

Compte rendu du stage LIESSE

Journées de physique X-ENS-UPS 2023

Les systèmes complexes, 10 au 12 mai 2023

/ Contexte

Les journées ENS – X – UPS de physique, organisées par les départements de physique de l'École Polytechnique et de l'École Normale nous ont permis de découvrir des chercheurs tout aussi passionnés que passionnants. Ces conférences associées à un accueil chaleureux ainsi qu'à des visites de laboratoires de l'École Normale font des journées ENS-X-UPS de physique un moment toujours aussi riche et précieux, que nous ne pouvons que vous recommander.

/ Objectifs

Cette année, les journées étaient consacrées à la thématique « La physique des systèmes complexes ». L'émergence de propriétés nouvelles résultant de comportements collectifs avait été soulignée par le Prix Nobel Philip Anderson dans son désormais célèbre article *More is different*. Plus généralement, la physique des systèmes complexes est une discipline qui étudie les systèmes qui ont de nombreux éléments interagissant de manière complexe et qui peuvent présenter des comportements collectifs non triviaux. Ces systèmes peuvent être très différents, allant des réseaux sociaux aux écosystèmes en passant par les systèmes financiers et les systèmes biologiques.

/ Déroulé du stage

Première conférence

La première conférence était intitulée « An introduction to Econophysics » par Michaël Benzaquen (CNRS, X, ENS, Capital Fund Management). Ce dernier est titulaire de la chaire « Econophysics and complex systems », Laboratoire EconophysiX lab de l'École Polytechnique, cours Physics of financial markets à l'École Polytechnique.

Sa conférence s'est attachée à montrer en quoi l'approche des physiciens permettait de vrais progrès dans l'élaboration de modèles et donc de prévisions dans les domaines de la finance, de la macroéconomie ou de la sociologie. Les comportements agrégés peuvent dans de nombreuses situations s'avérer différents des comportements individuels, tels que le montre la danse des étourneaux en nuée par exemple : en aucune manière l'observation d'un seul étourneau ne permet d'accéder au comportement de la nuée.

Comme le disait Phil Anderson, prix Nobel en 1977, « *More is different* » : *small changes at the individual level can have dramatical effects*.

C'est dans la prise en compte d'interactions complexes au sein de systèmes souvent chaotiques qu'ont lieu les progrès actuels.

Ainsi, les modèles économiques standard considèrent des Homo economicus supposés parfaitement rationnels, informés, homogènes et indépendants, sans considérer l'hétérogénéité des accès à l'information, les influences entre pairs, les décisions dictées par telle ou telle émotion.

Tout comme la physique statistique permet de passer des propriétés d'une molécule à celle d'un gaz, elle permet de passer de l'Homo economicus à une modélisation des comportements de groupe plus proche de la réalité. Il est pour cela indispensable de prendre en compte pour les systèmes socio-économiques l'existence d'interactions entre individus, et d'abandonner les modèles de systèmes linéaires et proches de l'équilibre pour des systèmes non linéaires, avec des hétérogénéités importantes, ainsi que l'existence de discontinuités, équivalentes à des transitions de phase, associées à la possibilité de systèmes métastables. De plus, les temps de relaxation des perturbations économiques sont le plus souvent supérieurs aux temps caractéristiques d'évolution du contexte économique, ce qui nécessite de renoncer aux hypothèses classiques d'équilibre et d'adopter des modèles de systèmes hors équilibre.

Enfin, le développement de l'exploitation massive des données (big data) permet une approche phénoménologique des théories économiques : les prédictions peuvent être confrontées aux données réelles existantes, ce qui n'était pas la démarche des économistes traditionnels. Dans ce cadre-là, les simulations numériques sont incontournables, et permettent également la construction de toy models utilisés pour se forger une intuition.

Cette approche des « économophysiciens » a été proposée pour la première fois en 1987, mais a connu un véritable

essor à la fin des années 2000-2010, dans le sillage de la crise des subprimes. C'est la banque d'Angleterre qui est la plus innovante dans ce type d'approche.

Cette approche s'applique aux marchés financiers, qui ont l'avantage d'être décrits par de très nombreuses données, avec toutefois une certaine déconnexion des marchés réels venant compliquer les prédictions. Ils restent néanmoins des systèmes relativement simples à modéliser.

Les premières propositions d'équations d'état des marchés financiers ont été faites à partir de 2016, en introduisant des paramètres d'état simples tels que le prix des actions, la fréquence des transactions, le volume de ces transactions, le coût d'une transaction boursière, mais aussi la volatilité (mesurant l'importance des fluctuations du cours des actions par unité de temps). Si ces premières équations d'état décrivent très bien le comportement des marchés financiers en temps normal, quels que soient le type de marché ou le style de trading, numérique ou pas (!), elles s'avèrent inopérantes dans des contextes de perturbations voire de crises financières, tout comme le modèle de gaz parfait s'avère inopérant aux pressions élevées. Le but des recherches actuelles est d'exploiter les données associées aux krachs boursiers pour former de nouveaux modèles et tenter de prédire de nouvelles crises à venir.

Il faut toutefois veiller à ne pas forcer l'analogie entre la thermodynamique et la finance. Si la volatilité financière s'apparente bien à la température, il n'existe pas de paramètre jouant directement le rôle de la pression par exemple. En économie, on ne minimise pas l'énergie mais on maximise la satisfaction du système. Actuellement, les notions d'entropie et de coût de l'information sont exclues des théories financières, et la modélisation des interactions (ni inexistantes ni parfaites) reste très difficile. Si les modèles théoriques restent balbutiants, les simulations numériques fonctionnent quant à elles de manière très efficace.

Les problématiques en macroéconomie sont similaires : les modèles classiques utilisent des hypothèses peu réalistes (par exemple, la non-prise en compte des interactions entre les différentes sociétés), les équations les décrivant sont linéarisées, venant gommer les possibilités de modélisation des crises/des discontinuités, alors même que le système est dans ce contexte-là chaotique. La dépendance exponentielle du taux de crise dans les paramètres du modèle rend la démarche très complexe. Elle s'apparente à vouloir faire des prédictions météorologiques sur une trop longue échelle de temps (prévisions fines à un mois). Il semble dans ce contexte intéressant de développer l'équivalent d'une climatologie de la macroéconomie, proposant différents scénarii, permettant de s'y préparer, ce qui n'est pas du tout dans la démarche des économistes actuels.

Enfin, la sociophysique consiste à appliquer des outils et des démarches classiques de la physique à des questions de sociologie, telles que aux USA le vote à la présidentielle ou la ségrégation raciale dans les villes. Pour ce type de question, le machine learning et les simulations numériques sont des outils précieux, associés à des notions physiques telles que l'existence de points critiques, de bifurcations, d'interactions non réciproques, etc.

Cette conférence nous a permis un large tour d'horizon de la manière dont les approches à la frontière entre sciences physiques, sciences économiques et sociales et science des données peuvent mener à des recherches très fructueuses.

Troisième conférence : « Astrophysique non linéaire et interactions entre échelles : une nouvelle voie issue de la science des données ? », par Erwan Allys – ENS Paris, Laboratoire de physique et Centre de science des données

Cette conférence, menée avec tout autant d'enthousiasme que de pédagogie, nous a permis de découvrir de quelle manière il était indispensable de savoir effectuer un traitement complexe des données issues des images du ciel afin de progresser dans les connaissances astrophysiques.

L'une des caractéristiques de l'astrophysique est d'avoir des échelles d'observations et de simulations très variées, de l'amas de galaxie au disque galactique, des étoiles et leurs planètes jusqu'au milieu interstellaire. On retrouve dans ces observations variées des structures caractéristiques (structures filamenteuses, clusters, murs, etc.) qui correspondent à des couplages entre échelles différentes.

Les études menées ont un double objectif : estimer les paramètres physiques à partir des observations obtenues, puis modéliser les phénomènes astrophysiques, ce qui nécessite de séparer les différentes composantes des interactions correspondant aux différentes échelles avant de construire un modèle physique.

Les défis associés sont multiples : les images astrophysiques étant rares, il est nécessaire d'exploiter un unique instant d'observation ; chaque image n'est pas une image isolée mais correspond par ailleurs à une superposition des émissions depuis le big bang, dont certaines ont été absorbées puis réémises. Il n'existe généralement pas de modèle physique ou numérique complet, les simulations sont très onéreuses et ne sont pas encore suffisamment fiables, etc.

Par exemple, l'une des problématiques actuelles est de séparer le rayonnement de corps noir du fond diffus cosmologique (CMB = cosmic microwave background) des autres émissions (le CMB constituant alors un bruit au regard des émissions d'intérêt), et d'en effectuer une décomposition en modes E et B (cela permet de disposer d'une base intrinsèque de polarisation sans avoir à caractériser les directions dans le ciel ; par exemple, les ondes gravitationnelles génèrent exclusivement des modes B). Le mode B est toutefois de cent à mille fois moins lumineux que le mode E dans les avant-plans galactiques. Il est donc nécessaire de disposer de modèles précis à plus de 1 % pour pouvoir le détecter correctement, alors même que ces avant-plans sont associés à des processus largement non gaussiens. Le même type de problématique se pose pour caractériser les émissions dans l'infrarouge des poussières galactiques : CIB (cosmic infrared background ou fond diffus infrarouge).

Ces processus sont largement non gaussiens (les processus gaussiens étant caractérisés de manière unique par leur spectre de puissance, associé à une distribution de probabilité gaussienne). La méthodologie d'analyse en compo-

santes indépendantes est dans ce cadre inefficace. Afin de progresser en exploitant le machine learning et les réseaux de neurones, il est primordial de disposer d'un jeu de données propre, associé à une variance suffisamment faible.

La méthode présentée consiste dans un premier temps à exploiter des transformées de diffusion des paquets d'ondes (wavelet scattering transforms) afin de séparer les différentes échelles tout en s'intéressant aux interactions entre ces différentes échelles.

La maîtrise de ces nouvelles méthodes permet de modéliser les émissions correspondant à des « bruits » (CMB, etc.) en disposant d'un outil qui permet de valider les simulations réalisées. Avec un modèle suffisamment précis du « bruit », il est alors possible de générer des données bruitées puis d'entraîner les réseaux de neurones à effectuer la séparation entre signal d'intérêt et bruit.

Les difficultés s'accroissent encore lorsqu'il existe une superposition entre différents bruits.

Ainsi, la maîtrise de l'analyse des données est encore en plein essor, et permet des progrès indispensables à l'astrophysique moderne.

Quatrième conférence : Physique statistique et comportements collectifs de la matière, par Julien Tailleur (MIT)

On rencontre dans les formes du quotidien de nombreuses structures très organisées, de la coquille des escargots aux nids d'abeille ou aux pommes de pin. Les comportements collectifs sont au cœur de la manière dont ces formes émergent. Les particules colloïdales sont les briques élémentaires de contrôle de la matière, avec de gros progrès dans leur étude à l'équilibre dans le cadre de la physique statistique, qui permet de contrôler les propriétés de nombreux matériaux (de la pâte dentifrice aux écrans LCD).

Il faut toutefois passer à une étude hors équilibre pour une étude dynamique, ce qui est nécessaire pour la matière active, pour laquelle on retrouve des comportements similaires que l'on peut chercher à modéliser (propagation d'onde associée au départ des marathons similaire pour les différents marathons, déplacement des nuées d'oiseaux, déplacement des ovocytes d'étoiles de mer, agrégats de cellules, etc.). L'étude de la matière vivante permet de proposer une description du monde vivant mais aussi d'explorer de nouvelles phénoménologies et de concevoir des systèmes biométriques en disposant d'un cadre théorique pour la matière et les matériaux actifs.

Les interactions microscopiques dans le cadre d'une étude dynamique sont prises en compte par le biais de fluctuations gaussiennes venant s'ajouter à une force moyenne d'interaction.

On s'intéresse dans un premier temps aux notions de pression et d'équation d'état pour les systèmes actifs. En utilisant des pistons ou des roues asymétriques, on montre l'existence de différences notables de comportement entre des molécules de gaz classiques et des particules actives (par exemple, particules Run and Tumble (RTP) de type flagelles), dépendant de la nature du piston ou de la roue.

On peut également étudier une matière active dense en l'absence de forces d'attraction, en s'intéressant aux séparations de phases. Par exemple, pour des particules actives de vitesse suffisamment élevée, on montre à la fois par des manipulations ou des simulations qu'il existe une vitesse minimale de vaporisation du système actif, puis si on augmente encore la vitesse, on observe une transition ré-entrante avec reformation de bulles de liquide. Dans certaines conditions, il existe donc pour les particules actives des clusters en dehors de toute force attractive, et donc en présence uniquement de répulsions. Le mécanisme sous-jacent à un tel phénomène est une distribution inhomogène des vitesses, la vitesse diminuant dans les zones de plus forte densité, ce qui entraîne une accumulation dans ces zones. Dans le cas des particules actives, les bords (la nature de la frontière) jouent un rôle primordial sur les séparations de phases. Ce résultat permet d'expliquer l'auto-organisation des bactéries en colonies aux grandes échelles, alors même qu'une bactérie seule possède un mouvement brownien (ou comment une marche aléatoire persistante mène à la formation d'organisations/de motifs). On montre qu'il y a toujours accumulation des particules actives dans les zones où elles sont les moins motiles ; or, grâce à l'ajout d'une protéine, il est possible de contrôler la vitesse des bactéries localement. Cela permet alors de maîtriser la forme des colonies, voire de les activer dans des zones bien déterminées, ce qui permet de réaliser des micro-gravures.

Ces résultats expérimentaux sont correctement reconstitués par des simulations à l'aide de modèles plus ou moins sophistiqués (par exemple prenant en compte ou pas des termes de production/disparition des bactéries, ou mettant en jeu différentes bactéries avec des phénomènes d'activation ou d'inhibition réciproques).

Il est enfin possible de s'intéresser aux mouvements collectifs (nuées d'oiseaux), associés à des interactions d'alignement, pour lesquels on peut rechercher quels sont les ingrédients minimaux permettant qu'ils aient lieu, et quel type de transition de phase mène à ces mouvements collectifs. Les études sont faites à partir de spins (ferromagnétisme avec alignement des spins voisins) plutôt que des oiseaux, permettant de reproduire différents mouvements (autopropulsion selon un axe, rouleurs colloïdaux permettant d'obtenir des roues microscopiques).

Séverine Mensch, Sonia Najid, Marc Serrero