau, énergie) et de l'impact environnemental. Pour toutes ces raisons, il faut mieux comprendre la physico-chimie hors d'équilibre couplée à l'hydrodynamique de mélanges de matériaux éventuellement réactifs, qui subissent à la fois changements de température et agitation.

On est loin à l'heure actuelle d'une économie circulaire, pour de multiples raisons sur lesquelles la physique peut avoir un impact. Par exemple, la perte de propriétés du matériau recyclé, qui mène à une utilisation dégradée (décyclage) non souhaitée, pose des questions physico-chimiques intéressantes en termes de lien structure-propriétés pour des mélanges ; il en est de même pour la question de l'harmonisation et de la simplification de la formulation des matériaux (plastiques par exemple) qui bénéficierait à être davantage vertueuse en termes d'empreinte environnementale. L'amélioration des méthodes de tri nécessite aussi une meilleure identification des matériaux. Par ailleurs, en ce qui concerne les polymères, des espoirs sont soulevés par le recyclage chimique ou enzymatique en termes de circularité, posant de nouvelles questions scientifiques, mais aussi environnementales.

L'économie des ressources passe par le respect de la hiérarchie des modes de traitement des déchets : donner la priorité à la prévention et à la réduction des déchets, développer le réemploi, la réutilisation/réparation puis inciter au recyclage. Il est donc intéressant de remettre la problématique du recyclage dans le contexte systémique plus général de production-usage-fin de vie des matériaux au lieu de considérer seulement la question du déchet une fois apparu. La demande sociétale est forte pour de la recherche regroupant sociologues, économistes et physicien·nes sur ce sujet.

## URBAIN

La population mondiale est vieillissante et en forte croissance, avec un exode rural marqué (2,5 milliards d'habitant·es en plus dans les villes entre 2018 et 2050), induisant une forte demande en construction neuve. En France, en revanche, avec la dynamique actuelle, 70 % des bâtiments présents en 2050 auront été construits avant 2012 (1<sup>re</sup> régulation thermique). Dans un contexte de recherche de neutralité carbone, sobriété et minimisation des impacts environnementaux, l'urbain se retrouve confronté au changement climatique (changement aussi du microclimat ressenti par l'habitant·e dans son quartier) et à une amplification des événements extrêmes (en intensité comme en fréquence, et pouvant se produire de manière concomitante). La R&D (0,1 % du chiffre d'affaires dans la construction et 0,01 % dans les travaux publics) est rarement abordée tout au long de la chaîne de valeur par les acteurs de la construction, car cette chaîne est très fractionnée, notamment légalement.

Du fait de la structure du patrimoine bâti en France, l'accent doit porter sur la rénovation (thermique notamment), mais la construction neuve reste importante. Il faut rendre l'acte de construire plus fiable; à savoir, permettre d'obtenir un résultat conforme aux attentes. Les approches de type économie circulaire, bien que confrontées à de nombreux freins, bénéficieraient à être systématisées.

À l'échelle urbaine se pose la question du bien-être des habitant·es, qui nécessite de s'intéresser à la climatologie urbaine (qu'il faut mesurer et modéliser) et à la pollution urbaine (qualité de l'air, sources d'aérosols primaires et secondaires), ces deux aspects étant en lien avec la santé publique et la sûreté des infrastructures. La climatologie urbaine est multi-échelle en espace (on est intéressé par le microclimat devant chez soi) comme en temps (évolutions sur 50 ans, climats moyens et climats extrêmes...). À l'échelle urbaine se pose également la question de la logistique urbaine en lien avec les flux et plus globalement la mobilité. La ville est synonyme d'énormes quantités de matières (structures en béton notamment) et de surfaces (surfaces des bâtiments, des routes): peut-on fonctionnaliser ces volumes (on parle déjà de bétons conducteurs pouvant stocker de l'énergie) et ces surfaces pour leur donner un rôle actif?

L'urbain impacte la nature, mais on s'intéresse de plus en plus à l'impact de la nature sur l'urbain: évolution des sols avec le changement climatique (la contraction des sols argileux endommage le bâti), le CO<sub>2</sub> atmosphérique carbonate les matériaux cimentaires (ce qui permet de capter ce CO<sub>2</sub>), la végétalisation impacte les performances thermiques des bâtiments. Les bâtiments sont constitués d'enveloppes et de parois, garants du confort intérieur, mais lieux d'échanges thermiques, hydriques... Ces parois sont complexes (multimatériaux, multi-échelles, un comportement au vieillissement mal compris à ce jour) et la maîtrise de leurs propriétés thermo-hydriques est primordiale pour assurer confort intérieur et sobriété énergétique.

Un enjeu important pour les bâtiments est la mesure de leur performance (énergétique, en termes d'émissions, de régulation d'humidité...) qui est un préalable nécessaire à toute rénovation. Cette question de la mesure est également pertinente pour le contrôle des ambiances intérieures.

Les matériaux sont à la base de toute construction. Grâce à l'apport de la science des matériaux, qui est passée de l'empirisme à l'IA et à la science de la donnée, on cherche à développer de nouveaux matériaux de construction (géo-sourcés, bio-sourcés, bétons bas carbone...) moins impactants environnementalement. Cependant, les matériaux ne peuvent être pensés pour eux-mêmes mais avec leur mise en œuvre et le système constructif dans lequel ils s'intègrent. Ainsi de nouveaux procédés de construction se développent, tels l'impression 3D (de matériaux cimentaires, à base de terre) qui amène des

problématiques rhéologiques complexes. On note également les difficultés techniques associées à la réutilisation des déchets (par exemple, le Grand Paris produira 400 Mt de déblais d'ici 2030) comme terre de construction. De même, le réemploi de systèmes constructifs, par opposition au recyclage, permet de garder la fonctionnalité du système initial.

Avec l'engouement pour les matériaux géo-sourcés (la terre) et bio-sourcés (le bois, les bétons à fibres ou granulats végétaux...) viennent de nouveaux enjeux. On notera la variabilité de ces matériaux (imposée par la volonté de circuits courts et d'adaptation aux ressources disponibles, ou par la présence de défauts structurels dans le bois) et les problèmes de durabilité (forte sensibilité à l'eau pour la terre, traitements physico-chimiques pour le bois). Pour les matériaux bio-sourcés, on notera la difficulté à garantir les performances sans répéter des campagnes expérimentales fastidieuses (pour chaque nouvelle essence d'un matériau bio-sourcé, il faut refaire les études). Pour la terre, caractériser les performances du matériau sur site est aussi un défi. Malgré l'intérêt pour ces matériaux, le béton gardera un rôle central dans l'urbain, car il est le seul pouvant être produit en quantités suffisantes pour répondre aux besoins de la construction. Ultra hiérarchisé, sa structure n'est pas encore comprise à toutes les échelles (du cm au nm). Pour diminuer son empreinte carbone, des efforts doivent être réalisés le long de la chaîne de valeur (nano-concevoir les hydrates, réduire les quantités de ciment dans le béton, optimiser l'usage pour des constructions robotiques...), même si nous disposons déjà aujourd'hui d'une diversité de ciments plus ou moins bas carbone.

La thématique de l'urbain peut aussi s'aborder avec les outils de la «physique urbaine». On peut voir la ville comme un système qui s'étale, avec sa texture, sa surface et ses assemblages urbains. La ville est aussi un générateur de données, dont la physique peut aider à raisonner l'acquisition et l'utilisation, en lien avec les jumeaux numériques. On peut voir la ville par le prisme de l'énergie (création, conversion, dissipation, bilan énergétique), comme un matériau poreux et un réseau de rues (pour y étudier le transport), comme un réseau d'infrastructures aériennes et souterraines, voire comme un réseau de réseaux (pour aborder les questions de stabilité et de redondance). La ville est en tout cas un objet fortement pluridisciplinaire, dont l'étude nécessite une interaction entre les sciences dures et d'autres disciplines, notamment les économistes, les géographes et sociologues ou les spécialistes du vivant (liens homme-nature). De toute évidence, elle nécessite également une interaction entre science et ingénierie. Les nouvelles réglementations, comme la réglementation environnementale RE2020 invitent à de telles interactions systématiques.

## ALIMENTATION

Depuis soixante-dix ans, la production agricole et alimentaire a considérablement augmenté sous l'effet conjugué

de la croissance démographique et économique et de l'évolution technique et culturelle des pratiques agricoles. Bien qu'il soit largement reconnu que les pratiques intensives développées ont permis d'éviter des pénuries alimentaires à grande échelle, elles sont aussi extrêmement critiquées pour avoir conduit à une perte sans précédent de la biodiversité, à la consommation non soutenable des ressources naturelles (sol et eau) et à une dépendance renforcée de l'agriculture aux ressources fossiles. Les impacts écologiques sont tels que, combinés au vieillissement de la population et à la diminution du nombre des agriculteurs, on constate une baisse de la production agricole dans certaines régions du monde et une augmentation de la prévalence de régimes pauvres en nutriments, représentant un danger pour la sécurité alimentaire et nutritionnelle mondiale. La malnutrition avec ses deux composantes que sont d'un côté l'épidémie d'obésité et de maladies chroniques associées et de l'autre la faim, conséquence de la sous-alimentation, ne cesse d'augmenter. À cela s'ajoute la compétition sur l'usage des terres pour produire de l'énergie décarbonée à partir de la biomasse agricole.

Les systèmes actuels sont donc non soutenables. De plus, ils manquent de résilience avec des risques de ruptures dans les approvisionnements alimentaires, comme l'ont montré les chocs récents qu'ont été la crise du Covid 19, la guerre en Ukraine et l'intensification des événements climatiques extrêmes. Ce tableau noir ne serait pas complet si l'on omettait de signaler que les pertes et les gaspillages de la production à la consommation en passant par la transformation et la conservation sont de l'ordre de 30%. Par conséquent, les défis à relever sont de développer des systèmes alimentaires sains, durables et accessibles à tous alors que le changement climatique va intensifier les risques et que dans le même temps la population continue de croître, de s'urbaniser et de vieillir. Dans ce contexte, comment faire pour que les transitions nécessaires à mettre en œuvre favorisent et sélectionnent des systèmes alimentaires sains et durables ?

Il y a un consensus autour de la nécessité :

- 1) de changer les régimes (diversification des protéines, notamment végétales) et les comportements alimentaires ;
- 2) de changer nos modes de production et de transformation ;
- 3) d'agir sur la gouvernance des systèmes alimentaires.

Les consommateurs et consommatrices sont aussi partie prenante, promouvant de nouveaux comportements alimentaires et demandant toujours plus de spécificités aux produits commerciaux. Les verrous à lever sont autour de la conception raisonnée des aliments. Un premier volet porte sur les relations structure-fonctionnalité des aliments : importance des organisations supra-moléculaires et des propriétés interfaciales, origines microscopiques des propriétés rhéologiques et sensorielles, requérant des approches multi-échelles en milieux complexes. Un second volet doit couvrir les procédés de transfor-

mation afin de maîtriser les structures physiques à différentes échelles et la réactivité chimique tout en étant moins consommateurs d'eau et d'énergie. Cela ne pourra se faire sans une compréhension fine *operando* des phénomènes physiques, chimiques et biologiques qui se produisent au cours des différentes opérations unitaires. Enfin, un dernier volet devra porter sur les interactions aliments - humain avec une meilleure connaissance des mécanismes de déstructuration des aliments dans le tractus digestif, afin d'améliorer leur reformulation pour une meilleure biodisponibilité.

Dans une vision plus systémique, il est nécessaire de favoriser une utilisation plus optimale des matières premières afin d'éviter les pertes, d'utiliser les co-produits, de recycler les effluents et les déchets, et d'organiser les usages en cascade entre production d'aliments, de matériaux (emballages, matériaux pour le bâtiment, tissus techniques) de molécules (peintures, adhésifs, produits pharmaceutiques et cosmétiques...) et d'énergie. Enfin la santé de l'homme est indissociable de celle des animaux et des écosystèmes (santé globale). Des verrous majeurs ont été identifiés autour des mesures et de la modélisation des systèmes adaptatifs complexes présents dans les écosystèmes tels que dynamiques de propagation des maladies et de leur transmission à l'homme, dynamiques de coévolution micro-organismes/organismes (par exemple, hôte-parasite), réponse du vivant au stress environnemental et changement climatique (énergétique du vivant, migrations), interactions biodiversité-écosystème-humain, remédiation frugale pour une santé globale (innovations technologiques, réduction intrants, phyto-remédiation).

## **DU SYSTÈME MODÈLE AU SYSTÈME RÉEL COMPLEXE : QUELLE PHYSIQUE ?**

Que ce soit sur les sujets urbains, d'environnement ou d'alimentation, des thèmes transversaux, similaires en termes de physique, sont apparus et nous les avons organisés dans la suite selon trois grands champs volontairement assez larges. Les questions de physique posées peuvent parfois paraître classiques, mais c'est l'application de cette physique à des systèmes réels en évolution qui poussera les physicien·nes dans leurs retranchements.

### **TRANSPORT, DYNAMIQUE, TRANSFERTS ET ÉCOULEMENTS EN MILIEUX COMPLEXES, DÉSORDONNÉS, HÉTÉROGÈNES, MULTIPHASIQUES**

Le premier axe transverse qui se dégage fortement est lié à des questions émergentes sur les transports et écoulements dans des milieux complexes, en considérant des cas réalistes : structures hétérogènes du milieu, présence de défauts, d'interfaces entre des milieux différents, de parois et de bords. De plus, ces milieux ne sont généralement pas à l'équilibre, ils évoluent dans le temps et leurs propriétés sont couplées aux flux de matière, de chaleur, etc., les traversant.

## Environnement

En termes d'environnement, beaucoup de ces questions sont liées aux sols. Le sol est effectivement un milieu complexe, multicouche, poreux et le siège de phénomènes de transport de fluide et de chaleur. Qui plus est, c'est un milieu en constante réorganisation physique, à cause de la présence de micro-organismes, de vers et autres petits animaux et du réseau racinaire des végétaux. Ceux-ci induisent des réactions chimiques et le transport de molécules organiques simples ou plus complexes que sont les enzymes et les nutriments. En matière de physique, il s'agit d'abord de mieux comprendre le transport de l'eau dans ces milieux poreux plus ou moins saturés, et au-delà, l'étude du transport réactif dans les sols devra se développer, pour prendre en compte réactions chimiques, effets biotiques et potentiels changements de phase associés aux flux. La recherche se tourne aussi vers le couplage entre les eaux de surface et la nappe souterraine et l'influence des structures géologiques, en lien avec les problématiques d'inondation et de manque d'eau. À une échelle plus fine, il est important de comprendre comment ces flux sont pilotés par les dynamiques hors d'équilibre aux interfaces roche/eau/air. Un autre axe émergent consiste à déterminer les propriétés effectives d'un sol ou d'une couche rocheuse, par exemple la perméabilité, uniquement à partir d'images 3D (*digital rock physics*). Le transport de l'eau est aussi lié à des questions de séchage ou d'imbibition en milieu granulaire, ce qui se relie à la problématique du gonflement des argiles et de la rétention d'eau, qui seront des questions importantes dans les années à venir.

Une autre grande problématique est l'appauvrissement des sols, qui menace tout l'équilibre de la santé globale. Comprendre l'ensemble des mécanismes biotiques et abiotiques à l'œuvre dans un sol permettra d'améliorer les techniques de remédiation des sols qui ont besoin d'approches innovantes. L'idée de « bio-augmentation » i.e. de promouvoir le microbiome pour une optimisation des fonctionnalités physiques du sol (propriétés mécaniques, flux, capacité de rétention) en est à ses débuts. Pour le transport de l'eau, l'idée est ainsi de le contrôler en modulant les propriétés du sol (plus hydrophile, plus sec, plus poreux...). De même, l'utilisation de plantes pour nettoyer les sols pollués par extraction minière (éco-catalyse) se développe et pourra bénéficier d'une meilleure compréhension des échanges entre le sol et les racines.

Dans d'autres domaines pratiques liés à l'environnement, on retrouve ces questions d'écoulement et de flux en milieu hétérogène. Par exemple, il existe des problématiques d'hydrodynamique des boues d'épuration et du couplage avec l'évolution de leur population bactérienne, ce qui joue un rôle sur l'amélioration des stations d'épuration et du traitement de la pollution des sols. De même, pour le traitement des déchets, une question ouverte est la prise en compte des hétérogénéités du mélange dans les réacteurs pour méthanisation. Dans le domaine du recyclage mécanique, et le traitement des déchets en général, se posent de nombreuses questions de transfert de chaleur

et d'écoulement en milieu complexe, dont la compréhension permettrait d'améliorer les procédés actuels.

On retrouve aussi ces questions de transport dans l'étude des océans. Fondamentalement, les objectifs sont de comprendre comment l'océan absorbe et transporte la chaleur, comment cela met le fluide en mouvement, et quels sont les cycles et flux de matière dans l'océan (incluant ce qui transite par le vivant, par exemple, le transport vertical de micro-organismes dans la colonne d'eau). Par ailleurs, on sait aussi que les sols, l'océan ou encore les plantes sont des puits de carbone et là encore des questions sur la dynamique du transport sont à résoudre.

Dans le futur, l'étude des écoulements sur les lits et bordures des rivières va aussi se développer ; on cherche à comprendre comment l'érosion locale, les éboulements et la dynamique de gros objets emportés peuvent avoir un impact sur le flux de la rivière et sur son possible débordement. Dans la même logique, un axe émergent aujourd'hui est aussi l'étude de la zone littorale et de l'érosion du trait de côte par la mer, notamment pour mieux comprendre l'impact d'événements extrêmes sur ces frontières naturelles, pour proposer des solutions à la montée du niveau de la mer dans un cadre plus général sur les interactions ville - mer. Cela rejoint aussi des questions toujours ouvertes sur les éboulements et glissements de terrains. En parallèle du transport d'un milieu à un autre, le frottement à une interface est aussi un domaine de recherche à promouvoir. Cette physique du frottement (tribologie) se développera autour de questions sur les contacts électriques rapides (routes électriques, avec caténaires), l'usure des pneus sur la route, le contact roue-rail, particulièrement critique pour gérer la production de résidus et particules et pour éviter des pollutions de l'air.

## Urbain

Dans un bâtiment, les parois, murs et séparations se caractérisent par leur aspect multi-matériaux, multi-échelle, présentant des discontinuités et un comportement vieillissant. Un défi actuel est de comprendre les dynamiques de transport dans ces milieux poreux multicouches, d'autant plus complexes que certains matériaux (biosourcés, géosourcés) présentent une forte variabilité. Il s'agit ici principalement d'échanges thermiques ou hygro-thermiques que l'on cherche à maîtriser pour assurer le confort hiver comme été (notamment en périodes de canicule) en minimisant les impacts environnementaux. La porosité multi-échelle des matériaux de l'urbain contrôle leur échange hydrique et globalement leurs propriétés thermiques, (poro -) mécaniques et de vieillissement impactant directement la durabilité des ouvrages.

Toujours pour atteindre cet objectif de confort sobre, pour les rénovations comme pour les bâtiments neufs, on devra aussi repenser et piloter au mieux les flux d'eau et d'air, par exemple par ventilation passive. Sur ce sujet comme sur d'autres, les approches basées sur le biomi-



métisme (par exemple les termitières pour une ventilation passive dans les bâtiments) sont à l'étude.

À l'échelle du bâtiment se pose la question de la mesure de l'ensemble des échanges avec l'extérieur, des impacts environnementaux (émissions) du bâtiment, de sa performance, tout au long de son cycle de vie. On pense ainsi aux échanges (de fluide ou de chaleur) entre le bâtiment et son sol (géothermie appliquée aux bâtiments). D'autres défis sont de récupérer la chaleur émise par les bâtiments. Peut-on produire de l'électricité à partir du rayonnement infrarouge du bâtiment? Les questions de rayonnement se posent aussi pour les arbres: comprendre comment ils rayonnent est nécessaire pour bien évaluer l'effet des arbres sur la température et l'atmosphère urbaines.

La pollution de l'air, notamment en milieu urbain, est aussi un sujet de recherche qui implique de nombreuses questions de flux et de transport dans des milieux complexes: on a besoin de mieux comprendre les flux dans des milieux confinés comme les réseaux de métro. Un autre défi actuel est de déterminer la réelle portée des aérosols dans les écoulements d'air et leur transport en milieu urbain (aéro-contamination). La ville est aussi le lieu de pollutions sonores et lumineuses contribuant à détériorer l'ambiance urbaine. Il s'agit d'un problème de propagation d'ondes en milieu urbain qui relève clairement d'une approche physique, en lien également avec des questions de transfert, d'écoulement de l'air, et de matériaux dont est faite la ville.

Enfin, le thème des flux et écoulements en milieu complexe, appliqué à la ville, inclut également des questions de déplacement de personnes et de véhicules. Répondre aux défis posés implique des approches physiques pouvant notamment s'appuyer sur une analogie avec les écoulements en milieux poreux ou avec les colloïdes actifs. Toujours dans cette approche par analogie, des recherches se développent sur la ville comme un ensemble d'interfaces, avec des notions d'auto-assemblage, de structuration à différentes échelles démontrant la pertinence d'analyser la ville avec des lois physiques.

### **Alimentation**

Les questions de transports, de matière, d'eau, de gaz et de leur dynamique à différentes échelles (nutriments, macromolécules, contaminants, micro-organismes...) traversent le domaine de l'alimentation depuis l'agriculture jusqu'aux produits consommés. Ainsi la pollution des sols impacte directement les aliments que nous mangeons (qui sont d'ailleurs aussi contaminés par voie aérienne), et comprendre le transport des polluants et leur transfert dans le végétal est une question qui prend de plus en plus d'importance.

De même, la production de produits déshydratés contenant un minimum d'eau est un axe de recherche nécessitant une compréhension fine de la physique du séchage et de la lyophilisation ainsi que des mécanismes du transport de l'eau pour leur réhydratation (cas des poudres en particulier).

On retrouve aussi des questions de transfert de gaz en lien avec les emballages alimentaires, dont on cherche à ajuster la perméabilité, et à comprendre le rôle des charges nanométriques incorporées. Le transport de matière dans les installations industrielles alimentaires pose aussi des questions de physique aux interfaces dans le cas d'encrassement, de colmatage de filtres, avec le besoin de trouver des processus physiques permettant d'agir *in situ*. La présence de surfaces solides dans ces installations implique aussi des problématiques d'adsorption (de microorganismes, de bactéries...), possiblement contrôlables par une texturation originale des surfaces. Pour ces micro-organismes en interaction avec des substrats, produisant des biofilms, on retrouve aussi des questions de transport et de dynamique hors équilibre: quelle croissance et motilité de bactéries en présence de flux externes, quels mécanismes de diffusion d'enzymes dans un biofilm? Similairement se posent des questions sur la motilité de bactéries dans des biofluides (digestifs notamment) et sur les mécanismes de rétroaction sur la rhéologie de ces biofluides. Ces systèmes hors équilibre et désordonnés sont fortement pilotés par la présence d'interfaces entre différents fluides et par les échanges que cela entraîne. Parmi les questions émergentes, on retrouve celles liées à l'encapsulation (simple ou multiple) et le relargage (spontané ou déclenché). Il s'agit aussi de développer de nouvelles matrices alimentaires, aux propriétés adaptées pour des consommations spécialisées (seniors, aliments pour conditions extrêmes), tout en ayant la meilleure biodisponibilité, ce qui requiert une connaissance des structures et de leur cohésion.

### **PHYSIQUE MULTI-ÉCHELLE TEMPORELLE ET SPATIALE: COUPLAGES, INTERACTIONS, RÉSEAUX ET TRANSITIONS**

Les systèmes réels sont généralement hiérarchisés en taille et mettent en œuvre des phénomènes à des échelles de temps variables. Cela impose des approches multi-échelles pour déterminer les liens entre propriétés microscopiques et macroscopiques. Les défis sont alors liés à la compréhension des couplages et boucles de rétroaction existants entre chaque échelle de taille et de temps. De plus, il reste des tailles et temps caractéristiques qui n'ont pas été explorés et qui sont des chaînons manquants pour construire une vision globale. Cette approche multi-échelles et ces couplages renvoient vers les problématiques de réseaux complexes, très présentes dans nos thématiques. Enfin, nous y associons aussi les problématiques de transition de phase, de stabilité/instabilité; des concepts génériques en physique qui sont ici reliés à ces organisations multi-échelles spatiales et temporelles.

### **Environnement**

Dans les sols et couches rocheuses, une question récurrente également de type multi-échelles est de comprendre les propriétés macroscopiques à partir des interactions à l'échelle des grains. À l'heure actuelle, passer de l'échelle du pore et d'une description discrète aux pro-

priétés du continuum macroscopique reste complexe. En termes temporels, l'objectif est de comprendre certaines transformations du sol à l'échelle du jour ou de l'année, à partir de flux qui ont lieu à l'échelle de la seconde. Les échelles spatiales du kilomètre à la centaine de kilomètres (sols dits « profonds ») sont encore peu étudiées. Cela rejoint des problématiques émergentes sur les couplages entre thermique et hydrodynamique dans les eaux et lacs souterrains, impliquant des gammes de paramètres peu usuelles. Dans les sols, un couplage à mieux comprendre est aussi celui entre diffusion et dégradation, notamment pour connaître le devenir des polluants. De même, un autre aspect multi-échelle (spatial et temporel) est celui qui relie les interactions sol-racines à la stabilité mécanique des arbres et leur résistance au vent, pour aller jusqu'à une compréhension de la dynamique des forêts, en lien aussi avec les questions de stockage du carbone. À ce propos, mesurer *in situ* des pressions et flux d'eau dans un arbre sur pied reste aujourd'hui un vrai défi technique.

En ce qui concerne les océans, les comportements à grande échelle sont mesurés et étudiés par les océanographes et on connaît aussi le monde du vivant à des échelles microscopiques. À ce stade, l'échelle de la « sous-maille », du mètre à la centaine de mètres, reste méconnue, notamment en raison de limitations d'instrumentation. À ces échelles, des couplages structure-écoulement seront à étudier ; par exemple l'équilibre dynamique entre auto-assemblage et fragmentation qui produit des radeaux d'algues et de plastiques à la surface de l'eau. Toujours sur des couplages et rétroactions, en termes de traitement des déchets, un axe de recherche vise à mieux comprendre comment optimiser les effluents de station d'épuration et les débits variables des rivières attenantes.

Quant aux transitions de phase, la physique du gel, pour des systèmes multiphasiques ou pour des cas pratiques comme des plantes/branches reste encore à comprendre ; de même, celles de l'aérosolisation ou de la dissolution de plastiques semi-cristallins, en lien avec la pollution. Des pistes originales proposent d'ailleurs d'appréhender ces processus de recyclage sous l'angle de la thermodynamique (entropie de mélange ou de séparation). Enfin, les nuages sont aussi une piste de recherche : on y retrouve des questions de transitions de phase, nucléation, croissance, contamination... plus ou moins spontanée ou induite (pour déclencher une pluie à volonté). Plus émergente est la problématique de la microbiologie des nuages, sachant que de nombreuses bactéries y sont présentes et sont ainsi transportées sur de longues distances.

### Urbain

Dans le monde des bâtiments et la construction, une réflexion multi-échelle, allant du matériau jusqu'au quartier d'habitation, est aujourd'hui de plus en plus prônée. Cette réflexion est cohérente avec une vision systémique le long de la chaîne de valeur de la construction. En termes de couplage physique et pour lutter contre les pollutions,

l'objectif est de comprendre le transport des polluants et de la chaleur dans le milieu urbain ; en particulier, l'échelle de la rue semble aujourd'hui particulièrement importante à étudier, en 3 dimensions. Un objectif est de comprendre et minimiser les îlots de chaleur urbains. On évoque ainsi les notions de micro-météo ou de climatologie urbaine prenant en compte la topologie locale, les géométries dites de canyon, les turbulences dues aux bâtiments... Ces phénomènes sont complexifiés par la végétalisation des villes, qui nécessite de tenir compte des couplages entre cette micro-météo, la température des sols, l'albédo et l'évapotranspiration des végétaux.

La ville représente aussi une concentration de réseaux (énergie, transport, logistique) fortement couplés les uns aux autres. Une question émergente est de comprendre les réponses de ces réseaux couplés en cas de fortes perturbations ou d'événements rares. Parmi les questions entièrement ouvertes, on retrouve celle de la redondance versus l'optimisation, de la mesure de l'efficacité de réseaux « adaptables » vs « adaptés » ; des problématiques liées à la notion de résilience, au sens du retour à l'état d'équilibre d'un système après un choc (le vivant, redondant, est plus résilient que les systèmes optimisés comme les chaînes de production alimentaires ou d'approvisionnement des villes).

### Alimentation

Une structuration multi-échelle se retrouve aussi généralement dans les produits alimentaires. Aujourd'hui, dans ce contexte de transitions alimentaires et d'émergence de nouveaux comportements alimentaires, des problématiques se posent par rapport aux nouveaux ingrédients (bio-sourcés, protéines d'origine végétale...), sur les liens entre structure moléculaire, assemblage supramoléculaire et fonctionnalités macroscopiques. Face à ces nouveaux ingrédients, il s'agit ici de revisiter des problématiques de stabilité à l'échelle colloïdale (micellisation, coacervation, agrégation), de solubilisation de protéines, de cinétiques de dissolution et de séparation de phases, tout en identifiant comment ces processus modifient la rhéologie macroscopique. La réponse des aliments face à des contraintes mécaniques est aujourd'hui aussi un sujet de recherche actif : on cherche à comprendre la déconstruction d'assemblages complexes lors de la mastication et de la déglutition (*oral processing*) et comment cela se relie à des notions sensorielles de texture. En parallèle, pour des raisons de santé, l'objectif est aussi de diminuer les quantités de sel, de sucre, de nitrites et autres stabilisants dans les aliments, ce qui se traduit par de vrais défis tant industriels que scientifiques en termes de stabilisation aux échelles supramoléculaires, si l'on veut garder les mêmes durées de vie des produits commerciaux. Toujours liées à la durée de vie, il existe aussi des questions importantes sur la physique de la congélation/décongélation des aliments.

Dans un cadre plus large, au niveau du monde vivant et de la santé globale, il existe aussi des problématiques nouvelles autour du multi-échelle, des couplages et des

réseaux, par exemple sur la dynamique complexe de réseau dans le cas de couplage plante/animal/climat, encore peu étudié par les physicien·nes. Le réseau hydraulique de l'arbre est aussi un sujet de recherche. Là aussi, on retrouve des questions de redondance, d'efficacité, de réponse à des contraintes extérieures (hydrique, thermique, mécanique) et de résilience. Les réseaux de mycorhizes sont aussi étudiés comme systèmes modèles, pouvant faire émerger des solutions bio-inspirées. Enfin, dans une démarche d'élargissement de la gamme des échelles de taille, il existe aujourd'hui des démarches innovantes visant, d'une part, à réfléchir sur une thermodynamique de la microbiologie (par l'identification de variables d'état, de relation d'état...) et d'autre part, sur une thermodynamique des organismes vivants de grande taille, pour par exemple connaître le « budget » thermique d'un animal et l'impact des changements climatiques sur son comportement. Aux échelles microscopiques des micro-organismes marins se pose aussi la question des écoulements pertinents à leur échelle avec la notion de micro-turbulence.

## INSTRUMENTATION, DONNÉES, MODÈLES

Les prospectives en instrumentation sont d'abord fortement liées à une demande de capteurs, notamment de capteurs à bas coûts (*low-tech*), miniaturisés, dispersés en grand nombre et permettant des mesures en temps réel sur des temps longs. L'idée est de collecter plus de données, même si celles-ci sont potentiellement moins précises. Cette démarche pose aussi des questions de technologie de batteries et de suivi *in situ* ainsi que de matériaux pour les construire. En parallèle de l'expérimentation, les thématiques de notre atelier appellent à un effort croissant en modélisation et simulations numériques. Les simulations numériques, tout comme les capteurs, produisent de grandes quantités de données; la gestion, l'analyse de ces données, la validation des modèles sont autant de questions qui seront à prendre en compte. Inversement, les chercheurs font aussi part de problèmes d'accès à des données existantes, accès qui pourraient les aider à mieux modéliser, tandis que se posent des questions sur l'émergence de l'IA et des jeux numériques.

### Environnement

La demande de capteurs miniaturisés, compacts, à longue durée de vie, sans pièces mécaniques, non polluants et dont le signal serait idéalement détectable *in situ*, est très présente en lien avec l'étude des océans. L'idée est de faire porter ces capteurs par des poissons, des oiseaux, des bateaux ou des déchets flottants, dans un contexte encore très exploratoire. Dans un autre domaine, pour la gestion des déchets, il est aussi proposé de mettre des capteurs dans nos poubelles pour en suivre toute l'évolution le long des chaînes de transformation.

Par rapport à la pollution de l'air, la conception et l'utilisation de constellation de nano-satellites est une solution émergente, permettant de suivre la qualité de l'air depuis

l'espace avec le besoin d'une analyse plus locale et plus résolue en temps (en complément des lidars). Cela s'appuiera aussi sur une utilisation nouvelle des nanotechnologies (nano photonique) dans les spectromètres imageurs.

Un autre aspect nécessitant de nouvelles approches en instrumentation est le suivi non intrusif d'infrastructures du bâtiment (pile de pont, centrale nucléaire...). Il existe aujourd'hui de vrais défis pour des instruments simples et portatifs permettant des mesures locales. De même, les pertes d'eau par fuite dans les canalisations sont typiquement de l'ordre de 30% et, là aussi, capteurs et instrumentation originales ont besoin d'être développés. En écologie, les modélisations numériques sont un outil déjà très utilisé; aujourd'hui, face aux défis climatiques, leur rôle peut devenir central. Toutefois, les chercheurs impliqués mettent en avant le besoin de plus de compréhension physique, à la fois pour valider les données d'entrée, les équations utilisées et les résultats obtenus aux différentes étapes de calcul. L'objectif de diminuer les erreurs/incertitudes des modèles est rendu plus difficile par la présence plus fréquente de régimes extrêmes s'accompagnant de données également moins précises (par exemple seulement des « trajectoires » d'émission de CO<sub>2</sub>). Il apparaît aussi nécessaire d'organiser la mise en commun des modèles dans le cadre d'une dynamique collective internationale (type GIEC pour le climat). Enfin, une approche de physique semble indispensable pour calculer la vraie empreinte carbone d'un objet, d'un aliment ou d'un procédé et ainsi produire des comparatifs raisonnés.

### Urbain

Les thématiques de la ville et du bâtiment requièrent aussi une utilisation plus grande de capteurs avec également une contrainte de sobriété numérique relative à l'acquisition et au stockage des données; là aussi, en temps réel, à bas coûts et miniaturisés. Ce qui est plus spécifique au fonctionnement de la ville est l'idée de capteurs sur les personnes, pouvant se servir de leurs déplacements pour acquérir des données sur les conditions locales de la ville (pollution, température...), potentiellement sur des temps longs (utile pour un suivi sanitaire). Cette approche présente bien sûr des limites, notamment liées au fait que les personnes savent qu'elles participent à prendre des mesures. Il est par ailleurs possible de développer d'autres capteurs servant à objectiver le jugement humain, comme cela se fait pour le goût de l'eau ou des tests de confort. Encore d'autres capteurs sont en développement pour permettre aux personnes seniors de rester aussi longtemps que possible à leur domicile, en se basant sur des données objectives (sur l'activité physique, la consommation de nourriture, le sommeil, etc.).

Pour mieux connaître les pollutions, il est aussi important de caractériser plus finement les nouveaux polluants, notamment les aérosols et nano-particules; il s'agit ici de mesurer autant la taille que la forme et la nature de ces aérosols et nanoparticules, ce qui nécessite des travaux d'instrumentation. L'interaction avec des médecins semble importante pour déterminer quels paramètres



sont pertinents pour la nocivité, en ce qui concerne ces particules dites ultrafines. En termes de simulations numériques, la ville est l'objet d'une utilisation croissante de modélisations par des jumeaux numériques. Il semble là encore très important de ne pas négliger la compréhension des mécanismes en incluant dans ces recherches la contribution de physicien·nes et des méthodes de la physique pour simplifier et ne retenir que les paramètres pertinents pour des modèles efficaces, prédictifs et numériquement sobres.

### Alimentation

Dans cette thématique, le besoin en capteurs est fortement relié à l'idée d'avoir des outils utilisables sur place : il s'agit de pouvoir mesurer en direct dans un champ, dans une exploitation agricole... pour tous les aspects alimentation et santé des animaux, mais aussi d'avoir des capteurs « en ligne » dans les chaînes de production pour un suivi des produits *in situ*. Dans le même esprit, mesurer la qualité des réserves d'eau douce devra aussi pouvoir se faire avec des techniques innovantes, portatives et frugales, pour détecter les éventuels contaminants. L'innovation en instrumentation repose aussi sur des techniques qui vont permettre de sonder la structure des aliments (par exemple, IRM), et permettre l'analyse de leur composition (là encore pour détecter des polluants ou additifs).

Pour le vivant et à des échelles microscopiques, les techniques de microscopie permettent de voir les cellules individuelles. Mais il serait utile de développer dans le futur des techniques de mesures simultanées des champs de concentration d'espèces chimiques, avec pour objectif de comprendre la communication chimique entre cellules et d'en suivre la dynamique. Les procédés alimentaires peuvent aussi bénéficier de simulations numériques, par exemple pour aider à comprendre les couplages et transferts thermiques dans les échangeurs, en prenant en compte l'effet de parois, du confinement, des gradients de concentration et de température, de sorte à déterminer leur influence sur la rhéologie locale, et finalement de développer des procédés éco-conçus.

## CONCLUSIONS

### LA PHYSIQUE A TOUTE SA PLACE...

Lors de nos entretiens avec des expert·es, nous avons clairement identifié que la physique, par ce qu'elle apporte de spécifique, peut jouer un rôle important dans les problématiques de l'alimentation, l'environnement et l'urbain. Par exemple : identifier les questions sous-jacentes au problème et les poser en termes de physique, déterminer les mécanismes clés et hiérarchiser les paramètres pertinents, apporter une réflexion *a priori* en termes d'ordres de grandeur, de lois d'échelle, de dimensionnement, apporte une réelle plus-value dans ces recherches. La physique peut aussi permettre de développer de nouvelles méthodes d'analyse de données, d'apporter une capacité prédictive et d'universalité via la modélisation et de donner du sens aux variables pour une compréhension des phénomènes.

Au cours des entretiens avec des expert·es aux spécialités variées, il est apparu qu'intégrer cette démarche dans leurs projets leur semblait très pertinent.

### ... MAIS DANS L'INTERDISCIPLINARITÉ

Toutefois, il est évident que l'approche du physicien·ne ne résoudra pas seule ces questions et la recherche conjointe avec d'autres disciplines est primordiale pour s'attaquer aux urgences liées aux thématiques de cet atelier. Notons d'abord que cette ouverture peut déjà s'amplifier à l'intérieur même du champ de la physique, dans une démarche dite « multi-physique » mêlant les différentes spécialités en physique (hydrodynamique, thermique, mécanique, acoustique, etc.). À l'interface avec d'autres disciplines, le besoin de physique pour optimiser les campagnes de mesures, identifier les mécanismes pertinents, se fait notamment sentir dans les champs de la biologie et de l'océanographie. L'interface physique-médecine présente aussi des opportunités intéressantes (instrumentations communes, analogies possibles, par exemple cerveau et milieu poreux). De même, la science de la durabilité semble être aujourd'hui largement portée par l'écologie, et plus de physicien·nes pourraient y participer. Les liens avec les sciences humaines et sociales restent complexes, en raison d'écartés culturels forts, quoiqu'il nous ait été clairement rapporté que ces aspects sont cruciaux pour que les innovations puissent aboutir et exprimer tout leur potentiel. Ici, la physique pourrait notamment aider en clarifiant des métriques communes, ou en co-développant des approches orientées « objet » (par exemple, la rue comme objet d'étude). Une démarche combinant sciences sociales avec physique, informatique et mathématique pourrait aussi se développer, par exemple dans le cadre de la ville avec des *urban science institutes*, ce qui permettrait de prendre en compte l'aspect systémique des problèmes qui s'y posent. Les freins et limites intrinsèques à l'interdisciplinarité sont connus, et pour les dépasser, il faut probablement tirer des enseignements de laboratoires existants dont les cultures interdisciplinaires se sont construites au fil du temps. Un laps de temps de plusieurs années semble nécessaire pour une appropriation par chacune des disciplines des questions pertinentes et des méthodologies de l'autre champ disciplinaire, et la présence de chercheur·ses ayant pour rôles de passer et traduire, pour expliciter les enjeux et concepts de chaque discipline, est aussi cruciale.

### VERS UNE PHYSIQUE DES PROCÉDÉS ?

Notre atelier a aussi mis en avant le rôle important des procédés. Il semble pertinent de pousser cette interface entre physique et ingénierie sur la science des procédés, ainsi qu'en science des matériaux, en intégrant des approches permettant de caractériser les processus physiques, mécaniques et chimiques (lien structure-propriétés).

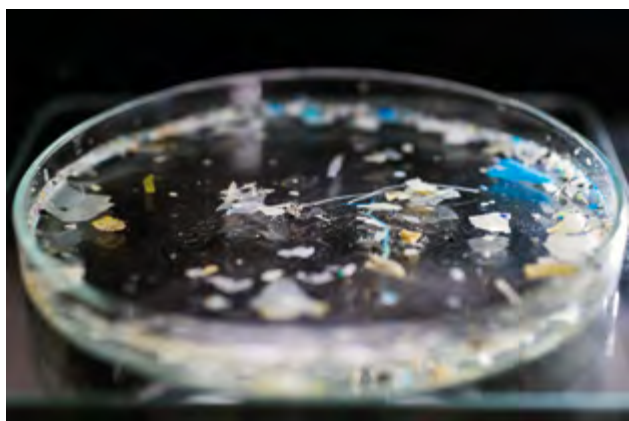
Les procédés suivants nous ont été mentionnés comme ayant des besoins d'optimisation (pour réduire l'énergie

consommée), de compréhension avancée et d'innovation : extraction (métaux lourds), micro-méthanisation en ville, broyage mécanique et micronisation (recyclage du béton), phyto-remédiation, pyrolyse, décontamination, séparation des métaux et déchets, extrusion, désalinisation, filtration, impression 3D (pour les matériaux de construction), échangeurs thermiques, et autres procédés bio-électrochimiques (piles microbiennes), avec comme objectifs essentiels d'économiser l'eau, la matière première et les intrants, tout en maintenant les rendements et les propriétés en sortie. La physique, par la compréhension des mécanismes sous-jacents, pourra aussi aider à résoudre les questions liées aux changements d'échelle (*scale-up* et *scale-down*), inhérentes à l'optimisation des procédés.

## DATA ET MODÉLISATION

Sans répéter ce qui a déjà été écrit, nous souhaitons revenir ici sur quelques messages entendus lors de nos entretiens : il y a à la fois une demande de plus de capteurs, mais en même temps une crainte d'un excès de données générées, qui ne seraient pas forcément nécessaires, voire impossibles à traiter, et dont l'empreinte environnementale et énergétique pourrait être conséquente. Nous pensons que la physique doit permettre de rationaliser l'utilisation des données massives, et de promouvoir une sobriété des données et un usage raisonné de ces données. Il semble aussi que dans ce cadre, comme l'a notamment illustré la crise covid, il soit utile de former des spécialistes en statistique qui viendront en support des équipes de recherche. En pratique, il sera aussi important dans le futur de résoudre des problèmes d'interopérabilité de banques de données, de manière à pouvoir croiser des données socio-économiques, biologiques, médicales et physiques.

Il en va de même pour l'utilisation grandissante de jeux numériques, notamment dans la gestion de la ville et de l'utilisation de l'IA. Là encore, intégrer une approche physique doit permettre de valider, de mieux comprendre et de donner un sens physique aux résultats de simulations, ce qui sera crucial pour obtenir des prédictions plus pertinentes et une meilleure adaptation aux événements extrêmes par leur ampleur ou leur fréquence.



## ALIMENTATION, ENVIRONNEMENT, URBAIN : DES EXEMPLES CONCRETS DE SYSTÈMES COMPLEXES DE GRANDE TAILLE INCLUANT UNE DIMENSION SOCIÉTALE

Nos entretiens ont aussi mis en avant un besoin de développer une vision systémique, prenant en compte toute une filière, en interdépendance ; par exemple, des matériaux du bâtiment au quartier (de part et d'autre du logement individuel), des déchets quotidiens au cours d'eau (de part et d'autre de l'usine de traitement des déchets), etc. De même, les concepts de redondance ou d'optimisation de réseaux, de robustesse et de résilience seront probablement de plus en plus prégnants dans les années à venir. Dans cette logique, les physicien·nes des réseaux peuvent jouer un rôle important. Ces systèmes réels impliquent aussi le facteur humain et économique, ce qui ajoute de la complexité et impose de trouver des compromis. Par exemple, le comportement des personnes joue un rôle central dans la propagation d'épidémies, ce qui pousse la modélisation dans ses retranchements, notamment en faisant émerger de nouveaux types de modèles dits à agents uniques, capables de prendre en compte des comportements plus spécifiques et réalistes.

## DÉCISION ET SOCIÉTÉ

Dans une société où l'aide à la décision pour les choix politiques et des consommateur·ices devient de plus en plus présente, les physicien·nes doivent prendre leur place parmi les économistes, les géographes, les sociologues dans les comités scientifiques consultés par des décideur·euses, afin que la vision des différents champs homme-matière-vivant soit complète. Ceci implique d'aller vers une physique des « écosystèmes mélangés » humain-nature. Par exemple, les GREC (Groupements Régionaux d'Experts sur le Climat) mêlent scientifiques et décideur·euses dans le but de partager la connaissance scientifique. La bonne échelle de ces groupes de travail est à déterminer, par exemple, celle de la ville car suffisamment concrète. Une autre approche est celle des *living lab* (pour mesurer « grandeur nature ») ou encore de la science participative, qui implique les citoyen·nes : l'identification de la position et taille de déchets via une application, ou des habitant·es finançant des thèses sur la pollution locale en sont des exemples.

Le mot de la fin de cet atelier est peut-être que la physique peut et doit montrer son efficacité et le rôle important qu'elle a à jouer dans la résolution des grands problèmes de société qui sont devant nous. En valorisant les produits de ses recherches, en donnant du sens à la science et en resserrant ses liens avec la société, elle ne peut que favoriser l'arrivée de jeunes chercheur·es vers sa discipline.

Morceaux de plastique isolés d'un échantillon d'eau de mer prélevé en Méditerranée.

© Cyril FRESILLON / OOV / LOV / CNRS Images