

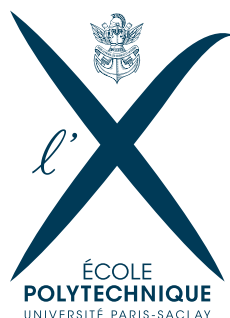


LES JEUDIS DE LA RECHERCHE DE L'X

4 FÉVRIER 2016

**CLIMAT, BIODIVERSITÉ, SANTÉ :
LA COMPLEXITÉ EN ÉQUATIONS**

Modélisation et optimisation des systèmes complexes



LA RECHERCHE À L'X

Patrick Le Quéré, directeur adjoint de l'enseignement et de la recherche

L'École polytechnique s'appuie sur un centre de recherche de pointe qui rassemble 22 laboratoires, dont 21 unités mixtes de recherche avec le CNRS.

Un centre de recherche dynamique et reconnu

Regroupant 1600 personnels de recherche, le centre de recherche de l'X allie l'approfondissement des aspects les plus fondamentaux de la recherche pour le progrès des connaissances au développement de grands domaines plus appliqués qui répondront aux enjeux scientifiques, technologiques et sociétaux du 21^e siècle.

Une stratégie de recherche organisée autour de 8 thématiques

L'École polytechnique a défini 8 thématiques dans sa stratégie de recherche. Ces thématiques de recherche répondent à des enjeux sociétaux et technologiques par le biais de projets transverses et multidisciplinaires, auxquels sont associés les laboratoires de l'École :

- Nanosciences, matériaux innovants et procédés efficaces
- Énergies, transports et environnement
- Bio-ingénierie, biologie et santé
- Matière et lumière en conditions extrêmes
- Structures et lois universelles
- Concepts et méthodes pour la société numérique
- Modélisation et optimisation des systèmes complexes
- Marchés, innovation et relations science et société

Chaque Jeudi de la Recherche de l'X explore une de ces thématiques.

« Modélisation et optimisation des systèmes complexes » à l'École polytechnique

La soif de compréhension et de maîtrise de la complexité du monde dans lequel nous vivons, qu'il s'agisse de la complexité des phénomènes naturels ou celle des artefacts créés par l'activité humaine, a vu la formalisation et la montée en

puissance, ces dernières années, de la science des systèmes complexes. En plein développement, ce domaine intrinsèquement interdisciplinaire, concerne aussi bien les systèmes naturels comme les réseaux de neurones ou la dynamique des protéines intracellulaires que les systèmes artificiels comme les systèmes de contrôle-commande présents dans les avions ou les réacteurs nucléaires, les logiciels supervisant les flux d'information et les marchés financiers, les interfaces hommes-machine...

Constitués de nombreux composants de taille variée et de nature hétérogène, interagissant entre eux et avec leur environnement, l'évolution de ces systèmes ne peut être directement inférée de la connaissance de celle de leurs composants élémentaires. Les systèmes complexes doivent donc faire l'objet d'études spécifiques, que ce soit pour résoudre les difficultés conceptuelles soulevées par leur modélisation, développer de nouvelles théories et de nouveaux langages pour en réaliser des simulations fines, ou encore proposer des optimisations

ou des modes de contrôle de leur comportement... ouvrant ainsi de nouvelles perspectives à l'interface des mathématiques appliquées, informatique, biologie, physique, mécanique, économie, sociologie...

Les exposés de Thomas Dubos, Sylvie Méléard et Marcel Filoche permettront de découvrir toute la puissance de la modélisation mathématique pour mieux modéliser l'évolution du climat, étudier l'évolution de la biodiversité ou mieux soigner les détresses respiratoires...

Nous espérons que ce nouveau « Jeudi de la recherche de l'X » vous permettra de découvrir ou d'approfondir vos connaissances des « systèmes complexes » grâce aux scientifiques de notre centre de recherche, véritable moteur de l'École polytechnique.

Patrick Le Quéré,

Directeur adjoint de l'enseignement et de la recherche

Thomas Dubos



Ancien élève de l'École Normale Supérieure, Thomas Dubos est également agrégé en mathématiques. Il effectue sa thèse de doctorat entre 1999 et 2002 au Laboratoire de Météorologie Dynamique (une UMR École polytechnique / ENS / Université Pierre et Marie Curie / CNRS). Depuis septembre 2002, il exerce les fonctions de maître de conférences puis de professeur chargé de cours au Département de Mécanique et au Laboratoire de Météorologie Dynamique.

Il obtient en 2014 une habilitation à diriger des recherches dans le domaine de « l'écoulement géophysique : turbulence et modélisation ».



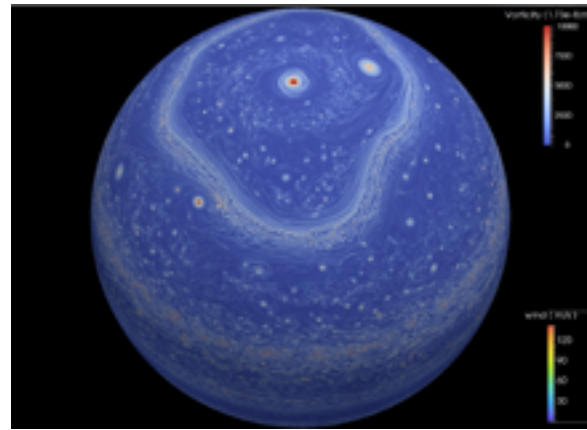
Capturer le climat dans ses moindres détails : vers la modélisation à haute résolution

Thomas Dubos

Aujourd'hui, la modélisation du climat est en général une modélisation *ab initio* – c'est-à-dire reposant, après découpage du domaine spatial en un grand nombre de cellules ou mailles, sur l'application d'un petit nombre de principes et de lois physiques élémentaires à chaque maille. Selon les applications, ces lois tiennent compte de différents facteurs influençant le climat au sein de chaque maille, tels que la végétation, l'océan, la glace de mer ou encore la bio-géochimie marine.

Si cette modélisation se fait sur l'ensemble de la planète, des tailles de maille de l'ordre de quelques centaines de kilomètres permettent une modélisation correcte des caractéristiques globales du climat. Ce type de modélisation souffre cependant d'un manque de détail ne permettant pas de reproduire des phénomènes de petite échelle, pourtant à l'origine d'événements extrêmes aux effets dévastateurs : l'ouragan Katrina en 2005 en étant un exemple. Capturer de tels événements nécessite une maille plus petite.

Intégrer un degré toujours plus élevé de détail dans les modèles implique un volume de calcul toujours plus important qui doit pouvoir être réalisé dans un laps de temps inférieur au déroulement réel des événements pour pouvoir y trouver un intérêt. Ainsi, pour étudier une



transition entre climats glaciaires et interglaciaires, il faudrait que la simulation de 10 000 années nécessite au maximum une année de calcul. Pour y parvenir, il est nécessaire de répartir le travail entre des milliers d'ordinateurs coopérant de manière suffisamment efficace. Cette coopération est appelée « parallélisme » et l'on parle dans ce cas de « haut degré de parallélisme », indispensable pour que le modèle soit utile.

Ce haut degré de parallélisme, obtenu dans le respect d'un certain nombre de contraintes physiques, ouvre la voie à une grande variété d'applications comme l'étude des climats d'autres planètes et en particulier des géantes gazeuses, telles Jupiter et Saturne et des exoplanètes.

Sylvie Méléard



Ancienne élève de l'École Normale Supérieure de Fontenay aux Roses, Sylvie Méléard est agrégée de mathématiques et titulaire d'une thèse de l'Université Paris VI. Elle débute sa carrière à l'Université du Mans, puis à l'Université Pierre et Marie Curie. Elle devient Professeur à l'Université Paris-Ouest Nanterre en 1992, avec une habilitation à diriger des recherches obtenue en 1991. Elle rejoint l'École polytechnique en 2006 et préside le département de Mathématiques appliquées de 2010 à 2014. En 2009, elle monte et inaugure la chaire « Modélisation Mathématique et Biodiversité », partenariat de recherche entre l'École polytechnique, le Muséum national d'Histoire naturelle et Veolia. La chaire a été renouvelée en décembre 2015.

Ses travaux de recherche portent sur la modélisation et l'étude de phénomènes aléatoires liés à la physique statistique et plus récemment à l'écologie et à l'évolution. Sylvie Méléard est l'auteur de nombreuses publications et est lauréate du prix « La Recherche 2013 » et chevalier de la Légion d'honneur.



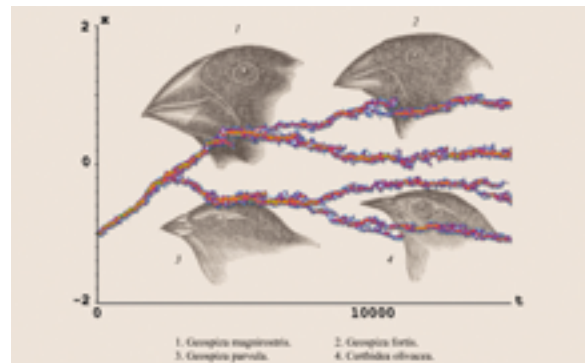
Modélisation mathématique de la biodiversité : une contribution à la compréhension de l'évolution du vivant

Sylvie Méléard

Quand les mathématiques s'allient à l'écologie, cela ouvre de nouvelles perspectives dans la compréhension des phénomènes naturels complexes. Les premiers modèles statistiques élaborés dans les années 1970 fournissaient des résultats controversés par la trop grande simplification des phénomènes naturels. Avec les outils d'analyse les plus récents, il est aujourd'hui possible de mettre en équation des phénomènes écologiques en intégrant de plus en plus leur complexité. L'objectif est de fournir des modèles sur l'évolution probable des écosystèmes, en prenant en compte les différentes échelles des paramètres qui interviennent : démographiques, écologiques et évolutionnaires.

Même s'il est impossible de réduire la biodiversité à de simples équations, l'étude mathématique apporte néanmoins une analyse rigoureuse, quantitative, dépassionnée et objective dans la compréhension des écosystèmes. Elle va également aider à traiter la quantité de plus en plus importante de données récoltées ces dernières années. Les applications de ces recherches interviennent dans des domaines extrêmement variés, allant de l'aménagement du territoire aux questions de santé.

Les équations mathématiques peuvent fournir un outil concret aux décideurs impliqués dans la gestion des espaces. Par exemple, elles peuvent aider à comprendre l'influence de l'organisation spatiale d'un territoire sur l'évolution de la population animale au sein de cet espace, pour répondre à des questions telles que : quel



est l'impact d'une fragmentation d'habitat sur l'évolution des traits génétiques ? Quelle influence exerce la forme du territoire sur la survie globale de l'espèce ? Faut-il construire de grandes réserves animales ou de petites surfaces connectées par des canaux de migration ?

Les apports des mathématiques en écologie et en évolution ont aussi des applications dans le domaine de la santé, comme par exemple la compréhension de la résistance aux antibiotiques ou de l'évolution phénotypique des cellules tumorales. En s'attaquant à des cellules cancéreuses, certains lymphocytes induisent une forme de sélection naturelle, qui va permettre aux cellules les plus résistantes de s'adapter mieux aux agressions de leur environnement. Pour mettre en place une immunothérapie efficace, il faut pouvoir tenir compte de l'évolution de ces phénotypes.

Appliquées au domaine de l'écologie, les mathématiques constituent un outil neutre et précis de compréhension, de quantification et de prédiction et permettent d'envisager de nouvelles perspectives.

Marcel Filoche



Ancien élève de l'École polytechnique (X 1982) et diplômé de Telecom ParisTech (1985), Marcel Filoche est titulaire d'un doctorat en physique de l'Université Paris-Sud. De 1991 à 1996, il a dirigé le groupe de simulation numérique du Laboratoire de Bagneux (France Telecom R&D), puis a rejoint le laboratoire de Physique de la Matière Condensée (une UMR École polytechnique / CNRS) en tant que chargé puis directeur de recherche CNRS. Il dirige également la chaire d'enseignement de Physique de l'École des Mines ParisTech.

Ses travaux portent sur les propriétés de transport des particules, fluides et ondes dans les milieux à géométrie complexe, en particulier dans le poumon humain. Dans ce cadre, il codirige également scientifiquement un groupe de recherche à l'Institut Mondor de Recherche Biomédicale. Il est l'auteur de plus de 80 publications dans des revues internationales, lauréat du Prix La Recherche 2005 et d'une bourse Fulbright en 2011.



La mécanique des fluides au service de l'efficacité thérapeutique : Le traitement des détresses respiratoires

Marcel Filoche



Le poumon est un organe complexe constitué d'un réseau de bronches dans lequel l'air est conduit jusqu'aux alvéoles, lieux où s'opèrent les échanges gazeux entre l'air et le sang. Ces alvéoles sont normalement tapissées d'une substance liquide, appelée surfactant, qui permet leur dilatation et contraction régulières durant la respiration. Or l'absence ou le manque de surfactant entraîne des détresses respiratoires chez le nouveau-né prématuré et participe au syndrome de détresse respiratoire aiguë chez l'adulte (SDRA). L'un des traitements préconisés consiste en l'administration directe de surfactant dans la trachée du patient. Cependant, son efficacité reste limitée. Ainsi, près de 35% des bébés prématurés ne répondent pas au traitement par substitution de surfactant et cette thérapie n'a pas connu le succès escompté chez l'adulte.

La mise au point du premier modèle physico-mathématique permet aujourd'hui de comprendre les mécanismes qui régissent le transport d'un médicament liquide par voie

trachéo-bronchique. Ces travaux ouvrent la voie à une révision complète des essais passés et à une revisite possible de voies thérapeutiques abandonnées. En effet, grâce à ce modèle, il a pu être démontré que les hypothèses classiques qui sous-tendent les essais cliniques ne sont pas toujours vérifiées. Le système pulmonaire est très complexe et le trajet du surfactant administré dépend de ses propriétés physico-chimiques, de la taille du patient ou encore de la méthode d'administration.

Pour aboutir à un tel modèle, les chercheurs ont intégré des données de l'architecture pulmonaire tridimensionnelle (bronches, bronchioles, alvéoles), les propriétés du fluide (viscosité, densité), les lois d'interactions entre fluide et paroi et les mécanismes de séparation à chaque bifurcation en fonction de l'orientation et de la gravité. Grâce à ce nouvel outil, les médecins et les laboratoires pharmaceutiques peuvent espérer ainsi améliorer la prédiction de l'efficacité thérapeutique et individualiser les traitements pour les adapter à chaque patient.

Contact

Cécile Mathey

01 69 33 38 70 - 06 30 12 42 41
cecile.mathey@polytechnique.edu





ÉCOLE POLYTECHNIQUE
91128 PALAISEAU CEDEX
www.polytechnique.edu