

COLLOQUE DE PROSPECTIVE

VERS UNE SCIENCE DES SYSTÈMES COMPLEXES

11-12 FÉVRIER

AUDITORIUM DU CNRS 3 RUE MICHEL-ANGE 75 016 PARIS

Les systèmes complexes, depuis la cellule jusqu'à l'écosphère, résultent de processus d'évolution et d'adaptation. Ils présentent des propriétés émergentes : le niveau microscopique sous-jacent fait émerger des formes organisées au niveau macroscopique, lequel influence en retour le niveau microscopique. Ces propriétés émergentes sont robustes et peuvent être étudiées de différents points de vue, selon la classe de systèmes adaptatifs complexes considérée.

L'apport des disciplines formelles pour la modélisation des systèmes complexes, qu'ils soient naturels ou artificiels, est considérable. Que serait la modélisation des systèmes complexes sans les transitions de phase, la renormalisation, les états critiques auto-organisés de la physique statistique, sans les systèmes dynamiques des mathématiques et sans les systèmes discrets ou les automates cellulaires de l'informatique ?

La compréhension des systèmes adaptatifs complexes passe par leur modélisation. Certes leurs modèles sont doublement contraints selon les règles habituelles de la science : d'une part, ils doivent être les plus parcimonieux possibles, avec un contenu théorique intelligible ; d'autre part, ils doivent fournir une reconstruction de l'ensemble des données provenant de l'observation de ces systèmes. Mais la nouveauté vient de la quantité des données accumulées sur les systèmes complexes qui connaît une expansion aujourd'hui très rapide, non seulement sous forme de données numériques en 1D mais aussi d'images en 2D et 3D. Dans ce flux croissant de données, il s'agit de repérer les patrons spatio-temporels à soumettre aux reconstructions rationnelles de la modélisation et de la simulation. Cette reconstruction met en œuvre des méthodes inductives de plus en plus sophistiquées avec l'aide de moyens computationnels puissants. Cette activité de reconstruction est par nature interdisciplinaire, associant chaque discipline directement concernée avec des spécialistes venant des disciplines formelles, mathématiques, informatiques et physiques.

C'est dans cet aller-retour entre l'acquisition de données sur la base d'hypothèses modélisatrices et leur reconstruction par la modélisation qu'une science des systèmes complexes peut se développer. Les systèmes complexes sont des objets intrinsèquement pluridisciplinaires. Pour un même objet, ce sont des théories différentes et hétérogènes qui peuvent en rendre compte : les activités neuronales peuvent être pensées à la fois comme des équations dynamiques et comme structure logique d'un contenu. Il reste beaucoup à faire au plan théorique, sur la base des avancées du siècle passé, pour avoir les concepts et les modèles qui fournissent des explications élégantes aux phénomènes émergents.

Paul Bourguin

- ▶ PAGES 2-6 : SUCCÈS ET DÉFIS
- ▶ PAGE 6 : BIBLIOGRAPHIE
- ▶ PAGE 7 : COMITÉ DE PILOTAGE
- ▶ PAGES 7-11 : DÉTAIL DES SESSIONS : CURRICULUM VITAE ET RÉSUMÉS DES INTERVENTIONS
- ▶ PAGE 12 : PROGRAMME

SUCCÈS ET DÉFIS

▶ GÉRARD WEISBUCH : LOIS D'ÉCHELLE

Gérard Weisbuch, directeur de recherches au CNRS, travaille au laboratoire de physique statistique à l'École normale supérieure. Après avoir débuté en physique des solides, il a travaillé comme expérimentateur puis comme théoricien et simulateur dans les domaines de la physique des polymères, des réseaux d'automates, de l'immunologie théorique et des systèmes sociaux. Gérard Weisbuch a longtemps fréquenté le Sante Fe Institute, un centre de recherche qui promeut l'interdisciplinarité.

L'importance des lois d'échelle est reconnue depuis plus d'un siècle : elles relient le plus souvent la variation d'une grandeur physique à la taille du système. Une loi d'échelle s'écrit souvent sous la forme d'une loi de puissance :

$$V = L^a$$

ou d'une relation exponentielle. Dès 1917, D'Arcy Thomson, dans son célèbre *On Growth and Form*, avait justifié un certain nombre de lois d'échelle des systèmes vivants en les reliant aux propriétés physico-chimiques de la matière qui les constitue. Les études empiriques, puis théoriques, ont montré que les lois d'échelle s'appliquent à de larges classes de systèmes construits suivant les mêmes principes, indépendamment des détails de cette construction. Les lois d'échelles sont dites génériques et constituent souvent le "degré un" de la modélisation. Leur portée pratique n'est pas moindre que leur intérêt théorique : on ne peut passer d'une maquette ou d'une simulation numérique à des prévisions sur un système grandeur nature qu'en respectant ces lois d'échelle.

Une étape décisive sur le plan théorique a été franchie par l'application du groupe de renormalisation aux transitions de phase en physique et par la découverte des classes d'universalité respectant les mêmes lois d'échelle au voisinage de la transition, d'où la notion de propriétés génériques.

La portée des lois d'échelle s'étend à tous les domaines scientifiques, y compris les sciences humaines. La distribution de Pareto des richesses, de la taille des villes ou de la fréquence des mots en est un bon exemple. Cette loi invariante d'échelle¹, par opposition à une distribution gaussienne par exemple, s'explique à partir d'un processus multiplicatif aléatoire (Herbert Simon, Benoît Mandelbrot, Sorin Solomon, etc., "les riches s'enrichissent davantage"). Les fractales proposées par B. Mandelbrot s'appliquent aussi bien à la description empirique de caractéristiques géographiques qu'au traitement et à la compression du signal.

Plus récemment, l'Internet a permis l'essor de l'étude des grands réseaux "socio-techniques" : le réseau Internet lui-même, le Web, le réseau des collaborations et des citations scientifiques, etc., exhibent des structures invariantes d'échelle. L'étude empirique des réseaux invariants d'échelle va de pair avec celle de leurs propriétés dynamiques, souvent différentes de celle des réseaux aléatoires ou réguliers (épidémiologie, robustesse), et avec leur ingénierie (conception robuste, recherche d'information, etc.).

Parmi les travaux récents les plus intéressants, citons la solution du "mystère" des lois d'échelle en $m^{1/4}$ (au lieu de $m^{1/3}$) dans les systèmes vivants, dues à la nature fractale des échangeurs de fluides (circulation sanguine, sève, poumons).

¹ La distribution de Pareto est invariante d'échelle car le système n'a aucune échelle caractéristique. La richesse moyenne, par exemple, est sans rapport avec la richesse la plus fréquemment observée.

▶ GÉRARD WEISBUCH : DÉSORDRE ET OPTIMISATION

Les systèmes dits désordonnés sont composés de nombreux éléments différents en interaction. Certaines de leurs propriétés ne résultent pas de la moyenne des propriétés de leurs composants : c'est le cas par exemple de la percolation d'un courant à travers un mélange de particules conductrices et de particules isolantes. Nombre de matériaux techniques ainsi que ceux constituant les tissus vivants sont aussi des composites.

Les verres, et en particulier les verres de spins, en tant que systèmes modèles des milieux désordonnés, ont longtemps intrigué les physiciens, jusqu'à ce que Giorgio Parisi propose une solution inattendue, basée sur une méthode originale, la méthode des répliques, au problème des minima d'énergie de ces systèmes. Les propriétés thermodynamiques des verres semblent liées au nombre exponentiel de ces minima.

La méthode des répliques a servi à prévoir les transitions de phases dans nombre de systèmes physiques désordonnés, mais aussi dans les cas où les nombreuses configurations du système sont caractérisées par une fonction que l'on souhaite optimiser ou minimiser. C'est le cas de certains réseaux de neurones formels (voir page suivante), c'est aussi celui de l'optimisation combinatoire et en particulier de la satisfiabilité.

La résolution d'un problème d'optimisation, dans le cas où la fonction à optimiser n'est pas linéaire, est généralement de type NP complet, c'est-à-dire que la recherche d'une solution peut prendre un temps exponentiel avec la taille du problème. Scott Kirkpatrick et al. ont proposé en 1983 l'utilisation d'une heuristique inspirée de la mécanique statistique, le recuit simulé, et l'ont appliqué chez IBM à plusieurs problèmes de conception de circuits électroniques.

C'est la méthode des répliques qui a permis de découvrir l'existence de transitions de phase dans un problème semblable, celui de la K-satisfiabilité. Dans ce type de problème où l'on recherche les configurations de variables logiques satisfaisant un certain nombre de contraintes, S. Kirkpatrick, Rémi Monasson et Riccardo Zecchina ont montré que la probabilité de trouver une solution passait brusquement de 1 à 0 lorsque qu'augmente le nombre des contraintes par rapport à celui des variables. Cette découverte formelle a été complétée par la proposition d'une heuristique bien plus rapide que les méthodes classiques, la propagation des croyances, qui a mis en évidence non seulement la transition prédite, mais aussi une transition concernant la distance entre les solutions : bien avant la disparition des solutions, celle-ci peuvent se disperser dans l'espace des variables logiques, rendant ainsi très coûteux tout réarrangement nécessité par une petite variation sur les contraintes.

Les résultats de G. Parisi n'étaient qu'un Ansatz (la méthode des répliques, très employée en physique des systèmes désordonnés tellement elle est féconde, est une technique dont la validité mathématique reste non démontrée). Cette année, Michel Talagrand en a donné une démonstration.

Un grand nombre de problèmes abordés en informatique sont du même type : ces problèmes ont un grand nombre de minima relatifs qui bloquent la recherche des minima les plus performants par les heuristiques directes ("greedy"). Les heuristiques que nous venons de mentionner, ou d'autres du même type encore à découvrir, sont très prometteuses dans les problèmes de codage ou de déchiffrement, etc.

▶ GÉRARD WEISBUCH : APPRENTISSAGE ET DYNAMIQUE INVERSE

Les réseaux de neurones formels, et leur version la plus simple proposée dès 1943 par W. McCulloch et W. Pitts, sont un bon exemple de l'émergence de propriétés cognitives obtenues à partir d'un réseau d'éléments très simples. Ils permettent l'apprentissage et la reconnaissance de "patterns" qui leur sont présentés. Même si la structure des modèles les plus élémentaires, comme celui de John J. Hopfield (1982), reste très éloignée de ce que nous savons déjà de l'anatomie du cortex, les propriétés et les algorithmes déjà observés ouvrent des directions prometteuses, non seulement en sciences cognitives mais aussi dans les domaines de l'informatique distribuée et de la dynamique inverse.

L'informatique distribuée est concernée par les interactions entre les processeurs et les ressources d'un système, qu'il s'agisse de la structure interne d'un ordinateur ou de celle de l'Internet. Le parallélisme à grande échelle des systèmes actuels et plus encore des systèmes futurs nous pose de grands défis : l'augmentation théorique de la puissance de calcul des systèmes multiprocesseurs ou l'interconnectivité actuelle permise par l'Internet pose des problèmes de programmation, de partage des ressources, d'accès à l'information, de robustesse et de réparation que les méthodes classiques ne permettent plus de résoudre. C'est en cela que l'inspiration biologique, éclairée par l'approche des systèmes complexes, permet d'explorer de nouvelles voies. Nous recherchons aujourd'hui des systèmes auto-organiseurs en termes de répartition des tâches, de routage et de recherche de l'information, de résistance et de réparation des défauts ponctuels, etc. Deux approches formellement semblables peuvent nous aider : l'apprentissage et la dynamique inverse.

L'apprentissage implémenté par les réseaux de neurones formels est un apprentissage par renforcement, sans professeur. Les structures à retenir sont présentées au système sans être définies d'une quelconque manière logique. C'est l'opposé d'une approche programmation. La difficulté de programmer les très grands systèmes actuels rend cette approche attractive : la possibilité de mettre à jour les tables de routage Internet par des algorithmes "fourmis" en est un bon exemple.

D'une manière plus générale, mais en se basant sur des algorithmes équivalents, on est souvent confronté en science ou en ingénierie à des problèmes de dynamique inverse : quelle structure et quels processus d'interactions sont-ils nécessaires à l'obtention de comportements globaux observés ou souhaités ? Un exemple est la reconstitution des réseaux qui contrôlent l'expression phénotypique du génome à partir de l'observation d'un ensemble de transcriptomes. Le problème se formule aussi dans un cadre ingénierie : quelles règles ou quelles régulations imposer à des agents en interaction sur l'Internet pour favoriser les échanges tout en évitant que les ressources soient accaparées par certains ou que le système se bloque, et en préservant la "scalabilité", c'est-à-dire que les propriétés soient préservées à très grande échelle ? La généralisation à une théorie du droit et aux sciences politiques est tentante.

▶ FRANCOIS KÉPÈS : ÉPIGÉNOMIQUE

François Képès est directeur de recherche au CNRS et professeur chargé de cours à l'École polytechnique. À la Genopole® d'Évry, il anime l'Atelier de Génomique Cognitive (ATGC) et dirige avec Gilles Bernot un institut du complexe dédié à la nouvelle biologie.

Après un demi-siècle de succès, la biologie moléculaire a récemment changé d'échelle, augmentant considérablement le débit de sa production de données brutes, souvent acquises en parallèle. Cette situation récente confirme pour longtemps encore la biologie moléculaire comme une exceptionnelle pourvoyeuse d'informations mais signe aussi la perte d'efficacité de son paradigme ordinaire.

Prenons un exemple. Un biologiste moléculaire établit l'identité d'un compartiment cellulaire par la présence d'une certaine protéine (ou d'un jeu réduit de molécules, ce qui ne change pas le raisonnement). Si cette protéine s'est logée dans ce compartiment en lui conférant cette identité, ce ne peut être que parce qu'elle y a été recrutée par une autre protéine, laquelle y a été introduite par son récepteur, lequel etc. Cette régression infinie est certes pratique lorsqu'on évolue en terra incognita. Elle se heurte en revanche au mur dressé par la finitude de la liste des gènes, établie à partir du séquençage intégral des génomes. Or ces listes quasi exhaustives de gènes représentent justement la victoire la plus indiscutable de la biologie moléculaire.

Comment sortir de cette impasse ? L'une des issues consiste à concevoir le vivant (par exemple le compartiment cellulaire de notre exemple) par le biais des processus dynamiques qui le réalisent. Parfois, les méthodes modernes, alliant l'approche moléculaire à la morphodynamique, permettent d'observer ces processus, amenant ainsi des percées conceptuelles très appréciables. Le plus souvent, les hiatus dans notre compréhension d'un processus dynamique sont comblés par des modèles plus ou moins formalisés. C'est pourquoi la modélisation s'inscrit dans une tendance de fond à long terme. Mais c'est aussi pourquoi elle devra, plus qu'auparavant, s'allier à l'induction expérimentale, par simulations dans l'ordinateur et dans l'éprouvette, et par observation, perturbation et réinvention du vivant.

Peut-être serait-il adéquat, pour ce projet, de forger le terme d'"Épigénomique", qui, par analogie à "Épigénétique", fait allusion à la construction des objets biologiques situés à des niveaux croissants d'intégration, mais avec le génome et non plus le gène pour référentiel. Il existe déjà deux autres termes sémantiquement proches du terme "Épigénomique". Le terme de "Post-génomique" qui, d'un point de vue purement chronologique, se positionne après la génomique, mais n'est porteur d'aucun projet scientifique précis : il englobe les méthodes de la transcriptomique et de la protéomique, et un pan non spécifié de la bioinformatique incluant l'annotation. Le terme de "Biologie intégrative" se réfère à un projet scientifique proche dans l'esprit de celui décrit ici, mais avec une connotation plus physiologique et moins moléculaire. Parce qu'elle a une origine plus ancienne, la Biologie intégrative n'a pas le génome pour référentiel.

On le voit, relever le défi épigénomique est un projet nécessairement interdisciplinaire qui met à profit la nouvelle donne de la biologie pour examiner la complexité de la cellule et de l'organisme vivant.

► PAUL BOURGINE : DYNAMIQUE DES RÉSEAUX SOCIAUX ET COGNITION SOCIALE

Paul Bourguine est chercheur au centre de recherches en épistémologie appliquée (CREA) à l'École polytechnique. Economiste au départ, il s'est ensuite tourné vers la modélisation des systèmes cognitifs. Il s'intéresse à la modélisation de la cognition sociale comme objet multidisciplinaire pour les sciences sociales cognitives, telles que l'économie cognitive.

L'attention portée aux réseaux sociaux s'est développée récemment à partir des sociologues qui ont mis en évidence le phénomène des petits mondes au sein de la société humaine : ce phénomène est caractérisé par un faible diamètre du réseau, où chacun se trouve à faible distance des autres. Les études ont ensuite porté sur toutes sortes de réseaux obtenus en observant la co-présence dans des productions cinématographiques, scientifiques ou encore dans des conseils d'administration d'entreprises. La plupart de ces réseaux présentent une propriété d'invariance d'échelle. Des hypothèses dynamiques tentent de rendre compte de cette invariance : par exemple, l'attachement préférentiel postule qu'un nouvel entrant dans le réseau préfère se lier à ceux qui sont déjà les mieux connectés.

Lorsqu'on combine l'étude des réseaux sociaux et celle de leurs productions culturelles dans un sens très large, c'est un nouvel objet scientifique qui surgit : la cognition sociale. Il s'agit d'une cognition distribuée sur l'ensemble des individus d'un réseau social. Elle peut être étudiée partout où les productions culturelles sont observables et notamment là où elles laissent une trace : elle est donc particulièrement accessible à partir des biens numériques de toutes sortes abrités par les grands réseaux informatiques. C'est un objet intrinsèquement pluridisciplinaire partagé par les sciences sociales et les sciences cognitives.

BIBLIOGRAPHIE

- R. Albert, A.L. Barabasi : Statistical mechanics of complex networks, *Reviews of Modern Physics* 74, 47-97 (2001)
P.W. Anderson : More is different: broken symmetry and the nature of the hierarchical structure of science, *Science* 177, 393-396 (1972)
R. Axelrod : The complexity of cooperation (Princeton University Press, 1997)
R. Badii, A. Politi : Complexity: hierarchical structures and scaling in physics (Cambridge University Press, 1999)
P. Baldi, S. Brunak : Bioinformatics: the machine learning approach (MIT Press, 1998)
Y. Bar-Yam : Dynamics of complex systems (Addison-Wesley, Reading [Mass.], 1997)
D. Beysens, G. Foray : Dynamical networks in physics and biology: at the frontier of physics and biology (EDP Sciences/Springer, 1998)
S. Bornholdt, H.G. Schuster : Handbook of graphs and networks (Wiley-VCH, 2003)
J.P. Bouchaud, M. Potters : Theory of financial risk and derivative pricing: from statistical physics to risk management (Camb. Un. Press, 2003)
P. Bourguine, J.P. Nadal : Cognitive economics: an interdisciplinary approach (Springer, 2004)
S. Camazine et al. : Self-organization in biological systems (Princeton University Press, 2001)
J.P. Crutfield : The calculus of emergence: computation, dynamics and induction, *Physica D* 75, 11-54 (1994)
W. D'Arcy Thompson : On growth and form (Cambridge University Press, 1917 ; réédité en 1992)
B. Derrida : Non linear cooperative phenomena in biological systems (Matsson ed.), pp. 216-226 (World Scientific, 1998)
G.M. Edelman : Bright air, brilliant fire: on the Matter of Mind (Basic Books, 1992) Trad. Biologie de la conscience (Odile Jacob, 1992)
A.W.F. Edwards : Foundations of mathematical genetics (Cambridge University Press, 2000)
G.B. Ermentrout : Neural networks as spatio-temporal pattern forming systems, *Reports on Progress in Physics* 61, 353-430 (1998)
C. Gomes, B. Selman : Satisfied with physics, *Science* 297, 784-785 (2002)
N. Guelzim et al. : Topological and causal structure of the yeast genetic network, *Nature Genetics* 31, 60-63 (2002)
S.S. Iyengar : Computer modeling and simulations of complex biological systems (CRC Press [Boca Raton], 1997)
S.A. Kauffman : At home in the universe: the search for the laws of self-organization and complexity (Oxford University Press, 1995)
S.A. Kauffman : The origins of order: self-organization and selection in evolution (Oxford University Press, 1993)
A. Kirman, J.B. Zimmerman : Economics with heterogeneous interacting agents (Springer, 2001)
R. Livi, A. Vulpiani : Kolmogorov's legacy in physics (Springer, 2003)
M. Lagués, A. Lesne : Invariances d'échelles (Belin [Paris], 2003)
S.C. Mannubia et al. : Genealogy in the era of genomics, *American Scientist* 91, 158-165 (2003)
M. Mezard et al. : Analytic and algorithmic solution of random satisfiability problems, *Science* 297, 812-815 (2002)
M. Mezard et al. : Spin glass theory and beyond: an introduction to the replica method and its applications (World Scientific Press [Singapore], 1987)
R. Milo et al. : Network motifs: simple building blocks of complex networks, *Science* 298, 824-827 (2002)
S. Moss de Oliveira et al. : Evolution, money, war and computers - non-traditional applications of computational statistical physics (Teubner [Stuttgart-Leipzig], 1999)
G. Nicolis, I. Prigogine : Exploring complexity (Freeman [New York], 1989)
J. Parisi et al. : Nonlinear physics of complex systems: current status and future trends (Springer, 1996)
E. Segal et al. : Module networks: identifying regulatory modules and their regulators from gene expression data, *Nature Genetics* 34, 166-176 (2003)
L.A. Segal : Mathematical models in molecular and cellular biology (Cambridge University Press, 1980)
L.A. Segal : Modeling dynamic phenomena in molecular and cellular biology (Cambridge University Press, 1980)
H. Simon : The architecture of complexity, *Proc. Am. Phil. Soc.* 106, 467-482 (1962)
M. Talagrand : Spin glasses: a challenge for mathematicians: cavity and mean field models (Springer, 2003)
R. Thomas, R. D'Arcy : Biological feedback (CRC Press [Boca Raton], 1990)
G. Weisbuch : Complex systems dynamics (Addison-Wesley [Reading, Mass.], 1991)
G. Weisbuch : Dynamique des systèmes complexes (CNRS/InterEditions, 1989) <http://www.lps.ens.fr/~weisbuch/livre/livcd.html>
S. Wuchty et al. : Evolutionary conservation of motif constituents in the yeast protein interaction network, *Nature Genetics* 35, 176-179 (2003)

Complex systems, dossier spécial dans *Nature* 410, 241-284 (2001)
La complexité, numéro spécial, *Pour la Science* 314 (2003)

ANNICK LESNE

OUVERTURE DES SESSIONS

► RALPH DUM :
LA RECHERCHE SUR LES SYSTÈMES COMPLEXES : UNE DIMENSION EUROPÉENNE

Ralph Dum, docteur en physique atomique, est depuis 2001 scientifique officer à la Commission européenne. Il a travaillé de 1990 à 1994 au JILA à Boulder (Colorado), puis de 1994 à 2001 à l'École normale supérieure à Paris. Ses travaux ont pour objet la condensation de Bose-Einstein et l'optique quantique.

Les systèmes de calcul, les réseaux de communication, les grands complexes industriels, l'économie globale, et même notre société dans son entier, présentent tous une caractéristique commune : il s'agit de systèmes toujours plus interdépendants dont le comportement est de plus en plus difficile à prédire, à contrôler et à maintenir. Partout, la complexité systémique – le niveau élevé d'interdépendance entre les composants souvent très hétérogènes du système – devient un obstacle. Les études récentes de systèmes complexes, tels qu'on les rencontre dans la nature ou dans la société – organismes vivants, sociétés animales, écosystèmes, mais aussi marchés et groupements culturels – suggèrent que des enseignements sur l'architecture des systèmes peuvent être tirés de ces systèmes "réels". Le moment semble arrivé de mettre en avant les études scientifiques des principes de fonctionnement de tels systèmes, dans nos efforts pour initier un saut technologique vers des systèmes à la conception et aux modes de contrôle radicalement nouveaux, mais aussi dans notre préparation aux bouleversements sociétaux et environnementaux auxquels nous serons bientôt confrontés. La Commission européenne s'est donc engagée à favoriser un ensemble varié de nouvelles approches scientifiques et technologiques multidisciplinaires - réunies sous la dénomination de "recherche sur les systèmes complexes" - au moyen d'un ensemble cohérent de mesures parmi lesquelles le financement direct de travaux de recherche, la mise en place d'infrastructures de recherche et l'encouragement à la prise en charge nationale de telles recherches.

► LUC STEELS : LE LANGAGE COMME SYSTÈME ADAPTATIF COMPLEXE

Luc Steels est professeur à l'Université de Bruxelles (VUB) et directeur du Sony Computer Science Laboratory à Paris. Le but de son travail actuel est de comprendre comment des agents ancrés physiquement peuvent développer de nouveaux concepts et les partager grâce à de nouveaux langages.

La recherche sur les origines et l'évolution du langage est revenue sur le devant de la scène internationale en tant que sujet hautement respectable, et la pertinence, pour cette recherche, des méthodes, des outils et des modèles de la recherche sur les systèmes complexes est largement reconnue. Il existe un éventail de plus en plus important d'applications dédiées à l'intelligence artificielle : protocole de négociation entre agents sur Internet, ontologies adaptables pour le web sémantique, interactions robot-humain et robot-robot, systèmes de langage adaptable, etc. Cette intervention donnera une vue d'ensemble des principaux sujets poursuivis dans ce domaine, de certains résultats obtenus, particulièrement en ce qui concerne la recherche sur les systèmes complexes, et des nombreuses questions ouvertes qui demeurent.

L. Steels (2003), *Evolving grounded communication for robots*. *Trends in Cognitive Science*, 7(7), 308-312
L. Steels (2002) *Linguistique Évolutionnaire et Vie Artificielle*. *Vie Artificielle*, 1 (1), Hermès, Paris.

COMITÉ DE PILOTAGE

- Henri Berestycki
- Paul Bourguine
- Marie Dutreix
- François Képès
- Annick Lesne
- Michel Morvan
- Jean-Pierre Nadal
- Jean Petitot
- Jean Sallantin
- Gérard Weisbuch

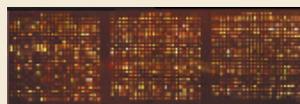
Chairman : Pierre Tambourin est, depuis 1998, directeur général de Genopole® à Evry. Il a présidé de 1998 à 2003, le conseil scientifique de l'Inra. De 1993 à 1997, il a dirigé le département des sciences de la vie du CNRS et, de 1989 à 1992, la section de biologie de l'Institut Curie.

► MARIE DUTREIX : DE LA DIVERSITÉ MOLÉCULAIRE À LA DIVERSITÉ INDIVIDUELLE

Marie Dutreix, directeur de recherche au CNRS, dirige une équipe dans l'UMR 2027 à l'Institut Curie. Ses travaux portent sur le maintien de l'intégrité des génomes. Elle utilise les outils d'analyse globale des transcriptomes et des génomes afin d'identifier les réseaux métaboliques impliqués dans la réponse aux radiations. Elle dirige en outre un programme collaboratif entre l'Institut Curie, le CEA et le Muséum National d'Histoire Naturelle, qui vise à identifier les variables individuelles affectant la sensibilité aux radiations.

L'amivée des méthodes d'analyse à grande échelle des génomes, transcriptomes ou protéomes d'un organisme a suscité beaucoup d'espoirs. Pour la première fois, il est possible de caractériser les variations des constituants de la cellule dans leur ensemble et sans a priori. Les applications sont multiples dans les domaines de la santé publique, de la surveillance de l'environnement et de la recherche fondamentale. Cependant, les biologistes se heurtent à des difficultés majeures : comment extraire l'information pertinente de la masse des données et comment distinguer les variations individuelles et circonstancielles (biologiquement significatives) des variations expérimentales et aléatoires (bruit) ? Des réponses partielles sont fournies par les méthodes mathématiques, statistiques et informatiques. Cependant, elles doivent être adaptées aux contraintes de la biologie, liées au faible nombre d'échantillons par rapport au nombre de variables. De plus, la complexité des systèmes nécessite la modélisation des réseaux d'interaction afin que l'on puisse définir les lois régissant les voies

de la diversité moléculaire...



à la diversité individuelle

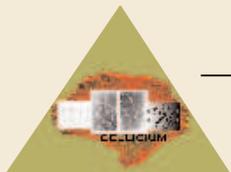


► JACQUES DEMONGEOT : LE PROBLÈME INVERSE EN BIO-MÉDECINE

Jacques Demongeot est actuellement directeur de l'Institut fédératif de recherche technologique "Ingénierie pour le Vivant" à l'université Joseph Fourier de Grenoble. Docteur en médecine et en sciences mathématiques, il est titulaire de la chaire de biomathématiques à l'Institut universitaire de France. Il est également responsable du département d'information médicale au CHU de Grenoble, de l'école doctorale "Santé, cognition et environnement" commune aux universités grenobloises, et chargé de la mission horizontale CNRS "Biologie systémique et complexité".

Le médecin est confronté à la surabondance des données sur un même patient et à leur variabilité biologique ou météorologique. Cela l'oblige à pratiquer une série de procédures d'interprétation du signal, des données et d'images pour aller rapidement au choix diagnostique et à la décision thérapeutique. Inversement, les grandes bases de données relatives à un ensemble de patients doivent être organisées et traitées pour que l'on puisse extraire les connaissances et préciser les modèles nécessaires aux procédures d'interprétation. Ce problème d'extraction des connaissances, dit problème inverse, est généralement de complexité exponentielle, avec un temps de calcul inaccessible, et ne devient praticable qu'à l'aide des connaissances générales et théoriques des biologistes et des médecins. La méthodologie du problème inverse est générique et applicable à tous les domaines d'interaction entre objets biologiques complexes, de la génétique humaine à la démographie, en passant par le métabolisme cellulaire, la physiologie tissulaire, etc. Ce n'est qu'un exemple d'utilisation des résultats de la théorie de la complexité en bio-médecine.

Dismorphies médicamenteuses spatio-temporelles



Extraction de connaissances et modélisation

Traitement de données, d'images, ...

► YVES FRÉGNAC : COMPLEXITÉ ET HIÉRARCHIE DE NIVEAUX DANS LES ENSEMBLES NEURONAUX

Yves Frégnac, directeur de recherche au CNRS, est directeur de l'unité de neurosciences intégratives et computationnelles sur le campus de Gif-sur-Yvette. De formation pluridisciplinaire, il s'intéresse à la genèse et plasticité de l'architecture fonctionnelle des cortex sensoriels. Il anime une unité de recherche regroupant des expérimentateurs, neurobiologistes et psychophysiciens, des physiciens et des modélisateurs.

Le cerveau peut être découpé en assemblées d'éléments allant du microscopique (molécules, synapses) au macroscopique (réseaux neuronaux, cortex). Le même problème d'échelle est retrouvé dans le domaine temporel, où l'activité cérébrale est régie par des processus dynamiques avec des constantes de temps de la microseconde à l'année. Un défi important est de lier ces hiérarchies d'organisation à partir de descripteurs acquis à différents niveaux de résolution spatio-temporelle. Un problème central concerne les inférences que l'on peut tirer des observations faites à un niveau particulier d'intégration sur la nature des opérations réalisées à un niveau plus élémentaire. Le plus souvent, la linéarisation éventuelle du calcul à un niveau intégré (par exemple les potentiels d'action) est supposée conservée à un niveau "plus" microscopique (potentiels synaptiques). Des concepts nouveaux sont nécessaires pour lier les variables descriptives de l'activité cérébrale (du métabolique et de l'hémodynamique au synaptique) et révéler la nécessité de complexité dans l'interaction entre processus élémentaires, interaction qui fait émerger, à un niveau d'organisation supérieur, des propriétés collectives absentes au niveau inférieur.

SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION

Chairman : Antoine Petit est professeur à Cachan et directeur-adjoint au ministère en charge de la Recherche. Ses travaux portent sur l'ensemble des méthodes formelles permettant d'accroître la confiance dans les logiciels critiques, dont les défaillances peuvent être désastreuses.

► MICHEL MORVAN : DE LA COMPLEXITÉ ALGORITHMIQUE À LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES COMPLEXES

Michel Morvan, professeur d'informatique à l'École normale supérieure de Lyon, est membre du laboratoire de l'informatique du parallélisme et responsable de l'Institut des systèmes complexes. Il est en outre membre junior de l'Institut universitaire de France (1998-2003).

La problématique de la modélisation des systèmes complexes – un petit nombre d'entités au comportement simple et interagissant selon des règles locales, qui produisent l'émergence de comportements complexes – est par nature très proche de celle des informaticiens qui, à partir de données et d'un ensemble de transformations élémentaires sur ces données, s'interrogent sur les résultats calculables et la manière de les calculer. De ce fait, de nombreuses questions issues des systèmes complexes sont naturelles pour les informaticiens ; ceux-ci ont par ailleurs développé des outils et des méthodes permettant de mieux comprendre le comportement des systèmes complexes. Ces relations croisées, illustrées par de nombreux exemples issus des deux domaines, nous conduisent à penser que l'approche informatique sera au cœur de la science des systèmes complexes et, en retour, que celle-ci offre d'ores et déjà un formidable horizon pour les informaticiens et au-delà, pour tous les scientifiques.

"Tempête de sable" - Représentation d'un écoulement de grains de sable dans un modèle simplifié : ensemble des états calculables à partir d'une donnée (état initial du tas, en haut de la figure).



► JEAN SALLANTIN : ASSISTER L'ACTIVITÉ SCIENTIFIQUE

Jean Sallantin est directeur de recherche au CNRS. Au laboratoire d'informatique, robotique et microélectronique de Montpellier (LIRMM), il participe à des recherches pluridisciplinaires sur les systèmes d'aide à l'activité scientifique.

L'observation en sciences est assistée par des panoplies d'outils de calcul de plus en plus perfectionnés ; ceux-ci servent à produire de grandes masses de données structurées, qui sont des séquences, des images, des séquences d'images. L'annotation fait partie du travail des scientifiques pour indexer, ordonner, confronter, comparer, compléter, ranger, interpréter et retrouver des données. L'annotation exprime (reflète?) leurs jugements sur ce qu'ils constatent dans les données, sur ce que construisent leurs protocoles de traitements, mais aussi sur ce qu'ils pensent des annotations préalablement réalisées. L'annotation s'inscrit ainsi dans une pratique de la construction et de l'examen de théories scientifiques selon des termes respectant les normes fixées par les épistémologues du siècle dernier. On y trouve par ailleurs les deux dynamiques spécifiques à l'activité scientifique : celle interne à un groupe de travail qui produit des théories selon un processus d'apprentissage guidé par la détection et de correction d'erreurs ; et celle qui anime par la société scientifique, laquelle s'attache à la preuve et la réfutation de théories publiées. Devant l'avalanche des données à annoter, nous étudions la façon d'introduire dans les jeux dynamiques de l'activité scientifique des assistants artificiels, les agents rationnels. Ce sont des machines capables de s'observer, d'apprendre, de construire des théories et de communiquer. Les systèmes résultants, intégrant des hommes et leurs assistants artificiels, sont régules par des systèmes de normes.

► MARC SCHOENAUER : UN MODÈLE DE CALCUL SUR UN RÉSEAU À STRUCTURE DE "PETIT MONDE"

Marc Schoenauer est directeur de recherche à l'INRIA, responsable de l'équipe TAO (Thème Apprentissage et Optimisation) dans l'unité de recherche Futurs, professeur chargé de cours à l'École polytechnique et rédacteur en chef de la revue "Evolutionary Computation" (MIT Press).

Dans le cadre du projet européen DREAM (Distributed Resource Evolutionary Algorithm Machine), un modèle Pair-à-Pair de communication a été mis au point, dans le but d'autoriser le déploiement de calculs distribués de type "algorithmes évolutionnaires" (c'est-à-dire des algorithmes d'optimisation inspirés par le parallèle avec l'évolution darwinienne des populations biologiques) sur un nombre de machines en réseau interdisant toute approche centralisée. Mais, indépendamment de toute application évolutionnaire, le modèle de communication obtenu est en lui-même une des principales réussites du projet DREAM : l'exposé s'attachera à montrer qu'il implémente le modèle dit des petits mondes ("small worlds"), et offre de plus un support concret à des calculs approchés sur des données de très grand volume totalement distribuées. Enfin, les perspectives en termes d'optimisation évolutionnaire en cours d'implantation, liés ou non à la fouille de masses de données, seront également évoquées.

MATHÉMATIQUES - PHYSIQUE

Chairman : Jean-Pierre Bourguignon est docteur ès sciences mathématiques et professeur de mathématiques à l'École polytechnique. Il s'est intéressé à différents domaines de la géométrie différentielle, notamment dans ses relations avec les théories physiques. Il dirige l'Institut des hautes études scientifiques à Bures-sur-Yvette.

▶ HENRI BERESTYCKI : RÉACTION-DIFFUSION ET APPLICATIONS

Henri Berestycki a enseigné à l'université Paris VI, à l'École polytechnique et à l'École normale supérieure. Il est directeur d'études à l'IEHES ou il dirige le centre d'analyse et de mathématiques sociales. Spécialiste des équations aux dérivées partielles et de l'analyse non-linéaire, il travaille aussi dans plusieurs domaines de modélisation.

Les phénomènes de propagation de fronts par réaction-diffusion jouent un rôle central dans des domaines variés, tels que la propagation des flammes et les transitions de phases en physique et en chimie. En biologie, les phénomènes de réaction-diffusion sont omniprésents : dynamique des populations, chimiotaxie, processus de cicatrisation, propagation des tumeurs, etc.

Les équations aux dérivées partielles de type parabolique non-linéaire décrivent ces phénomènes de réaction-diffusion. Une vaste littérature est consacrée à ces problèmes, principalement dans le cadre d'un milieu homogène. Dans le contexte des sciences de la vie, surtout en écologie, mais également en physique, la prise en compte de l'hétérogénéité du milieu apparaît comme un enjeu important, et soulève des problèmes mathématiques passionnants et difficiles.

Des phénomènes de propagation ou de transition de phase apparaissent aussi en sciences sociales dans la modélisation des comportements collectifs, comme dans la propagation de rumeurs ou le déclenchement de paniques. Les modèles discrets de propagation sur des graphes sont particulièrement intéressants dans ce cadre et conduisent aussi à de nouvelles questions mathématiques.

▶ BERNARD DERRIDA : SYSTÈMES HORS D'ÉQUILIBRE

Bernard Derrida est professeur à l'université Paris VI. Jusqu'en 1993, il a travaillé au laboratoire de physique théorique de Saclay. Il s'est intéressé aux systèmes désordonnés, aux transitions de phase, aux systèmes hors d'équilibre et au chaos.

Au cours de cet exposé seront abordés plusieurs aspects de la physique statistique hors d'équilibre : tout d'abord, le problème purement physique (mais qui intéresse les probabilistes) des fluctuations d'un système en contact avec plusieurs réservoirs. Ensuite, le problème de fronts brutes, qui apparaît en particulier dans certains modèles d'évolution en biologie, et qui posent des questions mathématiques non résolues. Enfin, des questions liées à la diversité génétique.

▶ JEAN-PIERRE NADAL : CONCEPTS ET OUTILS PHYSIQUES POUR LA MODÉLISATION DES SYSTÈMES COGNITIFS ET SOCIAUX

Jean-Pierre Nadal, directeur de recherches au CNRS, travaille au laboratoire de physique statistique de l'École normale supérieure et est responsable du CENECC, fédération d'activités interdisciplinaires au sein de l'École normale supérieure en partenariat avec l'École polytechnique. Il est en outre co-responsable du réseau de sciences cognitives d'Ile-de-France (RESCIF). Issu de la physique statistique des systèmes désordonnés, Jean-Pierre Nadal se consacre depuis le milieu des années 1980 aux sciences cognitives, et plus généralement à l'étude des systèmes complexes. Ses thématiques de recherche sont la modélisation à l'interface neurosciences / inférence statistique, la bioinformatique, la dynamique et les aspects cognitifs dans les systèmes économiques et sociaux.

La physique offre (au moins) trois points d'entrée majeurs dans l'analyse des grands réseaux adaptatifs tels que réseaux neuronaux, réseaux métaboliques et de contrôle génétique, réseaux sociaux : un cadre général issu de la physique statistique pour comprendre un comportement collectif à partir de la connaissance des interactions entre les unités composant le réseau ; les outils des systèmes dynamiques (déterministes ou stochastiques) ; et enfin des concepts et outils - partagés avec la théorie de l'information et les probabilités - pour analyser les mécanismes d'apprentissage et d'adaptation. Un exemple de succès de l'exploitation de ces outils et concepts, dans le domaine des sciences de la cognition et des neurosciences intégratives, est l'introduction par le physicien J.J. Hopfield, au début des années 1980, de la notion de réseau à attracteur, et l'analyse de tels réseaux comme modules de base d'une mémoire associative. Outre son intérêt du seul point de vue scientifique, ce travail fondateur a été pour beaucoup dans l'implication actuelle de physiciens, mais aussi de mathématiciens, dans la modélisation en neurosciences.

Au cours des dernières années, les sciences sociales se sont confrontées à la nécessité de considérer les interactions directes entre individus pour rendre compte de l'organisation de systèmes économiques (marchés) ou sociaux. Avec la disponibilité croissante (et essentielle) de données empiriques, cela conduit de manière très fructueuse à des travaux à l'interface physique / mathématiques appliquées / sciences de l'homme et de la société, dont beaucoup réunissent des chercheurs de disciplines différentes.

▶ MARC MÉZARD : SATISFACTION DE CONTRAINTES MULTIPLES : ENTRE PHYSIQUE ET INFORMATIQUE

Marc Mézard est directeur de recherche au CNRS et professeur chargé de cours à l'École polytechnique. Dans le laboratoire de physique théorique et modèles statistiques de l'université Paris Sud, il anime avec Olivier Martin une équipe travaillant sur les systèmes désordonnés.

Cet exposé propose d'aborder l'étude des systèmes complexes par la petite porte : l'examen de certaines convergences dans les concepts et méthodes utilisés pour résoudre des problèmes complexes impliquant de nombreuses variables, reliées par de nombreuses contraintes qui induisent des corrélations fortes. Les codes de correction d'erreur en théorie de l'information, le problème de satisfaction de contraintes en informatique et la transition vitreuse en physique statistique : ces trois sujets, au cœur de leurs domaines respectifs, peuvent sembler bien éloignés les uns des autres. Pourtant, ils partagent certains ingrédients fondamentaux, et les progrès récents dans ces domaines montrent des convergences inattendues, qui font apparaître une trame commune à de nombreux systèmes complexes. Nous les illustrons ici par l'idée de passage de messages entre les variables, à la base de techniques qui ont permis des percées spectaculaires dans ces trois problèmes.

SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ

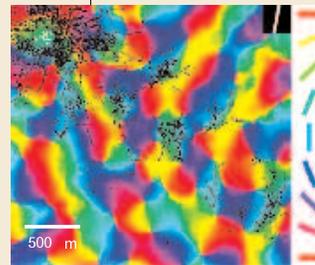
Chairman : Jacques Lesoume, professeur émérite au Conservatoire national des arts et métiers, est ancien président de l'association française des sciences économiques, fellow de la société d'économétrie, fondateur de la Seam et ancien directeur du journal Le Monde.

▶ JEAN PETITOT : GÉOMÉTRIE DE L'ARCHITECTURE FONCTIONNELLE DES AIRES VISUELLES

Spécialiste de modélisation en sciences cognitives, Jean Petitot est directeur du CREA (centre de recherches en épistémologie appliquée) à l'École polytechnique.

En neurophysiologie de la vision, des activités locales "micro" (neuronales) engendrent des patterns globaux "macro" (formes visuelles). C'est l'architecture fonctionnelle des aires visuelles qui explique ce changement de niveau. Les neurones visuels opèrent comme des filtres, par convolution du signal optique avec leurs profils récepteurs, et cela à plusieurs échelles différentes. Il s'agit d'une implémentation biologique d'un algorithme de type ondelettes. Le traitement des contours dans le cortex visuel débute dans l'aire visuelle primaire ou V1, où le signal rétinien est analysé par des neurones dont les champs récepteurs possèdent une préférence orientationnelle. Dans l'architecture fonctionnelle de l'aire V1, la structure en colonnes associe rétinotopiquement à chaque position rétinienne la droite projective des orientations en ce point. Elle est modélisable par une fibration munie d'une structure géométrique dite structure de contact, dont l'équivalent discret est le mécanisme du champ d'association proposé par D.J. Field, A. Hayes et R.F. Hess pour rendre compte d'expériences sur l'intégration des contours.

J. Petitot (2003), The neurogeometry of pinwheels as a sub-Riemannian contact structure, J. Physiol. sous presse.



Chaque point représente un neurone à de l'aire V1 associé à une position rétinienne, la couleur codant l'orientation préférentielle p de a. La diffusion à longue portée est restreinte à des domaines de même orientation p que celle du site d'injection. Il s'agit là de l'implémentation neuronale du célèbre principe gestaltiste de bonne continuité.

W. Bosking et al. (1997), J. Neurosci. 17-6, 2112-2127

▶ ALAN KIRMAN : L'ÉCONOMIE COMME SYSTÈME COMPLEXE

Alan Kirman est directeur d'études à l'IEHES et professeur d'économie à l'université d'Aix Marseille III et membre de l'Institut universitaire de France. Il s'est spécialisé dans la microéconomie, le choix social, la théorie des jeux et, plus récemment, l'étude des économies avec des interactions directes entre les agents.

Une fois acceptée l'idée d'une modélisation de l'économie comme système complexe, on peut étudier un nombre important de phénomènes économiques qui cadrent mal avec le modèle standard. Trois aspects sont importants. Tout d'abord, on a la possibilité d'introduire une dynamique réelle des phénomènes. Ensuite, on peut analyser les phénomènes de mode, les bulles et la formation des réseaux économiques par exemple. Enfin, on peut attribuer une rationalité plus limitée aux agents. Les agents agissent selon des règles de comportement simples, qu'ils modifient au cours du temps en fonction de l'expérience acquise. Des individus simples avec des connaissances locales, en interagissant et en s'auto-organisant, produisent une activité agrégée qui ne peut pas être réduite à celle d'un individu moyen. L'organisation économique se substitue à la rationalité extrême trouvée dans les modèles standards. La rationalité collective est intrinsèquement différente de celle des individus en économie standard.

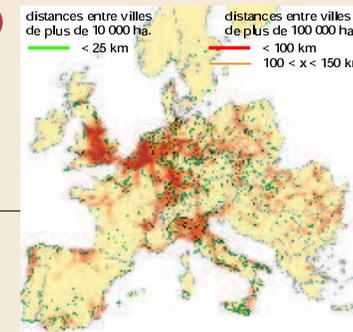
Pascal Petit (Ed.) (1998), L'économie de l'information, Les enseignements des théories économiques, La Découverte, Paris <http://durandal.cnrs-mrs.fr/GREQAM/cv/kirman.htm>

▶ DENISE PUMAIN : L'ÉVOLUTION DES SYSTÈMES URBAINS

Denise Pumain, professeur à l'université Paris I, membre de l'UMR Géographie-cités et directeur de la revue Cybergeog, est spécialiste de la modélisation des systèmes urbains. Elle dirige la collection Villes (Anthropos).

Les villes sont des entités complexes, qui réduisent les incertitudes de leur environnement par la mise en réseau de ressources lointaines et par une co-adaptation permanente aux innovations qu'elles produisent. Le modèle SIMPOP, qui traduit dans un système multi-agents les propositions d'une théorie évolutive des villes, a réussi à reproduire l'émergence et le maintien d'un système de villes hiérarchisé et différencié à partir d'un peuplement initial agricole homogène et uniforme. Il s'agit maintenant de s'attaquer à de nouveaux défis de modélisation qui rejoignent les défis posés aux maires des grandes villes. D'une part, il faut concevoir une représentation effective dans le modèle pour les fonctions d'innovation et de gouvernance, restées jusqu'ici en partie exogènes ou implicites ; d'autre part, peut-on identifier les conditions historiques et géographiques qui expliquent les différences observées entre les systèmes urbains européens et américains, ou entre ceux des pays développés et ceux des pays en développement, en vue de contrôler leur développement à plus long terme ?

S. Bura et al. (1996), Geographical Analysis 2: 161-178 et www.cybergeog.presse.fr



Les liens entre villes, proches produisent une image cohérente selon les niveaux de la hiérarchie urbaine et les échelles spatiales, qui révèle l'émergence durable de trois grandes formes de systèmes urbains en Europe.

PROGRAMME

JOURNÉE DU 11 FÉVRIER

- ▶ 9h00-9h10 - PAUL BOURGINE, FRANÇOIS KÉPÈS, MICHEL MORVAN : *Bienvenue*
- ▶ 9h15-9h45 - RALPH DUM : *Paysage européen* (p.7)
- ▶ 9h45-10h45 - LUC STEELS : *Le langage comme système complexe* (p.7)

PAUSE

- ▶ 11h00-12h00 - GÉRARD WEISBUCH : *Succès et défis: de l'auto-organisation à la dynamique inverse*

REPAS

- ▶ 14h00-16h00 **BIOLOGIE (P.8)**
CHAIR : PIERRE TAMBOURIN
 - MARIE DUTREIX : *De la diversité moléculaire à la diversité individuelle*
 - JACQUES DEMONGEOT : *Le problème inverse en bio-médecine*
 - YVES FRÉGNAC : *Complexité et hiérarchie de niveaux dans les ensembles neuronaux*

PAUSE

- ▶ 16h30-18h30 **SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION (P.9)**
CHAIR : ANTOINE PETIT
 - MICHEL MORVAN : *De la complexité algorithmique à la modélisation des systèmes complexes*
 - JEAN SALLANTIN : *Assister l'activité scientifique*
 - MARC SCHOENAUER : *Un modèle de calcul sur un réseau à structure de petit monde*

JOURNÉE DU 12 FÉVRIER

- ▶ 9h30-12h00 **MATHÉMATIQUES / PHYSIQUE (P.10)**
CHAIR : JEAN-PIERRE BOURGUIGNON
 - HENRI BERESTYCKI : *Réaction-Diffusion et applications*
 - MARC MÉZARD : *Satisfaction de contraintes multiples : entre physique et informatique*
 - JEAN-PIERRE NADAL : *Concepts et outils physiques pour la modélisation des systèmes cognitifs et sociaux*
 - BERNARD DERRIDA : *Systèmes hors d'équilibre*

REPAS

- ▶ 14h00-16h30 **SCIENCES DE L'HOMME ET DE LA SOCIÉTÉ (P.11)**
CHAIR : JACQUES LESOURNE
 - JEAN PETITOT : *Géométrie de l'architecture fonctionnelle des aires visuelles*
 - ALAN KIRMAN : *L'économie comme système complexe*
 - DENISE PUMAIN : *L'évolution des systèmes urbains*

PAUSE

- ▶ 16h30-17h30 PAUL BOURGINE, FRANÇOIS KÉPÈS, MICHEL MORVAN, JEAN-PIERRE NADAL :
Discussion générale et conclusions