

COLLOQUE

VERS UNE SCIENCE DES SYSTÈMES COMPLEXES

21, 22 ET 23 MARS 2007

AUDITORIUM DU CNRS
3, RUE MICHEL-ANGE 75016 PARIS

<http://www.rnsc.fr>

RNSC Réseau National des
Systèmes Complexes



Inserm



PRÉSENTATION

Structurés sur plusieurs niveaux d'organisation, composés d'entités hétérogènes en interaction, les systèmes complexes recouvrent aussi bien les systèmes sociaux et les systèmes naturels, des macromolécules du vivant jusqu'à la biosphère que les systèmes artificiels sophistiqués dont l'homme s'entoure et qui s'inspirent de plus en plus des systèmes naturels.

À un niveau d'organisation donné, la structuration en réseau des entités fait émerger des superstructures relevant du niveau supérieur qui modifient en retour les potentialités voire l'individuation de ces entités. Les perturbations, les contraintes et les frustrations produites à un niveau affectent les entités de ce même niveau mais aussi celles des autres niveaux d'organisation. Les systèmes adaptatifs complexes se caractérisent par une robustesse aux perturbations et aux frustrations. À chaque niveau, leur évolution fait explorer de nouvelles variations dans la classe des possibles et opère une sélection. Chargés d'histoire, sensibles aux conditions de leur origine et de leur environnement, les systèmes complexes posent des problèmes redoutables pour leur observation comme pour leur modélisation et pour l'intervention en leur sein.

Deux types de démarches interdisciplinaires sont principalement possibles. La première consiste à se donner un objet de recherche intrinsèquement multidisciplinaire comme dans le cas de la cognition : elle conduit à poser différentes questions sur un même objet à partir de points de vue qui peuvent être très divers. La seconde consiste à étudier une même question à propos d'objets de recherche différents. C'est cette seconde démarche qui relève d'une science des systèmes complexes. Mais ces deux démarches, duales l'une de l'autre, sont intrinsèquement liées dans la conception de nouveaux protocoles et de nouveaux modèles et formalismes pour la reconstruction des phénomènes émergents et des dynamiques à toutes les échelles.

C'est dans cet aller-retour entre l'acquisition massive de données sur la base d'hypothèses modélisatrices et leur reconstruction par la modélisation qu'une science des systèmes complexes peut se développer. Il reste beaucoup à faire au plan théorique, sur la base des avancées du siècle passé, pour disposer de concepts et de modèles qui fournissent des explications élégantes aux phénomènes émergents.

Mercredi 21 mars

- 9h30-10h00 **Catherine Bréchnac** (PDG CNRS)
Marion Guillou (PDG INRA)
Christian Bréchet (DG Inserm)
- 10h00-10h20 **Ralph Dum** : Systèmes complexes dans les 6^e et 7^e programme cadre.
- 10h20-10h45 Pause
- 10h45-11h30 **Rolf Pfeifer** : *Morphological computation – connecting brain, body, and environment.*
- 11h30-13h00 **Philippe de Reffye** : Systèmes dynamiques de l'architecture et de la production végétales.
Philippe Davy : Fractures et complexité.
- DÉJEUNER
- 14h00-15h30 **Nadine Peyriéras** : Vers une reconstruction des dynamiques multi-échelles dans la morphogenèse animale.
Pierre Auger : Méthodes d'intégration des niveaux d'organisation et d'agrégation de variables avec des exemples écologiques.
- 15h30-16h00 Pause
- 16h00-17h30 **François Amblard** : Dynamique complexe des processus cellulaires : Résultats et perspectives pour la biologie cellulaire et la physico-chimie.
Stéphane Douady : Qui contrôle la morphogénèse ?
- 17h30-19h00 Projets

PROGRAMME

Jeudi 22 mars

8h30 - 10h45 **Yves Burnod** : Comprendre le Cerveau qui Apprend.
Christophe Godin : Vers un méristème virtuel
Georgia Barlovatz-Meimon : Morphologie cellulaire, migration et métastases : trois niveaux du « PAI-1 swing »

10h45-11h30 Pause

11h30-13h00 **Fabrice Wendling** : Transitoires et crises épileptiques : signaux et modèles dynamiques.
Olivier François : La mauvaise herbe : origine du commensalisme.

DÉJEUNER

14h00-15h30 **Hugues Chaté** : Universalité et émergence en physique statistique.
Jean-Louis Dessalles : Emergence d'une communication honnête entre agents égoïstes.

15h30-16h00 Pause

16h00-17h30 **Philippe Tracqui** : Émergence de réseaux cellulaires arborescents : approches continues versus modélisation cellule-centrée de dynamiques complexes multi-échelles.
André Orléan : Réflexions sur l'apport de la théorie des systèmes complexes à l'analyse des faits sociaux.

17h30-19h00 Projets

Vendredi 23 mars

8h30 - 10h45 **Guillaume Beslon** : De l'évolution à l'évolvabilité : exploration par la simulation.
Helena Frankowska : Robustesse et régulation de systèmes, une approche viabiliste.
Guillaume Deffuant : Peut-on gérer la résilience de systèmes complexes ?

10h45-11h30 Pause

11h30-13h00 **Marie Cottrell** : Reconstruction de trajectoires dans un système économique.
Bernard Hubert : La représentation des systèmes complexes et leur transformation.

DÉJEUNER

14h00-16h15 **Emmanuel Grenier** : Divers modèles d'accidents vasculaires cérébraux
Jean-Benoît Zimmermann : Influence sociale, avalanches et apprentissage.

16h15-16h45 Pause

16h45-18h00 **Pablo Jensen** : Prédire les emplacements commerciaux grâce aux outils des systèmes complexes.
Marc Barthélémy : Les réseaux complexes : Des infrastructures critiques à l'Épidémiologie.

18h00-19h00 Table ronde : Systèmes complexes comme nouvelle interdisciplinarité avec **Antoine Petit, Pierrick Givone, Alain Storck, Thierry Coulhon, Jacques Boulègues.**

Systèmes complexes dans les 6^e et 7^e programme cadre

Ralph Dum

European Commission
Information Society and Media - Future and Emerging Technologies
DG INFSO/F1 J54 01/118 _1049 Bruxelles

Résumé

L'informatique vit actuellement une révolution qui met fin à l'ère des théories de Shannon, Neumann ou Turing. En inventant le concept de « software », Von Neumann avait déplacé la complexité dans le logiciel seul, reléguant le « hardware » au second plan. Mais cette dichotomie logiciel/matériel semble de plus en plus périmée. Les logiciels omnipotents vont laisser place aux nanotechnologies et au biologique. Il sera bientôt plus simple de programmer le substrat matériel - bio, nano, quantique - que de gérer la complexité des logiciels. Turing - du moins dans son interprétation contemporaine - n'avait pas considéré l'informatique répartie sous la forme de million d'ordinateurs coopérant pour calculer et modéliser ce qui pose aujourd'hui des problèmes théoriques inédits. C'est dans ce contexte que la science des systèmes complexes offre l'opportunité de réviser les fondements de l'informatique en dépassant le monde de l'information binaire et en s'inspirant du traitement de l'information à l'œuvre dans le vivant.

Les progrès de l'informatique vont accompagner la modélisation mathématique dans tous les domaines scientifiques. Grâce au calcul distribué sur une grande

quantité d'ordinateurs, les sciences computationnelles vont permettre de simuler des systèmes complexes qui mettent en jeu des millions de constituants hétérogènes en interaction, tels que des systèmes sociaux, économiques, biologiques, écologiques ou climatiques. Reste à réfléchir à la façon dont ces simulations peuvent être exploitées. On assiste au déclin de l'utopie déterministe et de l'idée même de la nécessité d'une prédiction déterministe. Les modélisations et les simulations seront « hybrides », ancrées dans les données réelles : cette vision empiriste de la modélisation combine des aspects probabilistes et plus classiquement déterministes. Il faut notamment envisager les systèmes à leurs différentes échelles spatiales ou temporelles. La connaissance des propriétés systémiques à un niveau donné n'est pas nécessairement dépendante de la connaissance approfondie des propriétés de ses composants.

La science des systèmes complexes va accompagner l'entrée dans une nouvelle ère technologique et scientifique en ouvrant la voie à l'étude des propriétés d'émergence des systèmes. Cet exposé se propose de retracer l'évolution des financements des systèmes complexes dans les programmes cadres FP6 et FP7 de l'UE.

Morphological computation

Connecting brain, body and environment

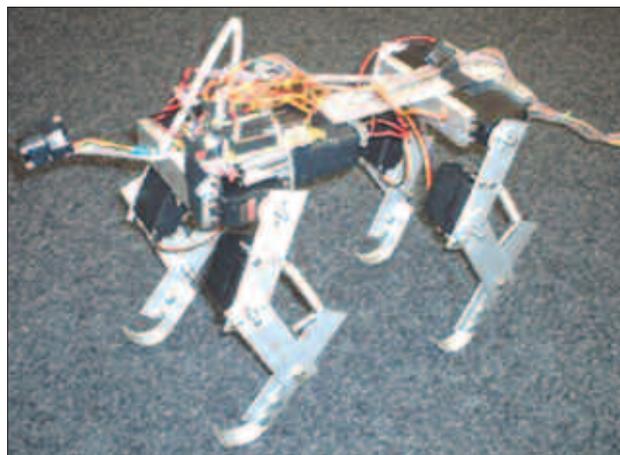
Rolf Pfeifer

Artificial Intelligence Laboratory, University of Zurich, Switzerland

Résumé

Traditionally, in robotics, artificial intelligence, and neuroscience, there has been a focus on the study of the control or the neural system itself. Recently there has been an increasing interest into the notion of embodiment – and consequently intelligent agents as complex dynamical systems – in all disciplines dealing with intelligent behavior, including psychology, cognitive science and philosophy. In this talk, we explore the far-reaching and often surprising implications of this concept. While embodiment has often been used in its trivial meaning, i.e. “intelligence requires a body”, there are deeper and more important consequences, concerned with connecting brain, body, and environment, or more generally with the relation between physical and information (neural, control) processes. Often, morphology and materials can take over some of the functions normally attributed to control, a phenomenon called “morphological computation”. It can be shown that through the embodied interaction with the environment, in particular through sensory-motor coordination, information structure is induced in the sensory data, thus facilitating perception and learning. An attempt at quantifying the amount of structure thus generated will be introduced using measures from information theory. In this view, “information structure” and “dynamics” are

complementary perspectives rather than mutually exclusive aspects of a dynamical system. A number of case studies are presented to illustrate the concepts introduced. Extensions of the notion of morphological computation to self-assembling, and self-reconfigurable systems (and other areas) will be briefly discussed. The talk will end with some speculations about potential lessons for robotics and intelligent and cognitive systems as outlined in the conclusions of the EU/ERCIM “Beyond-the-horizon” initiative.



Systèmes dynamiques de l'architecture et de la production végétales

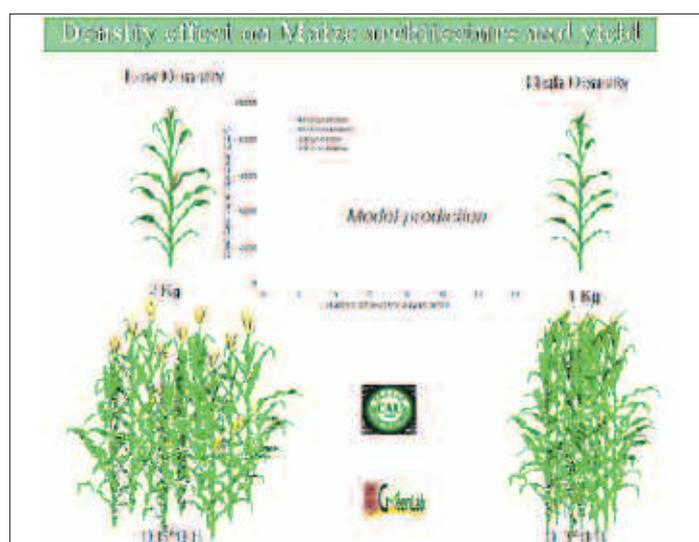
Philippe de Reffye

est chercheur de l'AMAP, Unité Mixte de Recherche Cirad-Cnrs-Inra-Ird-Université Montpellier 2 qu'il a créé en 1988. Actuellement il est responsable de l'équipe DigiPlante de l'Inria (commune Ecp-Cirad) et du projet GreenLab du laboratoire Franco-Chinois Liama de l'Institut d'Automatique de Pékin.

Résumé

La mise en œuvre des modèles Botanique et Ecophysiologique de l'architecture végétale s'est appuyée d'abord sur la simulation numérique, pour imiter la construction et le fonctionnement pas à pas de la structure de la plante où les organes jouent leurs rôles sources-puits. Ces méthodes aboutissent à des coûts de calcul et de mémoire qui rendent problématique l'étude du comportement du modèle, sa validation et les applications en Agriculture. Le modèle GreenLab présenté ici, vise à remplacer la simulation par un système d'équations dynamiques équivalent sur le plan numérique. Les paramètres du modèle caractérisent d'une façon fine le

développement et la croissance de la plante. La reconstruction géométrique de l'architecture toujours possible, n'est plus nécessaire et les hautes performances du modèle permettent sa calibration sur les plantes cultivées. L'architecture végétale fournit de nouveaux outils à l'Agronomie pour modéliser la production végétale au niveau du peuplement sous l'effet des paramètres de l'environnement (climat, sol, densité). Les applications visées sont l'optimisation des itinéraires culturaux (irrigation, traitements, densité) et de nouveaux critères quantitatifs pour la sélection végétale.



Fractures et complexité

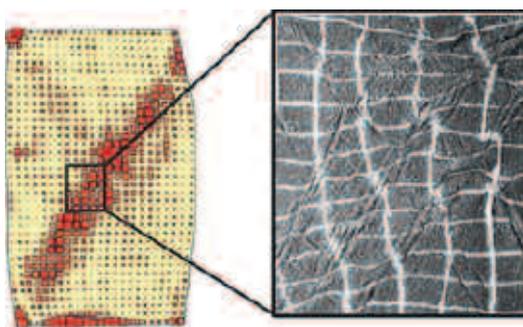
Philippe Davy

Directeur de recherche CNRS Géosciences Rennes, UMR 6118 CNRS/Université de Rennes/Campus de Beaulieu, 35042 RENNES Cedex, France

Résumé

Nombre de phénomènes géologiques peuvent être définis comme des systèmes complexes pour des raisons qui tiennent à la fois à leur structure, à la diversité des interactions et à leur dynamique propre. La fracturation observée par les géologues est emblématique de cette complexité "naturelle". À la base, le phénomène correspond à une forte localisation de la déformation au sein du milieu, et implique des échelles de temps et d'espace sur plus d'une dizaine d'ordres de grandeur. La reconnaissance de formes self-similaires, et leur théorisation, a ouvert de nouvelles pistes de recherche : le rôle des effets coopératifs multi-échelle, les processus d'auto-organisation, et/ou les classes d'universalité du

processus et le rôle de l'hétérogénéité initiale des milieux. On est loin d'une approche unificatrice reconnue mais ces recherches sont des voies pour décrire la physique d'un phénomène dont la structure multi-échelle, telle qu'elle est observée, n'a jamais pu être reproduite numériquement. Les fractures jouent aussi un rôle sur les écoulements souterrains avec des enjeux scientifiques et sociétaux importants (gestion de l'eau souterraine, exploitation pétrolière, stockage souterrain de déchets toxiques, ..). Dans ce cas, la question scientifique est la reconstruction d'un milieu complexe à partir d'une information très parcellaire vis-à-vis de l'hétérogénéité du milieu.



Expérience analogique simulant la déformation d'un système tectonique. À gauche, le champ de déformation mesuré sur la surface de l'expérience ; à droite une vue de détail qui souligne le caractère multi-échelle des réseaux de failles (Bonnet, 1996)

Vers une reconstruction des dynamiques multi-échelles dans la morphogenèse animale

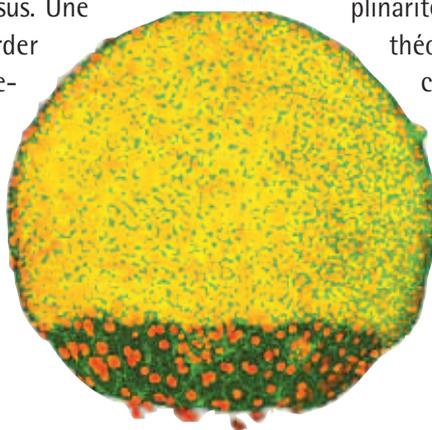
Nadine Peyriéras

CNRS-DEPSN, Avenue de la Terrasse, 91198 Gif sur Yvette

Résumé

La morphogenèse animale recouvre les processus sous-jacents à l'individuation des formes observées à différentes échelles d'organisation tout au long du cycle de vie réitéré au fil des générations. Une telle description nous conduit à prendre en compte dans une approche expérimentale et théorique des processus de la morphogenèse, différentes échelles spatiales et temporelles, et à toutes ces échelles, les dynamiques d'un grand nombre de constituants hétérogènes en interaction. La perspective de l'intégration des processus biologiques par la cellule nous a conduit à mettre tout d'abord en œuvre une reconstruction de la morphogenèse à partir de l'observation *in vivo* des comportements cellulaires dans des organismes choisis pour leur accessibilité et la transparence de leurs tissus. Une telle stratégie nous permet d'aborder d'une manière systématique le déploiement spatio-temporel de l'arbre du lignage cellulaire, l'émergence de comportements collectifs de populations cellulaires et la compartimen-

tation de sous-arbres du lignage cellulaire, l'individuation de motifs et leur interprétation en termes de contraintes bio-mécaniques dans l'embryon et de rétrocontrôle de la forme globale sur les comportements locaux qui sont autant d'aspects pertinents au plan d'une compréhension de la morphogenèse. La reconstruction des morphodynamiques cellulaires au cours de l'embryogenèse sert de fondement au couplage des processus génétiques, moléculaires et cellulaires. Nous envisagerons ici la possibilité de caractériser la dynamique spatio-temporelle d'un réseau d'interactions génétiques et moléculaires à l'œuvre dans un champ morphogénétique au cours de l'embryogenèse précoce du *Danio rerio*. Notre défi est aussi celui d'une nouvelle interdisciplinarité qui suppose une interaction entre théoriciens et expérimentateurs, depuis la conception des protocoles expérimentaux, jusqu'à l'élaboration des outils théoriques nécessaires à la reconstruction des données et à leur interprétation.



Embryon de zébrafish à 8h00 de développement après la fécondation (à 28°C). Toutes les cellules de l'embryon sont marquées par des protéines fluorescentes qui colorent noyaux (rouges) et membranes (vertes). Image extraite d'une séquence 4-D prise en microscopie biphotonique à balayage laser résolue en temps. Ce type d'imagerie permet la reconstruction du lignage cellulaire et la mesure de paramètres cellulaires pertinents pour concevoir une modélisation des processus cellulaires de la morphogenèse.

Méthodes d'intégration des niveaux d'organisation et d'agrégation de variables avec des exemples écologiques

Pierre Auger

IRD UR 079 GeodesCentre d'Ile de France de l'IRD32 avenue Henri Varagnat93143 Bondy cedexet ISC ENS Lyon

Résumé

Une approche classique de la modélisation en biologie consiste à construire et à étudier un système dynamique non linéaire comme par exemple, un système d'équations différentielles ordinaires, un ensemble d'équations aux différences, ou encore un système d'équations aux dérivées partielles. Les modèles mathématiques utilisés dans le domaine des systèmes Biologiques comportent en général un grand nombre de variables couplés. Il s'agit de systèmes dynamiques non linéaires qui sont en général difficiles à étudier analytiquement. Les « méthodes d'agrégation de variables » ont pour but de construire à partir d'un modèle détaillé, un modèle réduit ne gouvernant que quelques variables globales à long terme. Cette méthode est basée sur la constatation que les systèmes biologiques présentent une organisation « hiérarchique » (i.e. en niveaux d'organisation emboîtés, du plus macroscopique au plus microscopique, un peu à la façon des poupées russes), avec des échelles de temps caractéristiques de chacun de ces niveaux assez différentes. Les méthodes d'agrégation de variables permettent de passer d'un niveau d'or-

ganisation « microscopique » à un niveau plus « macroscopique » et d'étudier les phénomènes d'émergence de propriétés globales. Les systèmes écologiques sont composés de différents niveaux d'organisation, du niveau de l'individu au niveau de la population et de la communauté. Le couplage des dynamiques se réalisant dans ces différents niveaux constitue un challenge important. Je présenterai des modèles de dynamique d'une population et d'un système proie-prédateur dans lesquels les comportements individuels sont pris en compte, par exemple lorsque les individus d'une population disputent, à des congénères ou des individus d'autres espèces, l'accès à une ressource, surtout lorsqu'il s'agit d'une ressource limitée. Dans ce cas, la plus ou moins grande agressivité manifestée dans ces conflits peut retentir de façon non négligeable sur la croissance des populations concernées et la stabilité des communautés. Je présenterai pour finir quelques exemples de modèles de dynamique de populations dans un milieu constitué par un ensemble de sites discrets connectés par des migrations rapides.

Dynamique complexe des processus cellulaires : résultats et perspectives pour la biologie cellulaire et la physico-chimie

François Amblard

Institut Curie, CNRS UMR168Equipe "Physique du cytosquelette"11, rue Pierre et Marie Curie - 75005 Paris

Résumé

La notion de dynamique en biologie cellulaire est ambivalente, et recouvre des processus très variés. À partir de l'observation de la structure microscopique du cytosquelette et de ses propriétés d'autoassemblage, nous présenterons le cadre problématique dans lequel nous explorons la dynamique des processus cellulaires liés à la morphogenèse, à la motilité cellulaire, ou à la formation de tissus. Nous présenterons quelques résultats obtenus in vivo et in vitro à l'aide de méthodes nouvelles, et nous dégagerons les verrous conceptuels et méthodologiques actuels. Enfin, nous tenterons d'établir un lien opérationnel entre les points de vue et langages de la physiologie et de la physico-chimie.

Qui contrôle la morphogénèse ?

Stéphane Douady

MSC (Matière et Systèmes Complexes), CNRS/Paris-Diderot
10 rue Alice Domon et Léonie Duquet
75205 Paris Cedex 13

Résumé

Ce titre s'inspire des titres d'article de biologie, où la notion de contrôle (par les gènes, les molécules) est essentielle. Et pourtant c'est bien cette notion même de contrôle qui est à parfois à remettre en cause. Le plus souvent, on n'observe pas "quelque chose" qui contrôle "un résultat", mais plutôt un système qui "s'auto-organise". Si des éléments sont nécessaires, ce n'est pas pour autant la preuve "qu'ils contrôlent". On peut en donner un exemple dans la morphogénèse des dunes, où la stabilité et la reproductibilité des barchanes pourrait rappeler un contrôle biologique. Et pourtant on peut expliquer que la forme n'est que le résultat d'un processus spontané, où c'est la forme elle-même qui dicte sa propre évolution, qui s'auto-régule. Dans le cas "de la complexité", et en particulier en biologie, ne vaut-il pas mieux abandonner l'image hiérarchique et causale pour celle de l'autogestion ?

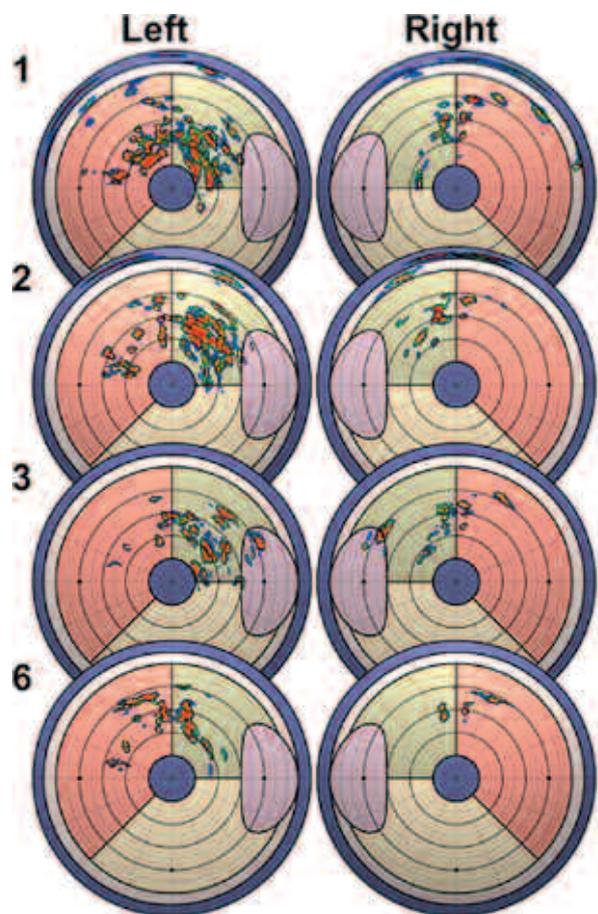
Comprendre le Cerveau qui Apprend

Yves Burnod

Directeur de recherche à l'INSERM, a créé un labo INSERM qui réunit des chercheurs qui modélisent les bases neurales des apprentissages et étudient en imagerie (IRMf, MEG) la plasticité cérébrale dans les situations normales et pathologiques. Il a dirigé l'Institut des Sciences Cognitives regroupant des disciplines allant des Neurosciences cellulaires à la linguistique, et coordonné plusieurs programmes internationaux associant neurosciences, imagerie cérébrale, psychologie et technologie.

Résumé

Une grande question scientifique qui intéresse au plus haut point la société est de mieux comprendre le cerveau qui apprend : comprendre à la fois les potentialités du cerveau de l'enfant et ses fragilités, celles du cerveau de l'adulte et de la personne âgée, dans les pathologies, les maladies génétiques, les lésions, les dégénérescences, comprendre la plasticité cérébrale et la capacité d'apprendre ou de réapprendre. L'imagerie cérébrale accumule de façon très rapide les résultats sur les circuits cérébraux qui sont mis en jeu dans l'apprentissage et les fonctions cognitives associées (communication, attention, motivation...). Ces résultats révèlent les dynamiques de recrutement des réseaux cérébraux pendant les phases d'apprentissage, et montrent une très grande mobilisation des différentes parties du cerveau autour des régions qui acquièrent une nouvelle fonction. De même, les résultats montrent que dans les situations pathologiques, des réseaux très larges se mobilisent pour tenter de compenser les déficits et réapprendre la fonction perdue (cas des tumeurs, des AVC, des greffes, des dégénérescences...). On est confronté à quatre enjeux pour comprendre les bases neurales et cérébrales des capacités d'apprentissage chez l'homme : un premier enjeu est de comprendre les liens de causalité entre les processus moléculaires (propriétés des gènes, des canaux ioniques, des synapses étudiés en génétique, embryologie, neurosciences) et les propriétés adaptatives des réseaux de neurones impliqués dans l'apprentissage (neurosciences intégrées et computationnelles). Un deuxième enjeu est de comprendre les liens de causalité entre ces propriétés adaptatives des réseaux neuronaux et les activations cérébrales observées en imagerie lors d'un apprentissage. Un troisième enjeu est de comprendre comment les



réseaux cérébraux étudiés en imagerie (bases cérébrales des fonctions) s'intègrent dans une même unité fonctionnelle, celle du cerveau qui apprend, en relation avec sa maturation et son histoire (psychologie du développement). Un quatrième enjeu est de comprendre l'efficacité des pratiques pédagogiques à la lumière d'une compréhension unifiée de l'ensemble des dynamiques des réseaux cérébraux qui sous-tendent l'apprentissage.

Vers un méristème virtuel

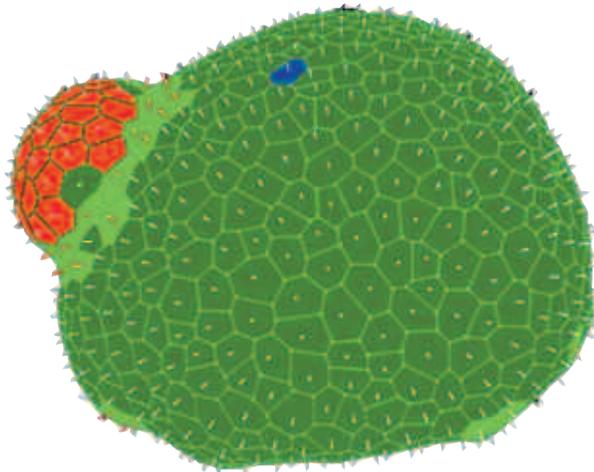
Christophe Godin

Equipe INRIA/CIRAD/INRA Virtual Plants UMR DAP - Développement et Amélioration des Plantes TA40/02, Cirad, Avenue Agropolis 34398 MONTPELLIER CEDEX 5, France

Résumé

Gâce à l'essor important de la biologie moléculaire et des nouvelles technologies d'observation associées, il est devenu récemment possible d'accéder aux mécanismes génétiques et hormonaux impliqués dans l'organogenèse des plantes. Ces mécanismes, encore mal compris, se déroulent essentiellement au sommet des tiges, dans de petites zones tissulaires au caractère embryogénique, appelées méristèmes. Ils combinent activation des gènes, signalisation bio-chimique et interaction mécanique entre cellules dans un processus de développement qui conduit à l'émergence de

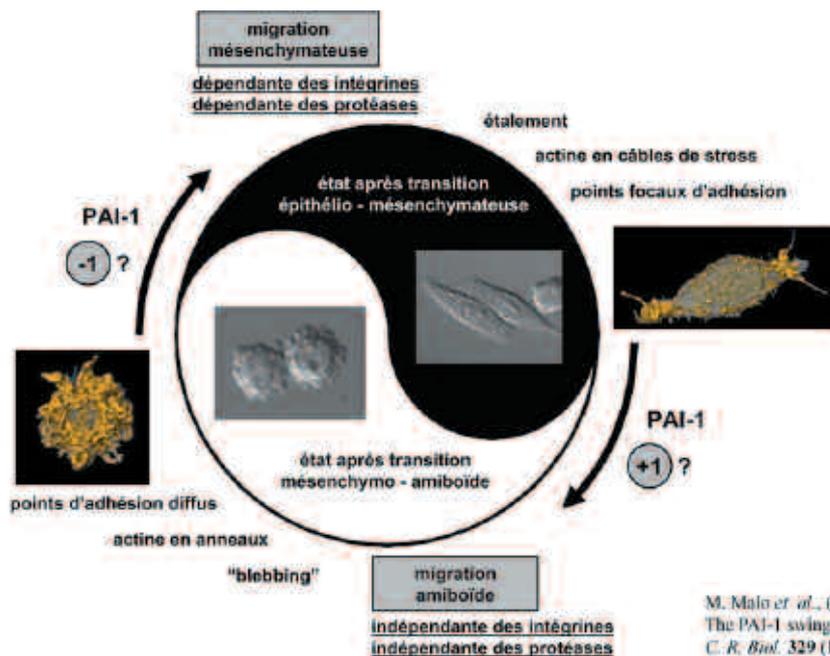
nouveaux organes à la surface des méristèmes. La construction de méristèmes virtuels permet d'analyser et de mieux comprendre cette interaction gènes/processus-physiologiques/forme. Ces modèles sont l'objet d'un travail de recherche important au carrefour de la biologie, des mathématiques et de l'informatique. Dans cet exposé, nous essaierons de faire le point sur ce sujet en plein essor à l'échelle internationale et de donner un aperçu des questions qui se posent et des méthodes qui sont développées dans ce contexte.



Morphologie cellulaire migration et métastases : trois niveaux du « PAI-1 swing »

Georgia Barlovatz-Meimon

Laboratoire « Informatique, Biologie Intégrative et Systèmes Complexes » IBISC FRE 2873 CNRS-Université d'Evry 523 Place des Terrasses Evry 91000 et Université Paris 12, Créteil.



Résumé

L'échappement métastatique est un processus complexe résultant de dysfonctionnements à différents niveaux (modifications génétiques, adhésion cellulaire, modifications du micro-environnement, et effets coopératifs des interactions et communication des cellules tumorales avec les cellules saines...) En 1889, Stephen Paget observait, suite à l'analyse de plus de 900 rapports d'autopsie, que les métastases ne se produisaient pas de manière aléatoire. Il a alors postulé l'hypothèse, maintenant célèbre, du « seed and soil ». Cette hypothèse veut que certaines cellules tumorales (la semence - seed) aient une affinité particulière pour l'environnement de certains organes (le sol - soil). La croissance d'une métastase dépend donc de la compatibilité de la semence avec le sol ; qu'en est-il de la migration ? En effet, le processus métastatique implique à la fois la

migration de la cellule qui s'échappe et la capacité de proliférer ensuite. Ces deux comportements, exclusifs l'un de l'autre pour une même cellule, peuvent-ils être induits par l'environnement ? Nous avons mis en évidence une protéine environnementale, PAI-1, qui pourrait contrôler les changements de comportements de cellules cancéreuses. PAI-1 promeut des modifications morphologiques (blebbing) associées à la migration amaeboïde, considérée aujourd'hui comme caractéristique des métastases. La boucle d'interactions activée par des cellules tumorales mises en présence de cette protéine environnementale s'ajoute aux boucles multiples et complexes décrites au niveau intracellulaire. L'identification des points critiques dans ces comportements pourrait nous permettre d'identifier de nouvelles cibles thérapeutiques.

Transitoires et crises épileptiques : signaux et modèles dynamiques

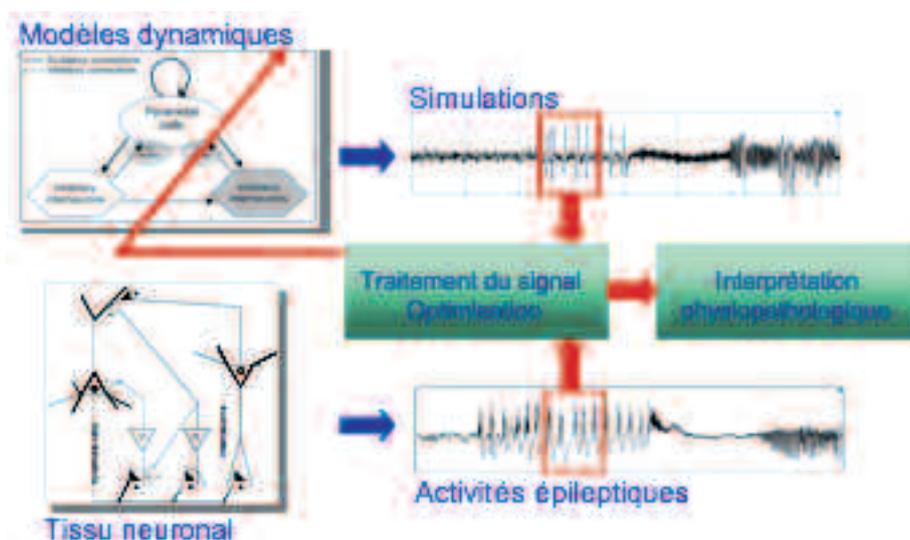
Fabrice Wendling

Laboratoire Traitement du Signal et de L'Image INSERM U642
UNIVERSITE DE RENNES 1, Campus de Beaulieu 35042 Rennes Cedex - France

Résumé

La nature complexe, aléatoire, des données électrophysiologiques a conduit, aux cours des années passées, à une utilisation plus intensive des méthodes de traitement du signal. Celles-ci apportent des informations essentiellement descriptives et les résultats qu'elles produisent ne peuvent, à eux seuls, permettre de progresser significativement dans la compréhension des mécanismes impliqués dans la génération des activités épileptiques. La modélisation des systèmes neuronaux permet de dépasser la simple description des observations, en générant des hypothèses sur les mécanismes physiopathologiques impliqués. Cependant, la complexité de l'objet modélisé (réseaux de réseaux neuronaux) rend cette tâche difficile. En effet, les dynamiques temporelles observées s'expriment sur des échelles

temporelles variables (activités épileptiques transitoires, crises d'épilepsie, processus plastiques impliqués dans l'épileptogénèse). Elles sont elles-mêmes issues de systèmes dynamiques non linéaires qui peuvent être considérés à l'échelle sub-cellulaire (canaux ioniques et récepteurs membranaires), cellulaire (neurone) ou tissulaire (assemblées de neurones couplées) et dans lesquels les propriétés de changement d'état (bifurcations, stabilité, instabilité) prédominent. Une classe particulière de modèles macroscopiques, physiologiquement argumentés, sera présentée. À partir d'une articulation entre les modèles produits et le traitement des signaux non stationnaires et non linéaires, l'interprétation de données réelles sera discutée.



La mauvaise herbe : origine du commensalisme

Olivier François

Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure en Informatique et Mathématiques Appliquées de Grenoble, membre du laboratoire TIMC. Il anime avec J.L.Martiel une équipe travaillant sur la modélisation des systèmes biologiques.

Résumé

Cet exposé prétend illustrer la puissance des outils modernes de simulation stochastique et de statistique bayésienne en génétique des populations. Présente où l'homme est présent, *Arabidopsis thaliana* est souvent considérée comme une mauvaise herbe. Répandu dans le monde entier, cet organisme modèle pour la génomique se prête particulièrement bien aux études de diversité moléculaire à grande échelle géographique. À l'aide de modèles bayésiens intégrant les lois de la génétique et les données spatiales, il est possible de segmenter la population en unités génétiquement diffé-

renciées. On peut alors localiser l'origine de l'expansion démographique grâce à des méthodes statistiques. En simulant des modèles de colonisation individu-centrés et la coalescence des lignées, on propose les dates les plus vraisemblables pour l'origine de cette expansion. À partir d'une étude portant sur 76 génomes européens, on met en évidence que la diversité d'*Arabidopsis thaliana* varie sur un axe est-ouest et que l'origine de l'expansion se trouve en Asie de l'ouest. Puis on montre que cette expansion est compatible avec la diffusion de l'agriculture en Europe à la période néolithique.



Universalité et émergence en physique statistique

Hugues Chaté

Service de Physique de l'Etat Condensé
CEA – Saclay, France

Résumé

L Bien que l'émergence ait toujours été le programme de la physique statistique, elle a pris des couleurs nouvelles dès lors que les molécules ont été remplacées par des objets/agents plus complexes (oscillateurs chaotiques, cellules, animaux...). J'illustrerai cette émergence moderne en insistant sur le rôle essentiel joué par la notion d'universalité, qui permet de se restreindre à des modèles minimaux sans renoncer à une pertinence générale. J'utiliserai deux exemples tirés de mes propres recherches : un automate cellulaire chaotique duquel émergent des oscillations collectives synchrones, et quelques résultats sur les propriétés universelles du mouvement collectif telles qu'étudiées au sein du projet européen Starflag. Le projet Starflag : vols d'étourneaux dans le crépuscule romain.



Emergence d'une communication honnête entre agents égoïstes

Jean-Louis Dessalles

est enseignant-chercheur en Intelligence Artificielle à l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (ParisTech). Il travaille sur la modélisation cognitive du langage et sur les conditions de son émergence au cours de l'évolution.

Résumé

L'espèce humaine se caractérise par la tendance de ses membres à fournir des informations honnêtes à qui veut bien les écouter. Ce comportement semble contraire aux principes Darwiniens les plus élémentaires. Les propositions actuelles pour sortir de la contradiction reposent sur des scénarios coopératifs, dans lesquels les individus communiquent pour attirer la communication d'autrui. Nous montrons cependant que

la coopération informationnelle est auto-destructive. Nous proposons une autre approche dans laquelle les agents donnent gratuitement des informations honnêtes pour faire valoir certaines de leurs qualités sociales. Ce nouveau paradigme, qui s'inscrit dans la *Théorie du signal honnête*, suggère que notre lignée est passée par une bifurcation qui a conduit notre espèce dans une niche informationnelle.



Émergence de réseaux cellulaires arborescents : approches continues versus modélisation cellule-centrée de dynamiques complexes multi-échelles

Philippe Tracqui

Directeur de recherche au CNRS, dirige l'équipe Dynacell (Dynamique Cellulaire) dans le laboratoire TIMC à l'Institut de l'Ingénierie et de l'Information de Santé (In3S) de Grenoble.

Ses recherches portent sur le rôle des contraintes mécaniques dans les processus d'auto-organisation observés dans l'adhésion et la contraction cellulaires, ainsi que dans la morphogenèse de réseaux capillaires.

Résumé

Les approches systémiques doivent prendre en compte la complexité résultant, lorsqu'ils existent, des couplages entre processus de nature différente. C'est fondamentalement le cas en biologie, où processus chimiques, électriques, mécaniques, ... interagissent pour organiser la dynamique du vivant. Depuis les brins d'ADN jusqu'aux organes, en passant par les cellules et les tissus, cette organisation concerne des objets déformables, soumis à des contraintes mécaniques d'origine diverse qui sont aujourd'hui reconnues comme étant des facteurs de régulation déterminants. Ces aspects fondamentaux, ainsi que les problèmes liés au choix d'un formalisme adapté pour les modéliser, sont illustrés dans le contexte de la tubulogenèse de réseaux auto-organisés de capillaires.

Réflexions sur l'apport de la théorie des systèmes complexes à l'analyse des faits sociaux

André Orléan

École Normale Supérieure / CEPREMAP48, boulevard Jourdan 75014 Paris.

Résumé

Pour mener cette réflexion, il est intéressant de partir de la manière dont Emile Durkheim caractérise les faits sociaux dans *Les règles de la méthode sociologique*. On sait que les critères d'extériorité et de contrainte y jouent un rôle essentiel : "un fait social se reconnaît au pouvoir de coercition externe qu'il exerce ou est susceptible d'exercer sur les individus". Qu'a à dire la théorie des systèmes complexes en la matière ? Permet-elle de penser cette force propre au social ? Cela n'a rien d'évident. La question de l'émergence joue ici un rôle central. L'émergence que modélisent les systèmes complexes implique-t-elle une extériorisation de l'institution produite par rapport aux stratégies individuelles qui l'ont produite ? Notre exposé vise, non pas à fournir une réponse définitive à ces questions, réponse que nous ne possédons pas à l'heure actuelle, mais à bien mettre en avant les enjeux de ces questions qui sont primordiaux pour qui veut voir dans la théorie des systèmes complexes, au-delà de la sophistication des modèles, l'élément d'une approche renouvelée de la pluridisciplinarité.

De l'évolution à l'évolvabilité : exploration par la simulation

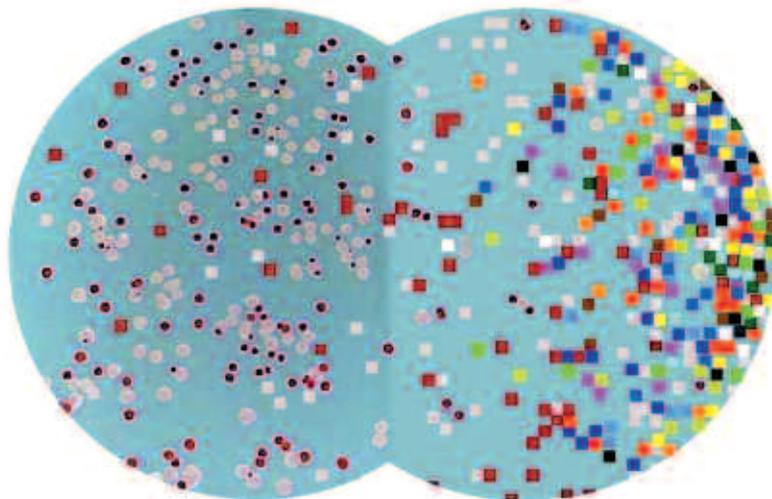
Guillaume Beslon

LIRIS - Laboratoire d'InfoRmatique en Images et Systèmes d'information,
IXXI Institut des systèmes complexes,
INSA - Institut National des Sciences Appliquées de Lyon Dept. Informatique,
Bât. Blaise Pascal 69621 Villeurbanne Cédex.

Résumé

Devant les difficultés liées à l'étude expérimentale de l'évolution, les approches par simulation apportent des réponses intéressantes et on assiste petit à petit à la naissance d'une "évolution expérimentale *in-silico*". Nous présentons ici un modèle individu-centré permettant d'étudier les variations de taille des génomes bactériens en fonction des contraintes évolutives. Nous montrons ainsi que le génome peut être façonné par des pressions évolutives indirectes liées à la robustesse

des individus (c'est-à-dire à leur capacité à résister aux mutations délétères) ou à leur "évolvabilité" (c'est-à-dire à leur capacité à trouver des mutations favorables). L'exploration de l'évolution par la simulation permet donc de mettre en évidence des couplages indirects entre différents niveaux d'organisation, couplages difficiles à découvrir *in-vivo* car masqués par les multiples pressions s'exerçant simultanément sur un organisme.



Graphic courtesy of Disevic

Robustesse et régulation de systèmes : une approche viabiliste

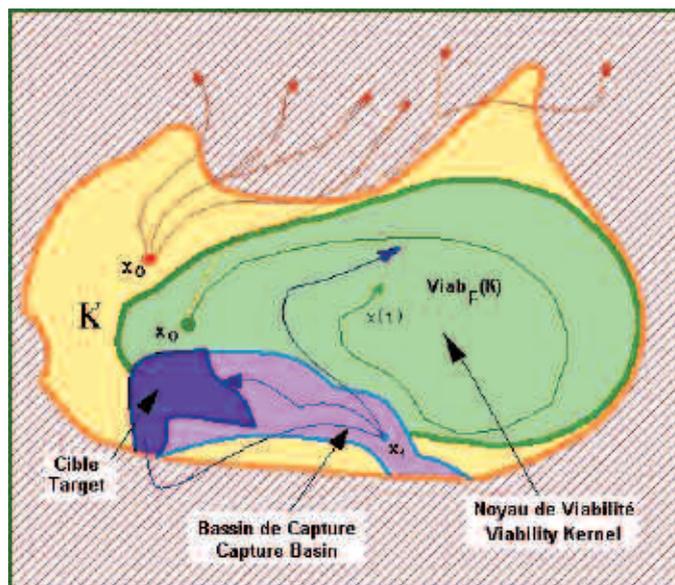
Hélène Frankowska

est chercheur au CNRS. Elle travaille au CREA (centre de recherche en épistémologie appliquée) de l'Ecole Polytechnique. Spécialiste de la théorie du contrôle et des inclusions différentielles, elle est aussi intéressée par la modélisation en sciences cognitives.

Résumé

Les systèmes contrôlés à dynamiques incertaines et sous contraintes d'état apparaissent dans de nombreux modèles : robotique, économie, démographie, environnement, finances, etc. En effet, beaucoup de modèles comportementaux de prise de décision sont décrits sous forme de systèmes avec des paramètres du contrôle, où des agents agissent sur le système en les choisissant en fonction du but fixé. Les états des systèmes sont naturellement soumis à des contraintes que le décideur doit respecter. Quand la dynamique n'est connue qu'approximativement, on souhaite prendre des décisions peu sensibles à cette incertitude. Dans la litté-

rature on trouve souvent des constructions de solutions optimales (qui maximisent ou minimisent un certain coût choisi par le modélisateur) comme une base plausible des décisions humaines. Il est bien connu que les stratégies optimales, mêmes pour des problèmes sans contraintes, sont souvent discontinues, ce qui les rend peu robustes et très sensibles aux conditions initiales. En pratique cela signifie que le retard d'information rendra la construction numérique des solutions optimales difficile. L'objet de la théorie de la viabilité est l'étude qualitative et quantitative d'évolutions de systèmes sous contraintes d'état régies par les inclusions différentielles.



Peut-on gérer la résilience de systèmes complexes ?

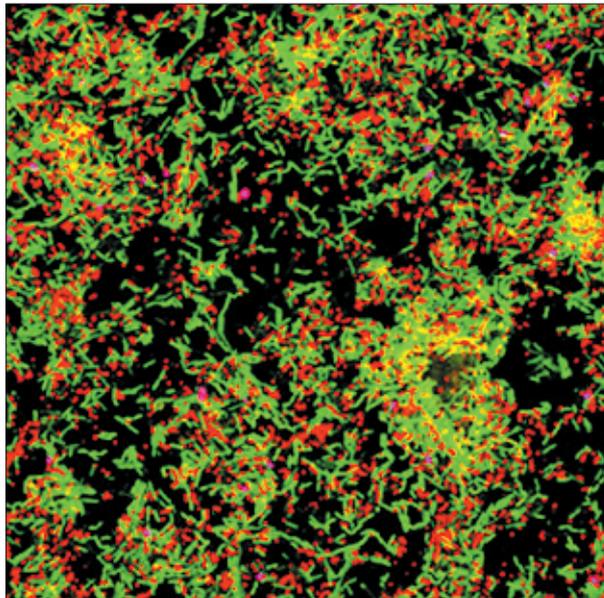
Guillaume Deffuant

est directeur de recherche au Cemagref, responsable du Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Complexes.

Résumé

Nous présentons la stratégie adoptée dans le projet Européen PATRES, commencé en février 2007, pour développer des outils et méthodes afin de gérer la résilience de systèmes complexes. La résilience est ici comprise comme la capacité d'un système à maintenir certaines de ses propriétés, ou les restaurer, après avoir subi de fortes perturbations. Dans le cas de systèmes complexes, les propriétés en question sont souvent attachées à la présence de structures ou motifs (patterns) engendrés par les interactions entre les composants élé-

mentaires du système. Le défi posé dans le projet est donc double : il s'agit de développer des méthodes permettant de modéliser les dynamiques d'émergence et d'évolution de patterns (problème direct), et de déterminer des stratégies d'autorégulation du système, lui permettant de maintenir ou restaurer certains patterns, après de fortes perturbations. Nous proposons de relever ce double défi en nous appuyant sur les méthodes de la physique statistique pour le problème direct et sur la théorie de la viabilité pour le problème inverse.



Reconstruction de trajectoires dans un système économique

M. Cottrell, P. Gaubert, P. Letrémy

Equipe SAMOS-MATISSECES, UMR CNRS 8174
Université Paris 1, Panthéon-Sorbonne

Résumé

A partir des données recueillies dans l'"Enquête Emploi" de l'INSEE (de 1990 à 2002), on définit une segmentation de la population décrite par des variables liées à l'individu et par des variables qui décrivent sa situation vis-à-vis du marché du travail. On ne dispose pas de véritables trajectoires individuelles, puisque chaque individu n'est présent dans l'enquête que pendant trois ans consécutifs. On définit alors des profils types à partir des variables personnelles, et on les classe comme individus supplémentaires dans la segmentation obtenue. On peut alors étudier les trajectoires de ces individus types, et modéliser les changements de classes au moyen d'une chaîne de Markov. Ces résultats sont interprétés en relation avec la théorie du marché du travail segmenté.

Développement durable et systèmes complexes : quelles représentations des systèmes natures-sociétés et de leurs transformations ?

Bernard Hubert

Directeur de recherche à l'INCA - Directeur de recherche à l'INCA

Résumé

Depuis quinze ans, le développement durable s'inscrit dans les débats publics et politiques. En son nom, s'organisent des réunions et des conférences internationales, se justifient des choix et des décisions de politiques publiques, se mettent en place des systèmes d'indicateurs ! De nombreux substantifs se qualifient ainsi de « durable » : la ville, l'agriculture, la production... S'agit-il simplement d'une mode ou à l'inverse d'une étape dans une réflexion critique sur le concept de développement, dépassant la remise en cause de la seule croissance, voire son simple rejet, en introduisant une exigence d'intégration de points de vue et d'enjeux différents ainsi que d'équité sociale ?

Qu'en est-il pour la recherche ? Cette notion introduit-elle de nouveaux enjeux, de nouvelles questions qui conduiraient à renouveler certains thèmes, certains objets, voire même certaines pratiques de recherche ? Quels moyens la recherche se donne-t-elle pour intégrer un enchevêtrement de temporalités ? Quelles initiatives les différentes disciplines, en particulier sciences sociales, sciences techniques et sciences de la nature, prennent-elles pour améliorer leurs formes d'intégration et s'approprient scientifiquement les enjeux posés par cette notion ?

Le développement durable vise à surmonter ce que les oppositions, divisions et séparations peuvent représenter comme menaces de désintégration pour la société humaine ; l'idée d'intégration en est une idée maîtresse. Il a en outre à voir avec l'articulation du local et du planétaire, sans écraser l'un sur l'autre (le développement durable n'est pas fractal), et avec l'inscription du temps court de l'action ordinaire dans le temps long intergénérationnel, qui est aussi le temps de déploiement de processus biophysiques majeurs (biodiversité, climat, évolution de la fertilité des sols, accumulation de polluants dans les nappes profondes).

Le noyau dur du développement durable comme question et comme défi tient aux relations entre les processus économiques et les transformations de l'environnement planétaire et des ressources qu'il abrite. Ces relations sont médiatisées d'un côté par la technologie, qui fait le passage entre le monde social et le monde physique, et de l'autre côté par la préoccupation pour l'équité sociale, dont la donne est en partie modifiée par l'émergence de la question environnementale et des nouvelles raretés qu'elle exprime ou qu'elle demande d'instituer. Cette dernière dimension inscrit le développement durable dans le registre des catégories normatives et pas seulement des catégories descriptives ou analytiques.

Divers modèles d'accidents vasculaires cérébraux

Emmanuel Grenier

Unité de Mathématiques Pures et Appliquées, UMR 5660 CNRS Ecole Normale Supérieure de Lyon

Résumé

L'objectif de cet exposé est de présenter et discuter divers modèles discrets et continus d'accidents vasculaires cérébraux.

Influence sociale, avalanches et apprentissage

Jean-Benoît Zimmermann

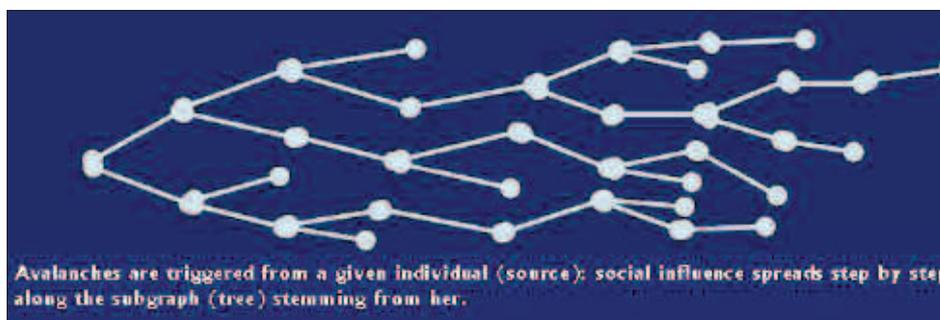
GREQAM, Marseille

joint paper with Alexandre Steyer (PRISM-Univ. Paris I)

Résumé

L'influence sociale joue un rôle crucial dans l'émergence de normes sociales de comportement susceptibles de déterminer la formation de nouveaux marchés, le succès d'innovations, ou la formation d'une rumeur ou d'une opinion. Beaucoup de modèles ont été construits sur les principes de la communication de bouche-à-oreille pour étudier de tels phénomènes. Les limites de tels modèles sont liées au fait que, généralement, ils postulent l'homogénéité de l'influence inter-individuelle entre paires d'agents (la probabilité pour un agent d'amener un autre à sa propre opinion) ou en construisent l'hétérogénéité sur la base d'un tirage aléatoire en situant ainsi les agents sur un réseau social valué. Cependant, les réseaux sociaux dans le monde réel résultent de long processus de formation et d'évolution de liens qui génèrent des topologies de réseaux qui seraient tout à fait improbables par un tirage aléatoire. Cette communication a pour objectif d'étudier la construction d'un réseau social à travers un processus

d'évolution basé sur le cheminement de l'influence sociale au cours de l'histoire des interactions inter-individuelles passées. Celles-ci sont à l'origine d'une évolution de l'intensité des liens à travers un processus d'apprentissage social dérivé du principe d'homophilie. Typiquement un agent va tendre à réallouer plus d'intensité relationnelle en direction de ceux de ses voisins qui ont déjà été sensibles à son influence, c'est-à-dire avec lesquels il a partagé, au fil de l'histoire, des positions similaires. Nous mettons en œuvre un tel processus d'évolution de l'intensité des liens sur des sous-graphes correspondant aux "avalanches" successives déclenchées par le cheminement de l'influence à partir d'un individu donné. Nous expliquons alors pourquoi des dynamiques "critiques" particulières peuvent émerger, caractérisées par une distribution en loi de puissance, plutôt que par la forme exponentielle des habituelles courbes de diffusion.



Prédire les emplacements commerciaux grâce aux outils des systèmes complexes

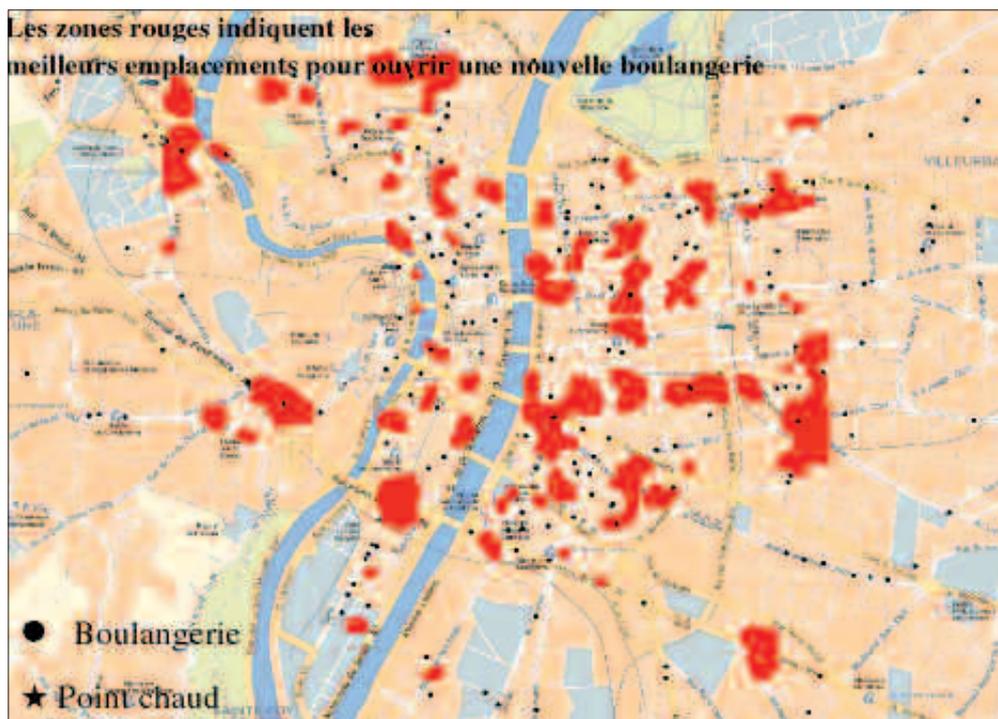
Pablo Jensen

Laboratoire de Physique de l'ENS Lyon, Institut Rhône Alpin des Systèmes Complexes

Résumé

Si vous avez l'habitude de vous promener dans une grande ville, vous avez sans doute remarqué la grande diversité des implantations commerciales. En combinant des outils propres à la géographie et aux systèmes complexes, j'ai pu calculer des coefficients d'attraction et de répulsion entre activités commerciales.

Cette méthode, qui a donné lieu en septembre 2006 à un article dans *Physical Review*, permet aussi de prédire de bons emplacements pour l'implantation de nouveaux magasins. Elle commence à être utilisée par la chambre de commerce de Lyon pour le conseil aux artisans.



Les réseaux complexes : des infrastructures critiques à l'Épidémiologie

Marc Barthelemy

Chercheur au CEA

Résumé

La structure en réseau est une composante essentielle de nos sociétés modernes et apparaît dans des domaines très variés tels que la biologie, l'écologie, la sociologie, l'urbanisme, ou bien les technologies de l'information. Ainsi, la plupart des infrastructures sont constituées sous la forme de réseaux complexes intégrant des paramètres tels que par exemple l'espace et le trafic. De nombreuses études sont actuellement en cours sur la structure de ces réseaux, leur formation et évolution, ainsi que leur fonction et je passerai en revue les principaux résultats et problèmes ouverts. L'étude de ces

réseaux ne se limite pas à des considérations théoriques nouvelles mais a aussi des conséquences pratiques immédiates telles que la résilience des infrastructures ou bien l'épidémiologie. Ainsi, le principal vecteur de maladies infectieuses dans le cas d'une pandémie est le transport aérien et je montrerai comment l'étude et la compréhension de ce réseau de transport permet de proposer des modèles de propagations d'infections et d'aboutir à des recommandations en terme de stratégies de contrôle de la pandémie.



SOMMAIRE

Systèmes complexes dans les 6 ^e et 7 ^e programme cadre. <i>Ralph Dum</i>	6
Morphological computation – connecting brain, body, and environnement. <i>Rolf Pfeifer</i>	7
Systèmes dynamiques de l'architecture et de la production végétales. <i>Philippe de Reffye</i>	8
Fractures et complexité. <i>Philippe Davy</i>	9
Vers une reconstruction des dynamiques multi-échelles dans la morphogenèse animale. <i>Nadine Peyriéras</i> ..	10
Méthodes d'intégration des niveaux d'organisation et d'agrégation de variables avec des exemples écologiques. <i>Pierre Auger</i>	11
Dynamique complexe des processus cellulaires, résultats et perspectives pour la biologie cellulaire et la physico-chimie. <i>François Amblard</i>	12
Qui contrôle la morphogénèse ? <i>Stéphane Douady</i>	13
Comprendre le Cerveau qui Apprend. <i>Yves Burnod</i>	14
Vers un méristème virtuel. <i>Christophe Godin</i>	15
Morphologie cellulaire, migration et métastases : trois niveaux du « PAI-1 swing ». <i>Georgia Barlovatz-Meimon</i> .	16
Transitoires et crises épileptiques : signaux et modèles dynamiques. <i>Fabrice Wendling</i>	17
La mauvaise herbe : origine du commensalisme. <i>Olivier François</i>	18
Universalité et émergence en physique statistique. <i>Hugues Chaté</i>	19
Émergence d'une communication honnête entre agents égoïstes. <i>Jean-Louis Dessalles</i>	20
Émergence de réseaux cellulaires arborescents : approches continues versus modélisation cellule-centrée de dynamiques complexes multi-échelles. <i>Philippe Tracqui</i>	21
Réflexions sur l'apport de la théorie des systèmes complexes à l'analyse des faits sociaux. <i>André Orléan</i>	22
De l'évolution à l'évolvabilité : exploration par la simulation. <i>Guillaume Beslon</i>	23
Robustesse et régulation de systèmes, une approche viabiliste. <i>Helena Frankowska</i>	24
Peut-on gérer la résilience de systèmes complexes. <i>Guillaume Deffuant</i>	25
Reconstruction de trajectoires dans un système économique. <i>Marie Cottrell</i>	26
Développement durable et systèmes complexes : quelles représentations des systèmes natures-sociétés et de leurs transformations ? <i>Bernard Hubert</i>	27
Divers modèles d'accidents vasculaires cérébraux. <i>Emmanuel Grenier</i>	28
Influence sociale, avalanches et apprentissage. <i>Jean-Benoît Zimmermann</i>	29
Prédire les emplacements commerciaux grâce aux outils des systèmes complexe. <i>Pablo Jensen</i>	30
Les réseaux complexes : les infrastructures critiques à l'Épidémiologie. <i>Marc Barthélémy</i>	31