

Physique des systèmes complexes

RÉSUMÉ

Le **climat** et l'**environnement** sont des systèmes complexes typiques, pour la compréhension desquels la physique a un rôle central à jouer. La physique statistique pourra caractériser les phénomènes extrêmes (canicules, crues) ou dommageables (tremblements de terre, avalanches), évaluer leur risque et prédire leur impact sur différents réseaux couplés (énergie, communications, réseaux sociaux, économiques ou financiers). La physique non linéaire sait décrire les phénomènes de multi-stabilité et les bifurcations, et participer à la paramétrisation des petites échelles du climat via, par exemple, l'étude de l'interaction ondes-atmosphère ou de l'agrégation des nuages.

En turbulence, il faudra étudier les échelles plus grandes que l'échelle d'injection (pour par exemple savoir à quel point elles sont à l'équilibre statistique) et les échelles sous-diffusives (rôle des singularités et du bruit), ainsi que les régimes non-stationnaires ou non-homogènes, tels le couplage plancton-turbulence dans la circulation océanique. Mieux comprendre la turbulence d'ondes forte et la turbulence convective permettra d'améliorer respectivement les modèles océaniques et la formation des nuages ou l'interaction glace-eau de mer.

La dynamique des écosystèmes implique des échelles très variées qu'il faudra observer et modéliser en élucidant les effets de mémoire, les mécanismes de sélection et d'acquisition (ou de modification) de fonctions biologiques ou écosystémiques, et en distinguant le rôle des contraintes extérieures et celui des interactions entre individus ou espèces.

L'émergence d'*expériences de physiciens* sur des systèmes modèles de **matière active**, de matière informée, de matière programmable ou de systèmes inter-espèces sera un apport majeur pour comprendre des systèmes et des interactions de plus en plus hétérogènes et complexes, et à terme les contrôler. Le couplage entre la motilité des particules actives et leur écoulement complexe est à élucider. Les progrès expérimentaux pourront permettre le transfert en temps réel d'informations de plus en plus complètes du niveau micro vers le niveau macro et en retour une action sur le micro-monde.

Des **techniques de mesures** nouvelles vont émerger, utilisant des particules changeant de couleur selon les propriétés locales (cisaillement, vorticité, pH), ou des avancées en mesures ultra-rapides. Les réseaux de neurones biologiques pourront inspirer de nouveaux types dits neuro-

morphiques d'ordinateurs ou de caméras, sélectionnant les informations pertinentes dès l'acquisition des images.

Concevoir des villes moins énergivores, saines et limitant la ségrégation sociale requiert de comprendre l'évolution des structures urbaines et les dynamiques collectives humaines, sociales ou physiques (réseaux de transport, foules), tout en replaçant la ville dans un cadre plus large.

La théorie des systèmes hors-équilibre devra aller vers des systèmes, des interactions, voire des réseaux de plus en plus complexes et couplés (par exemple réseaux de transport et épidémies), et identifier le cas échéant de nouvelles classes d'universalité. Aux échelles **quantiques**, le couplage entre stochasticité et intrication, l'effet des mesures et des transitions de phase induites, ou l'hydrodynamique fluctuante de gaz de particules quantiques sont à explorer par la théorie et l'expérience.

Des défis liés aux ordinateurs du futur tels l'approche de la limite de Landauer ou la gestion de bits en environnement très bruyé pourront être abordés par la thermodynamique stochastique et son approfondissement par des expériences modèles (démons de Maxwell biologiques ou synthétiques).

L'intelligence artificielle (IA) peut apporter beaucoup : analyse de données (spectaculaire en dynamique des foules), développement de modèles par des méthodes inverses (en particulier pour le vivant), paramétrisations sous-maille en turbulence. En retour, physique statistique et physique non-linéaire peuvent contribuer à la création d'algorithmes plus efficaces et plus sobres (s'inspirant par exemple du cerveau), et à une reprise de contrôle sur la boîte noire qu'est souvent l'IA (analyse des mécanismes d'apprentissage, auto-évaluation de la fiabilité des résultats et régulation des *fake news*, compréhension des dynamiques d'opinions et des risques pour la démocratie), dans un dialogue fécond avec les neurosciences.

Physique des systèmes complexes

PRÉAMBULE

Les systèmes complexes sont généralement caractérisés par un comportement global ne pouvant se ramener à une superposition de leurs composantes élémentaires, du fait d'influences réciproques et non-linéaires entre leurs différents niveaux d'organisation. Nous allons présenter ici des exemples typiques de tels systèmes, et le rôle central que la physique peut ou pourra jouer dans leur compréhension et leur contrôle.

Ce chapitre porte sur un domaine dont une autre caractéristique est d'être très interdisciplinaire. Ce qui fait l'identité de la communauté de recherche sur les systèmes complexes réside dans un ensemble de méthodes, d'outils, et de savoir-faire largement issus de la physique statistique et de la physique non linéaire. Cette approche permet d'étudier de nombreux systèmes physiques ou même sociaux, en lien avec d'autres disciplines. Nos outils permettent en particulier de s'intéresser aux différentes échelles d'un problème, et de faire le lien entre théorie, données et expériences.

Les deux premières parties, « physique statistique » et « physique non linéaire », sont centrées sur les outils. Elles se recouvrent d'ailleurs partiellement, ce qui témoigne des liens profonds qui existent entre ces deux sous-disciplines de la physique. Les deux dernières parties, « comportements collectifs et dynamique des populations en biologie et écologie » et « physique et société », mettent l'accent sur de vastes domaines d'application.

PHYSIQUE STATISTIQUE À L'ÉQUILIBRE ET HORS ÉQUILIBRE

La physique statistique se développe beaucoup à l'interface avec d'autres disciplines (informatique, mathématiques, chimie, mécanique, biologie). Des progrès théoriques peuvent venir de nouvelles possibilités expérimentales qui suggèrent de nouvelles questions, un transfert de techniques d'un domaine de recherche à un autre, ou une ré-interrogation de notions largement acceptées.

DES SYSTÈMES HORS ÉQUILIBRE

Depuis une trentaine d'années, la description théorique des systèmes classiques hors équilibre a progressé grâce au dialogue entre des solutions exactes de modèles « jouets », et une approche macroscopique plus phénoménologique. Cette description utilise pleinement

le formalisme des grandes déviations. En particulier, les systèmes diffusifs peuvent être appréhendés au niveau macroscopique par la théorie macroscopique des fluctuations (MFT), qui va clairement continuer de se développer et trouver des généralisations, par exemple en direction de nouvelles applications, de liens avec les systèmes intégrables, ou de réalisations expérimentales. C'est un domaine dans lequel les liens avec les mathématiques sont et resteront étroits et fructueux.

La théorie des grandes déviations est une théorie asymptotique, dont le grand paramètre peut être le temps, le nombre de particules ou l'amplitude d'un bruit. Cette théorie a permis des avancées majeures, mais de nombreux systèmes réels fonctionnent hors de son régime de validité. Des méthodes non asymptotiques, par exemple celles issues de la théorie de la concentration de la mesure, permettront aux physicien·nes de contrôler pour ces systèmes ce que la théorie des grandes déviations ne décrit pas. Il existe aussi des systèmes pour lesquels la limite de grande taille n'existe pas, notamment ceux présentant un désordre qui ne peut pas être homogénéisé (par exemple certains réseaux chimiques irréguliers) et qu'il faudra pouvoir traiter.

VERS UNE PHYSIQUE STATISTIQUE DES PHÉNOMÈNES EXTRÊMES

Dans un contexte où le dérèglement climatique va entraîner toutes sortes d'événements extrêmes, pouvoir explorer les fluctuations rares numériquement va devenir un outil de compréhension et un auxiliaire à la décision très précieux. Des algorithmes permettent déjà de repérer des motifs récurrents (*patterns*) dans les épisodes de canicule, ou de comprendre les évolutions de la fréquence de certains phénomènes naturels, et nous n'en sommes qu'aux prémices de ces approches.

Dans un monde hyperconnecté, il va être essentiel de mieux caractériser les fluctuations extrêmes au sein de divers types de réseaux (énergie, communications...), la résilience de ces réseaux vis-à-vis des effets négatifs de ces fluctuations, et le rôle des couplages entre réseaux. Cela pourra permettre de mieux anticiper les phénomènes de *black-out* sur les réseaux électriques, les crises dans les systèmes économiques, ou les propagations d'opinions à l'intérieur des réseaux sociaux. Toute une direction de recherche pourrait plus largement concerner la prévision des risques (fractures, tremblements de terre, avalanches...).

Les progrès algorithmiques devront aller de pair avec les développements théoriques: les phénomènes extrêmes dans les systèmes fortement corrélés, déjà explorés notamment avec les processus d'exclusion, recèlent encore bien des pistes à suivre. La distribution de Tracy-Widom pour la plus grande valeur propre d'une grande matrice aléatoire est un exemple paradigmatique, mais il y a très probablement de nouvelles classes d'universalité à mettre en évidence (une étape serait d'identifier de possibles liens entre les modèles, comme éventuellement entre la localisation d'Anderson et la turbulence) et de nouvelles méthodes à inventer.

PHYSIQUE STATISTIQUE, THERMODYNAMIQUE ET THÉORIE DE L'INFORMATION

Bien qu'on puisse faire remonter les liens entre physique statistique et théorie de l'information à la fondation de cette dernière, renforcer les recherches associant les deux domaines semble une voie intéressante pour la prochaine décennie, à une époque où les applications de la théorie de l'information sont omniprésentes.

La limite de Landauer par exemple, qui associe un travail minimal à l'effacement d'un bit d'information, pourrait devenir importante technologiquement, à mesure que l'électronique se miniaturise. Les travaux sur ce sujet (Comment approcher cette limite? Peut-on la contourner, et si oui, comment?), notamment expérimentaux, vont se poursuivre. Une autre question serait de pouvoir gérer des bits dans un environnement où le signal est de même niveau que le bruit. Les liens avec une thermodynamique stochastique quantique peuvent rapprocher ce thème de celui de la «théorie mésoscopique des fluctuations quantiques», tandis que les liens avec le problème classique des rapports entre thermodynamique et information peuvent rapprocher ce thème d'une physique statistique de la matière dite «informée», qui sera détaillée un peu plus bas. La question ancienne des liens entre l'entropie de Shannon (définie en théorie de l'information), et l'entropie physique (définie en thermodynamique) reste d'actualité. Une autre direction consiste à réaliser expérimentalement des démons de Maxwell, afin d'approfondir le rôle joué par l'information. Il existe déjà plusieurs tentatives en ce sens, par exemple avec des microleviers ou avec des jonctions Josephson. Les démons de Maxwell existent naturellement en biologie, impliqués en particulier dans la correction d'erreurs au sein de la cellule (réplication et transcription de l'ADN, par exemple), et leur étude est un champ amené à se développer. S'il était confirmé que les démons réalisés actuellement dans des granulaires ou de la turbulence sont effectivement équivalents à leurs homologues microscopiques, malgré l'emploi de températures effectives pour ces systèmes dissipatifs, l'emploi de ces modèles macroscopiques contournerait la difficulté d'observer des objets très petits et pourrait mener à des avancées importantes.

VERS LES PETITES ÉCHELLES : DU CLASSIQUE AU QUANTIQUE

Une voie paraît particulièrement originale et prometteuse: le développement d'une «théorie de champ moyen quantique». Il s'agit ici de décrire des systèmes quantiques à une échelle suffisamment grande pour que le transport soit diffusif, mais plus petite que la longueur de cohérence, pour que les effets quantiques soient importants. À ces échelles, les couplages entre la stochasticité due à l'environnement, les phénomènes proprement quantiques comme l'intrication, et aussi potentiellement les effets des mesures vont produire de nouveaux phénomènes encore largement à découvrir. Ces développements seront stimulés par les nouvelles possibilités expérimentales qui permettent, par exemple, l'étude de l'hydrodynamique fluctuante de gaz de particules quantiques ou de transitions de phase induites par les mesures elles-mêmes. Des outils théoriques importés d'autres disciplines pourraient également s'avérer utiles. L'utilisation des martingales s'est ainsi avérée pertinente pour expliquer le collapse quantique dû à des mesures itératives.

La conception et l'étude de modèles jouets, pour lesquels des progrès analytiques sont possibles, sont une tâche ardue, mais qui a commencé. On peut imaginer que, comme pour le cas classique, ce serait une étape vers une théorie de portée plus générale, dont on ignore à ce jour la forme.

VERS UNE COMPRÉHENSION DES RÉSEAUX DE NEURONES PROFONDS

Les réseaux de neurones profonds sont en plein développement, avec des applications qui se généralisent, mais ils conservent un aspect de «boîte noire». Les dangers potentiels de l'IA apparaissent de plus en plus explicitement, et un débat sociétal sera nécessaire. Remplacer les boîtes noires par une véritable compréhension, ancrée par exemple dans les mécanismes sous-jacents (IA dite «guidée») serait une réponse que pourrait apporter la physique. Les enjeux sont de rendre les apprentissages plus efficaces et plus sobres, mais aussi de rendre l'IA moins influençable par les *fake news*, voire de créer des IA capables d'évaluer la qualité des informations qu'elles délivrent. Cette compréhension de l'IA sera nécessairement multidisciplinaire, mais la physique a des atouts pour y jouer un rôle de premier plan:

1) Sur un plan expérimental, les physicien·nes ont une expérience et un savoir-faire dans l'étude numérique des systèmes complexes à grand nombre de paramètres, dans un cadre rigoureux: étude de la sensibilité par rapport aux paramètres et de la dépendance par rapport à la taille, proposition d'observables pertinentes, recherche de comportements universels. Ces compétences, originales par rapport à celles apportées par l'informatique, les mathématiques ou l'ingénierie, s'appliqueront à l'étude d'un réseau de neurones vu comme un système complexe à étudier et comprendre. C'est en fait déjà le cas, et ce mouvement devrait s'amplifier.

II) Sur un plan théorique, la compréhension des réseaux de neurones progressera à chaque fois que les observations expérimentales pourront être rationalisées par des études analytiques de modèles jouets, mettant en évidence les phénomènes importants. La physique statistique donne l'expérience de cette démarche et de nombreux outils pour cela. En particulier, la physique statistique des systèmes désordonnés, utilisée depuis longtemps pour l'analyse d'algorithmes et en inférence statistique, continuera d'être importante dans ce cadre. Le traitement du signal, les systèmes de particules en interaction ou encore les matrices aléatoires jouent déjà un rôle, mais de nouvelles applications, pour l'instant insoupçonnées, des outils classiques de physique statistique verront certainement le jour.

INFÉRENCE STATISTIQUE : MÉTHODES INVERSES

L'IA est l'un des volets de l'analyse de données, que l'on peut considérer dans le cadre général de l'inférence statistique. Pour celui-ci, la physique statistique a grandement contribué au développement des méthodes inverses (c'est-à-dire l'identification des paramètres d'un modèle à partir de données) en s'appuyant sur la méthode de l'entropie maximale. Les applications sont diverses : neurosciences (reconstruction des interactions entre neurones à partir des données d'activité neuronale), matière active et éthologie (analyse des vols d'étourneaux), immunologie, ou encore étude du microbiote. Ce domaine à la frontière entre physique statistique et inférence statistique, entre théorie de l'information et IA, va poursuivre son développement.

INTERFACE IA/NEUROSCIENCES

Le développement de réseaux de neurones artificiels et celui de la modélisation en neurosciences (ou plus généralement de la modélisation cognitive) ont toujours été interdépendants. L'interface IA/neurosciences est en plein essor, et la physique y contribue activement. Les progrès considérables des méthodes expérimentales en biologie donnent accès à des données toujours plus massives et plus fines. Les méthodes récentes de *deep learning* apportent de nouveaux outils pour l'analyse et la modélisation. Dans ce contexte de la modélisation en neurosciences, à la fois informatique, théorique et expérimental, la physique statistique va continuer de jouer un rôle moteur.

PHYSIQUE NON LINÉAIRE

La physique non-linéaire regroupe des communautés qui travaillent dans des domaines scientifiques différents, mais qui utilisent des outils et des concepts communs pour mettre en évidence des phénomènes et des mécanismes génériques, c'est-à-dire indépendants du système particulier étudié.

Un exemple typique d'un tel concept est la notion de bifurcation issue de la théorie des systèmes dynamiques.

Son rôle est central en théorie de la turbulence, tout comme son importance et son actualité, notamment pour ses applications en dynamique climatique. Une autre ligne de force concerne les problèmes liés à l'état actuel de la société et son évolution : on peut citer le changement climatique, bien sûr, mais aussi les conditions de vie, la résilience des écosystèmes, les économies d'énergie, l'utilisation de l'intelligence artificielle comme aide à l'amélioration des mesures et des simulations, mais aussi comme objet d'études. Le fort ancrage expérimental de la physique non-linéaire nous amènera aussi à faire ressortir, de manière non exhaustive, quelques techniques expérimentales émergentes et prometteuses.

CLIMAT

La physique des systèmes complexes non linéaires pourrait jouer à l'avenir un rôle précurseur dans les développements méthodologiques pour les sciences du climat. Le cœur de cette physique est de considérer des systèmes modèles de complexité suffisante pour présenter des dynamiques riches (par exemple présentant de la multi-stabilité), mais suffisamment modérée pour permettre l'analyse fine des mécanismes et l'expérimentation méthodologique. Une compréhension accrue des processus non résolus à l'échelle de la maille de simulation, nécessaire à leur paramétrisation, est un point très important : le déferlement d'ondes et l'interaction ondes-atmosphère, les mélanges turbulents en proche paroi, la convection turbulente et l'agrégation des nuages en sont quelques exemples. Il reste ensuite une part de liberté dans la construction de modèles physiques effectifs à l'échelle de la maille et leur paramétrisation. Ces dernières années ont vu le développement de paramétrisations stochastiques, ne s'attachant pas seulement à reproduire la moyenne d'un processus non résolu, mais également sa variance. Une question fondamentale ouverte dans de nombreux domaines est : doit-on s'attendre à ce que les fluctuations aux petites échelles modifient la dynamique des grandes échelles ? Enfin, l'usage de simulations à toujours plus haute résolution ne peut pas être une fin en soi. Certes, la haute résolution permet de s'affranchir de paramétrisations (par exemple, des tourbillons méso-échelles deviennent résolus pour des mailles de l'ordre de 10 km). Mais le coût carbone devient alors exorbitant, en particulier lorsque l'on prend en compte les longues durées des simulations du climat et la nécessité de réaliser ces simulations par centaines afin d'obtenir la distribution de probabilité des états futurs possibles. Une solution en vogue depuis quelques décennies et revitalisée depuis les années 2010 est de développer des modèles ayant un nombre réduit de variables, que l'on construit par apprentissage statistique (caricaturalement des régressions) ou par apprentissage automatique (réseaux de neurones) sur des données temporelles obtenues par des simulations de haute fidélité. Ces modèles réduits peuvent ensuite être utilisés pour prédire l'état d'un système aux temps longs. Le défi est maintenant de développer des paramétrisations « nouvelle génération »

(s'intéressant, par exemple, au nombre de Nusselt et à sa variance en convection thermique) et de caractériser les processus à plus petite échelle. Des avancées dans ces directions pourraient améliorer en profondeur les connaissances sur les changements climatiques en cours et donner des pistes pour augmenter la résilience du système climatique (voir aussi le chapitre *Physique pour l'énergie et le climat*).

RÔLE DES SINGULARITÉS EN TURBULENCE ET POUR LE CLIMAT

Les écoulements turbulents sont omniprésents dans la nature et ils présentent des tourbillons et des structures cohérentes de différentes tailles, définissant les différentes échelles de la turbulence.

Les échelles plus petites que l'échelle dissipative sont souvent considérées comme n'étant pas pertinentes et n'ayant pas besoin d'être prises en compte dans les simulations numériques. De récents progrès, théoriques et expérimentaux, suggèrent cependant que de nombreux phénomènes se produisent en dessous de l'échelle dissipative, et qu'ils peuvent affecter la validité des équations de Navier-Stokes comme modèle pour la dynamique des fluides industriels, géophysiques ou astrophysiques. Parmi eux, un phénomène est particulièrement scruté par les théoriciens de la turbulence: le développement de *singularités* ou quasi-singularités, provoquant la non-unicité des solutions. Ce phénomène conduirait alors à une *stochasticité spontanée*, rendant non pertinente la notion de «vitesse déterministe en un point» et induisant une séparation des trajectoires indépendante de leur séparation initiale. Cette particularité pourrait être renforcée par le *bruit thermique*, qui entrerait en jeu à des échelles beaucoup plus élevées que l'échelle fluide. L'exploration de ces phénomènes requiert des outils multi-échelles et des techniques de visualisation avancées (vélocimétrie de suivi de particules 3D —*Particle Tracking Velocimetry*— et vélocimétrie par image de particules —*Particle Image Velocimetry*) dans des expériences turbulentes de grande taille, ainsi que des simulations numériques ultra-résolues.

En turbulence d'ondes, d'autres singularités et structures cohérentes se trouvent impliquées, telles que les ondes à crête raide, le moutonnement en océanographie, les ondes de choc dans les plasmas, ou les cônes de Dirac dans les ondes élastiques des plaques minces. Ces structures cohérentes dissipatives, fortement non linéaires, affectent la dynamique dont la description reste ouverte et sort du cadre de la théorie de la turbulence faiblement non linéaire. Mieux comprendre cette turbulence d'ondes permettrait d'en tenir compte dans les modélisations du climat pour prédire l'état des océans et leurs échanges avec l'atmosphère, ou dans l'analyse de différents phénomènes, tels que l'intermittence dont l'origine pourrait être liée à la dimension fractale des structures cohérentes.

La compréhension de la turbulence convective est aussi un enjeu de plus en plus important. La modélisation phy-



Banc de poissons. © Milos PRELEVIC, Unsplash

sique de phénomènes auxquels elle est reliée comme la formation de panaches, l'interaction entre les panaches et l'écoulement moyen, la relation entre la couche limite thermique et la couche limite hydrodynamique, ou encore l'interaction entre la convection et les ondes, reste un vrai défi fondamental dans le cas très turbulent. Des avancées à ce niveau pourraient améliorer les modèles de climat. Des exemples sont la formation des nuages, l'interaction glace-eau de mer, la fonte des glaces à la surface de l'eau (phénomènes très non linéaires et turbulents) qui ont une influence importante sur le climat et



dont la modélisation, très loin d'être accomplie, serait un atout pour obtenir une modélisation du climat beaucoup plus réaliste.

Enfin, dans ces turbulences (turbulence d'ondes, turbulence classique ou turbulence convective), les régimes non-stationnaires et non-homogènes n'ont été que peu explorés, du fait qu'ils sortent du cas habituel des prédictions de la théorie de Kolmogorov. Ils sont pourtant essentiels pour obtenir une description plus réaliste des phénomènes turbulents et effectuer de meilleures pré-

dictions du climat ou d'autres phénomènes comme le couplage plancton-turbulence.

LA MÉCANIQUE STATISTIQUE À L'ÉQUILIBRE POUR DÉCRIRE LES PROPRIÉTÉS AUX GRANDES ÉCHELLES DES ÉCOULEMENTS TURBULENTS

La modélisation de la turbulence à trois dimensions est un enjeu important dans de nombreux domaines académiques et industriels. La majeure partie des efforts a porté sur l'étude de la cascade inertielle vers les petites

échelles. En revanche le comportement des échelles plus grandes que l'échelle d'injection a été peu documenté. Il a été conjecturé, puis montré expérimentalement que ces échelles se trouvent à l'équilibre statistique avec une température effective, et en particulier qu'elles satisfont l'équipartition d'énergie. Une question ouverte est de savoir dans quelle mesure les lois de la thermodynamique et de la mécanique statistique à l'équilibre s'appliquent pour décrire les propriétés des grandes échelles des écoulements turbulents, alors qu'elles se trouvent en interaction avec les petites échelles fortement hors équilibre. Si tel est le cas, cela permettrait de simplifier fortement la modélisation numérique de la turbulence à ces grandes échelles et sa compréhension, avec un grand bénéfice pour diverses communautés en mécanique des fluides, physique statistique, géophysique, astrophysique et sciences de l'ingénieur.

NOUVELLES MÉTHODES NUMÉRIQUES UTILISANT DES ALGORITHMES STATISTIQUES ET MATRICIELS

Le numérique est largement utilisé pour réaliser de l'intégration temporelle ou divers types de simulations numériques (Monte Carlo ou multi-agents, par exemple). Il est cependant utile à bien d'autres fins, par exemple pour trouver, à l'aide d'algorithmes dédiés, des états instables d'un système non linéaire. Actuellement, des algorithmes statistiques (basés sur les événements rares) ou matriciels (itératifs) sont en plein essor, car ils sont plus rapides que les simulations directes ou les simulations Monte Carlo. D'importants progrès et applications sont attendus dans ce domaine à l'avenir.

DÉVELOPPEMENT DE SYSTÈMES INTELLIGENTS À L'AIDE DE RÉSEAUX DE NEURONES BIO-INSPIRÉS

Les réseaux de neurones biologiques traitent un nombre énorme de paramètres, bien plus qu'un serveur informatique, tout en consommant beaucoup moins d'énergie. L'étude physique des réseaux de neurones biologiques, vus comme des systèmes complexes et non linéaires, devrait permettre de comprendre comment se font le processus d'apprentissage et les propriétés cognitives du cerveau, et d'utiliser cette compréhension pour améliorer l'intelligence artificielle (aujourd'hui fondée sur un conditionnement par renforcement du type pavlovien) et son efficacité énergétique. On retrouve ici un thème déjà abordé sous l'angle de la physique statistique dans la section précédente.

IMAGERIE ET CAMÉRA NEUROMORPHIQUE

Une application expérimentale très féconde de la technologie des réseaux de neurones biomimétiques concernerait l'électronique centrée sur les événements, typiquement les processeurs et caméras dits «neuro-morphiques». Leur principe est de n'enregistrer que les pixels dont le niveau varie (au lieu de le faire après

l'acquisition à l'aide d'algorithmes de compression). Ces dispositifs pourraient annoncer la prochaine révolution en métrologie des fluides ou en microscopie de localisation à molécule unique, en donnant accès à une résolution spatiale et temporelle décuplées et la possibilité d'enregistrements ultra-résolus sur des temps longs. De tels enregistrements sont indispensables pour l'étude des événements rares et hors de portée des technologies des caméras rapides traditionnelles limitées par la mémoire embarquée. Ces futures plateformes expérimentales aideraient considérablement à améliorer notre sobriété énergétique en devenant moins gourmandes, par plusieurs ordres de grandeur, en besoins de stockage, de transfert de données et de puissance de calcul. Il s'agirait d'une véritable rupture dans notre manière de mesurer les fluides et de coder ou analyser les données. L'approche neuromorphique peut aussi être étendue à la conception de nouveaux ordinateurs dont la structure serait inspirée de celle du cerveau, par exemple sans séparation nette entre support de la mémoire et lieu de calcul. Une telle évolution permettrait de rapprocher l'efficacité énergétique de l'IA de celle du cerveau, comme évoqué dans le paragraphe précédent.

PARTICULES ET FLUIDES INTELLIGENTS

Une amélioration des mesures dans plusieurs champs de physique statistique et non linéaire pourra venir de l'utilisation de fluides ou particules «intelligentes», par exemple les particules qui fluorescent ou changent de couleur en fonction des propriétés locales d'un milieu. Nous pouvons penser au cisaillement local (sur le modèle des peintures développées dans le domaine aérospatial et qui changent de couleur selon le cisaillement pariétal), à la vorticité locale (il existe déja de premiers essais de mesure par cette approche), ou encore à la salinité, à la conductivité, au pH, au champ magnétique ou électrique, ou encore à la température. Cette approche est difficile, mais constitue une direction de recherche très prometteuse.

TECHNIQUES DE MESURES SPATIO-TEMPORELLES DE TOPOGRAPHIE D'ONDES DE SURFACE

La métrologie optique joue un rôle central depuis 20 ans dans la physique des fluides. Les laboratoires de recherche ont contribué à développer des outils puissants, comme la vélocimétrie par images de particules (*Particle Image Velocimetry*), qui ont aujourd'hui atteint leur maturité et sont disponibles sous forme libre ou commerciale. Les mesures optiques, résolues en espace et en temps, d'ondes à la surface d'un liquide ou d'un solide en utilisant des dispositifs d'imagerie sophistiqués ont récemment permis de nombreuses avancées expérimentales en dynamique non linéaire. Ces mesures spatio-temporelles pourraient bénéficier, dans les années à venir, de développements comparables à ceux connus pour la vélocimétrie par images de particules. Elles permettraient ainsi de lever des verrous en mécanique des fluides, en

mécanique du solide, ou en physique de l'atmosphère. Parmi les grands défis à relever, on peut citer la mesure spatio-temporelle à grande échelle des ondes à la surface de l'océan.

TECHNIQUES DE MESURES ULTRA-RAPIDES EN OPTIQUE

La mesure ultrarapide en optique est au cœur de nombreuses avancées expérimentales récentes en dynamique non linéaire. Parvenir à des avancées majeures dans ce domaine devrait permettre de débloquer des verrous fondamentaux. Les expériences d'optique, en particulier d'optique fibrée, sont d'extraordinaires applications de la physique des ondes non linéaires. L'imagerie spatiale et temporelle de la phase et de l'amplitude du champ électrique sur des échelles de temps inférieures à 100 femtosecondes représente toujours un défi fondamental de l'optique. Notons enfin, toujours en imagerie, le potentiel de l'utilisation du mélange d'ondes acoustiques non linéaires en vue d'applications industrielles en contrôle non destructif.

COMPORTEMENTS COLLECTIFS : DE LA MATIÈRE ACTIVE AUX DYNAMIQUES DES POPULATIONS EN ÉCOLOGIE

La motivation de l'étude de la matière active est largement biologique: elle vise à comprendre les phénomènes collectifs dans les organismes vivants, à différentes échelles. Les avancées dans la compréhension des propriétés de la matière active ont bénéficié ces deux dernières décennies du développement « d'expériences de physiciens », à savoir des expériences bien contrôlées sur des systèmes modèles simples autopropulsés. Bien que l'inspiration des problématiques issues du monde vivant reste cruciale, ces expériences contrôlées permettent d'aborder d'autres questions comme la mise en évidence de transitions de phase dynamiques, l'émergence de phénomènes collectifs, ou la formation de *patterns* spatio-temporels hors équilibre. Elles visent à étendre le cadre de la physique statistique d'équilibre à de nouvelles classes de systèmes. Nous n'en sommes encore qu'au début de ces approches, qui vont pouvoir s'emparer d'objets variés aux propriétés inédites.

VERS PLUS DE COMPLEXITÉ DANS LES COMPOSANTS ÉLÉMENTAIRES ET LES INTERACTIONS : « MATIÈRE INFORMÉE »

Alors que traditionnellement, la physique statistique considère des assemblées d'entités semblables, l'hétérogénéité des systèmes vivants motive le développement de nouveaux outils théoriques pour étudier des systèmes dont les composants élémentaires présentent une plus grande complexité. Cette complexité peut concerner la structure interne des composants, leurs interactions ou le paysage énergétique dans lequel ils évoluent.

Les développements expérimentaux actuels devraient

permettre d'aborder ce qu'on pourrait appeler la matière informée. Des exemples typiques de matière informée sont les ensembles de minirobots capables d'échanger de l'information au-delà de la simple information de position ou d'orientation, ou bien la matière programmable (typiquement, des assemblages moléculaires synthétiques utilisant les propriétés d'appariement de brins d'ADN complémentaires). Les potentialités de contrôle de ces systèmes expérimentaux devraient être un formidable catalyseur des développements théoriques comme l'ont été les premières expériences de physiciens pour la matière active. L'évolution des possibilités expérimentales permet d'envisager une « révolution haptique », c'est-à-dire la possibilité de transférer en temps réel au macro-monde des informations sensorielles (vision, son, toucher) en provenance du micro-monde ou du nano-monde et en retour, d'agir en direct sur le micro-monde.

DYNAMIQUE DE PARTICULES AUTO-PROPULSÉES À LONGUE PORTÉE D'INTERACTION

La compréhension du transport de particules, qu'elles soient passives ou actives, fait partie des enjeux majeurs des prochaines années. Beaucoup d'études ont déjà été effectuées sur des ensembles non denses de particules, mais les ensembles denses en interaction mutuelle à travers leur sillage et en interaction avec le fluide à cause de leurs propriétés intrinsèques (la densité par exemple) restent toujours un enjeu. S'ajoutent les particules « actives » (autopropulsées) qui ont souvent été étudiées dans des fluides à l'équilibre, mais dont l'étude pour des milieux en mouvement est encore en développement. En particulier, le couplage hydrodynamique de particules auto-propulsées avec des écoulements plus ou moins complexes devrait rester un sujet d'étude majeur. Comprendre l'hétérogénéité de la distribution de microorganismes dans les océans en est un des nombreux enjeux, tout comme la compréhension de la distribution de microorganismes dans le corps ou dans les sols. Dans ces exemples, le couplage entre motilité et écoulement complexe (océanique, sanguin ou dans des milieux poreux) est encore à élucider.

UN DOMAINE PROPICE À LA RÉVOLUTION DES MÉTHODES INVERSES

Dans le champ large des outils offerts par l'intelligence artificielle, les méthodes dites « inverses », permettant d'inférer une modélisation physique de la statistique des degrés de liberté microscopiques issue de grands ensembles de données, deviendront accessibles. Le point de départ sera le savoir acquis lors d'expériences de physiciens très contrôlées sur des systèmes synthétiques, qu'il s'agira d'étendre à des expériences sur des systèmes plus complexes, par exemple vivants. Avec l'émergence d'un cadre général de description des systèmes actifs et de leurs classes d'universalité, il sera ensuite possible de prédire et contrôler leurs propriétés émergentes en partant de l'échelle microscopique.

DYNAMIQUE DES POPULATIONS, ÉCOLOGIE ET ÉVOLUTION : NOUVELLES EXPÉRIENCES, NOUVEAUX CONCEPTS

Les populations d'êtres vivants sont complexes : elles sont constituées d'individus qui interagissent entre eux, sont au contact d'individus d'autres espèces, et sont plongés dans un environnement plus ou moins stable. Elles ont la particularité d'avoir des temps de vie finis, de se déplacer et d'évoluer au cours du temps. Elles peuvent se spécialiser et acquérir des fonctions biologiques ou écosystémiques. Leur étude intéresse de plus en plus de physicien·nes. Il apparaît important d'effectuer des expériences contrôlées (particulièrement en microbiologie, mais d'autres échelles plus petites ou plus grandes devraient suivre). Obtenir des données d'observation avec une bonne résolution spatio-temporelle est également essentiel, par exemple en utilisant des capteurs de mouvements pour des individus mobiles ou des capteurs de présence/absence pour la végétation, ce qui ouvre ensuite la voie à des approches ancrées dans l'analyse des données. La définition des observables pertinentes doit être adaptée à chaque système étudié et à son échelle de mesure ou d'observation. De plus, la notion même d'individu (au sens d'unité élémentaire du système et de sa dynamique) peut être redéfinie, selon que l'on s'intéresse au niveau de la cellule, de l'organisme, de la population ou des communautés d'espèces.

Les notions de trajectoire, d'histoire et de mémoire sont particulièrement importantes en écologie et en évolution où les espèces sont soumises à des contraintes extérieures changeantes et où les conditions initiales jouent un rôle très important. Les mécanismes de sélection, en particulier, sont en général très mal connus. La façon dont ils opèrent peut parfois présenter des analogies avec un mécanisme d'apprentissage, au sens où la façon dont l'écosystème évolue en réponse aux stimuli extérieurs va elle-même évoluer au cours du temps, comme si l'écosystème « apprenait » à évoluer.

En même temps, distinguer la part des contraintes extérieures et celle des interactions spécifiques entre individus ou espèces est un enjeu majeur pour comprendre la dynamique à différentes échelles de temps et d'espace. En cela, l'étude de la réponse d'une ou plusieurs espèces à une perturbation contrôlée fournira des indications précieuses.

Dans l'objectif d'une modélisation unifiée, les outils de physique statistique se révèlent adaptés si le nombre d'espèces est grand, et ceux de la physique non-linéaire pour un petit nombre d'espèces. Un enjeu est d'inventer un nouveau cadre pour inclure plusieurs échelles (par exemple lorsqu'on utilise une représentation du système en termes de graphes). Les hypothèses habituelles de la physique statistique peuvent ne pas être vérifiées, lorsqu'il n'y a que peu de données (par exemple les extinctions) ou pas d'ergodicité (arbre phylogénique), nécessitant de nouvelles approches.

Les questions d'hétérogénéité et de biodiversité sont cruciales à comprendre, dans un cadre biologique où les espèces ne sont pas à première vue distribuées de façon aléatoire, mais plutôt de façon structurée. Le lien entre ces questions et la capacité d'une espèce (ou d'un ensemble d'espèces) à assurer une fonction biologique ou écosystémique commence à être abordé, autant expérimentalement que par des modèles formels, et il constitue un champ de recherches prometteur.

Une dernière direction, encore peu développée, concerne le rôle des propriétés physiques, par exemple le transport des nutriments, des graines ou des odeurs, dans les caractéristiques des réseaux d'interactions entre espèces et l'évolution des fonctions écosystémiques associées.

RECONSTITUTION DE TRAJECTOIRES ÉVOLUTIVES OU HISTORIQUES

Il existe de plus en plus de travaux cherchant à rendre compte des dynamiques évolutives ou historiques à partir de données empiriques. Peut-on dire que Néanderthal a été « éliminé » par notre espèce, ou est-ce avant tout le résultat de changements climatiques ? Quelle est la cause de l'effondrement de la civilisation Maya ? Les travaux sur de tels thèmes font appel à l'exploitation de données variées — archéologiques et climatiques, en particulier. La physique des systèmes complexes pourrait davantage s'investir dans cette problématique au sein de projets interdisciplinaires.

Enfin, de façon générale, l'étude de la matière active permet d'apporter un nouvel éclairage, transdisciplinaire, dans tous les domaines où la question de dynamiques collectives non contraintes par les lois de l'équilibre thermodynamique se pose. C'est le cas, bien sûr, des dynamiques animales, mais aussi des dynamiques de populations, de la robotique en essaim ou des dynamiques cognitives. La physique la matière active sera interdisciplinaire par essence.

PHYSIQUE ET SOCIÉTÉ

DYNAMIQUES SOCIALES : AU-DELÀ DES INTERACTIONS DE PAIRES

La physique statistique permet d'aborder les comportements collectifs rencontrés dans un contexte économique et social à partir de modèles prenant en compte les interactions entre individus et les hétérogénéités individuelles. Cependant, la dynamique d'un groupe social ne se réduit pas à des interactions de paires (entre pairs et par paires) et l'intrication de diverses structures à diverses échelles devra être abordée. Ainsi des macrostructures (sociales, politiques) préexistent aux individus et ont un impact sur leur comportement. Comment articule-t-on ces différents niveaux pour expliquer les comportements des uns et des autres ? Comment peut-on modéliser les dynamiques de ces structures elles-mêmes ? Un changement de para-

digne est nécessaire pour modéliser le comportement des différents types de structures constituant l'organisation sociale, les institutions officielles, les associations ou les entreprises. Une approche basée sur le concept de réseau pourra utiliser la modélisation de systèmes par l'objet appelé hypergraphe en physique et complexe simplicial en mathématiques. Cet objet généralise la modélisation des interactions au-delà des interactions de paires, en considérant des relations entre trois nœuds du réseau (ou plus), au lieu de liens entre seulement deux nœuds. Enfin, un autre aspect essentiel à aborder est le passage d'un comportement collectif (une auto-organisation) à la prise de conscience de cet état par les individus, amenant une rétroaction sur les individus venant de la structure collective émergente, et ainsi la possibilité d'une évolution conjointe des niveaux individuel et collectif. Ce thème touche à celui de l'évolution de notre espèce, avec par exemple l'émergence de la coopération ou du langage.

TRANSITION ÉCOLOGIQUE

La question du développement durable, en tant que problématique scientifique, relève par excellence de la physique des systèmes complexes, du fait des dimensions très variées qu'il faut prendre en compte. Les thématiques à étudier dans ce contexte incluent par exemple la géophysique, les échanges économiques et financiers, l'accès aux ressources, la sécurité alimentaire, l'occupation des sols, les comportements individuels, les flux migratoires induits par le réchauffement, ou encore les mécanismes de décisions aux niveaux nationaux et internationaux. Sur tous ces sujets, des travaux se développent en physique en collaboration avec des géographes, des sociologues, des économistes ou des historiens, grâce à l'accès à de grandes quantités de données et la capacité des modèles physiques à envisager la diversité des échelles de temps impliquées.

VILLES ET TERRITOIRES

Plus de 50 % des habitants sur Terre habitent en milieu urbain. Mieux comprendre la dynamique des villes pourrait permettre de concevoir des villes moins énergivores et moins polluantes, et de limiter les phénomènes de ségrégation sociale. Cette étude concerne à la fois la dynamique des structures urbaines (évolution des réseaux de rues et de transport, occupation des sols...), les répartitions socio-économiques des habitants (questions de ségrégation sociale, lieux d'habitation par opposition aux lieux de travail), les comportements collectifs en milieu urbain (*patterns* de mobilité, mouvements de foules, mouvements sociaux, propagation d'émeutes) et les questions sanitaires (propagation d'épidémies en prenant en compte les hétérogénéités des interactions sociales et des comportements individuels, interaction avec les questions de mobilité). Tous ces sujets sont à aborder à l'échelle d'une ville, d'un ensemble de villes («compétition» entre villes, dynamiques de croissance, rôle des flux migratoires), à différentes échelles (le périmètre ur-

bain étant mal défini, des approches multi-échelles ont été montrées plus pertinentes). La ville c'est aussi l'équilibre ou le déséquilibre ville/territoire, et les interactions en matière de flux — flux migratoires, flux économiques, flux financiers.

Là encore, la démarche de la physique, combinant analyse de données empiriques, modélisation, simulation et expérimentation, apporte une expertise pour nourrir la discussion citoyenne et politique sur les décisions à prendre dans le contexte du changement climatique et des crises sociales urbaines.

MOBILITÉS, TRANSPORT ET RÉSEAUX DANS L'ESPACE PHYSIQUE

L'aménagement des mobilités est crucial tant pour la sécurité que pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Un gros champ de travail sera l'intégration des différents modèles de transport pour en décrire toutes les échelles et tous les modes (piétons, vélos, véhicules, trains). Le couplage des modèles de transport à d'autres facteurs, par exemple à des modèles épidémiologiques, ou de plus en plus, à des modèles de pollution ou d'émissions de CO₂, devrait également se développer.

Le couplage entre réseaux (énergie et eau potable, par exemple) est primordial. La stabilité des réseaux électriques pose des problèmes complexes. La physique statistique a déjà contribué à la compréhension du maintien de la fréquence du réseau électrique à 50 Hz (quels que soient la consommation et les événements affectant la production) via l'utilisation de modèles type Kuramoto, et elle peut participer à une meilleure gestion des énergies intermittentes. L'effondrement d'un réseau comme celui de l'énergie peut induire l'effondrement d'un autre, tel celui des communications. L'étude des interactions entre réseaux progresse grâce à l'introduction de réseaux multicouches, plus particulièrement les multiplexes, par exemple pour l'étude des systèmes de transport urbain.

Concernant la dynamique de foules, l'explosion des mesures de terrain rendues possibles par l'IA offre de nouvelles possibilités de modélisation. Mais le plus fort impact de l'IA est à venir, par sa capacité à rendre compte de la complexité et de l'hétérogénéité des foules. Aux fortes densités, on s'attend à un apport très important de l'apprentissage automatique pour détecter des anomalies dans les flux, voire prévenir avec quelques secondes ou minutes d'avance des mouvements de foules incontrôlés.

Plus généralement, la compréhension des foules à haute densité n'en est qu'à son début et gagnera à intégrer les études biomécaniques de locomotion qui commencent tout juste à considérer les contraintes liées à la densité (risque de chute, par exemple). Au-delà d'une approche purement mécanique, il faudra prendre en compte les capacités des piétons à anticiper leur mouvement, même à haute densité, et à remodeler les liens sociaux (émergence de leaders, rôle de l'information).

DÉMOCRATIE : DYNAMIQUES D'OPINION, DÉSINFORMATION

Les études de la dynamique d'opinion vue comme un système dynamique complexe ont eu un très grand succès pour montrer comment une version simplifiée des interactions locales entre les acteurs sociaux peut produire des structures globales qui reproduisent qualitativement des régularités observées dans les systèmes réels. Quelques exemples emblématiques sont le modèle de Schelling pour la ségrégation, ou le modèle d'Axelrod pour la persistance de la diversité culturelle en présence d'interactions locales qui tendent à l'homogénéisation. Aujourd'hui, l'explosion du nombre d'études empiriques, grâce à l'énorme masse de données apportée par les plateformes qui gèrent les différents réseaux sociaux, ouvre la possibilité de calibrer les modèles sur ces données empiriques. L'un des enjeux majeurs est l'analyse des dynamiques de propagation de *fake news*, et plus généralement de désinformation, sur les réseaux.

PRODUCTION DE DONNÉES, ACCÈS AUX DONNÉES

Le couplage expérimentation/modélisation est au cœur de la physique. Des freins réglementaires limitant l'accès aux données ont longtemps pénalisé la recherche française sur les mobilités, mais la tendance est à une ouverture de plus en plus large des données. Les progrès récents du suivi automatique par IA, qui peut par ailleurs poser des questions de protection des libertés, facilitent beaucoup les observations en milieu réel.

Concernant les sciences de la société, l'accès aux données est devenu plus facile, mais il reste souvent un obstacle important. L'expérimentation s'est également développée (économie comportementale, expérience de mesure de dynamiques de réseaux dans des contextes particuliers). Diverses initiatives conduisent à la mise à disposition de données en sciences sociales (projet *Humanum* par exemple), et l'accès à des données empiriques de sources variées (données d'organismes publics, données de santé, données d'enquêtes) va devenir encore plus facile, mais il faut que la physique s'implique pour que le stockage des données soit compatible avec leur exploitation quantitative. Par exemple, il est essentiel d'avoir accès à des données non agrégées. La physique doit aussi continuer d'innover pour produire des données — voir par exemple l'expérimentation sur les vols d'étourneaux, ou celles sur les mesures d'interactions dans les écoles ou à l'hôpital en vue d'affiner les modèles épidémiologiques.

DISCUSSION ET CONCLUSIONS

DÉVELOPPEMENT D'UNE EXPERTISE POUR LES CITOYENS

La physique peut occuper une place assez centrale, au carrefour de plusieurs disciplines et de nombreux défis

sociétaux à venir (sobriété énergétique, climat, IA...). Les possibilités de modélisations calibrées sur des données empiriques permettent à la physique de se positionner pour développer des expertises sur de nombreux sujets au profit des citoyens, des collectivités, des organisations ou de l'État. Il s'agit de promouvoir une culture scientifique, amenant une réflexion qui ne soit pas purement théorique ou idéologique, mais ancrée sur des données empiriques fines. Cela doit évidemment se faire en interaction avec d'autres disciplines, et la physique des systèmes complexes a une expérience d'interdisciplinarité qui peut être particulièrement précieuse.

INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

L'IA apparaît au détour de beaucoup des thèmes abordés, sous des formes très variées : souvent comme outil, mais également comme objet d'étude, voire comme objet de crainte, y compris de la part de ceux qui ont contribué à son développement. La physique a des outils pour contribuer aux débats de société qui s'annoncent, et aider à faire évoluer l'IA dans un sens bénéfique pour la société.

LA NOTION DE MODÈLE VA-T-ELLE ÉVOLUER EN PHYSIQUE ?

La notion de modèle est différente d'une discipline à l'autre. Au sein de la physique, différents niveaux de modélisation coexistent et se complètent : modèles «jouets», c'est-à-dire modèles minimaux cherchant à ne considérer que les ingrédients nécessaires pour expliquer un phénomène, ou modèles plus complexes calibrés sur des données pour des comparaisons avec des données empiriques. Dans tous ces cas, les modèles reposent sur une formulation mathématique explicite. L'utilisation des outils du domaine de l'IA conduit à des modèles hybrides, incluant des boîtes noires. Quel statut accorder à ces modèles ? Il semble en tout cas important pour le débat de société de ne pas utiliser le terme de modèle dans le cas d'approches entièrement basées sur des boîtes noires. Il est également important de ne pas confondre les modèles physiques et de simples schémas visualisant des hypothèses de travail ou les conceptions de leurs auteurs.

Ci-contre : Dunes longitudinales reproduites expérimentalement dans l'eau. © Sylvain COURRECH DU PONT/Université Paris Cité/ CNRS Images