

SYSTÈMES
COMPLEXES
ILLUSTRÉS

SYSTÈMES COMPLEXES

REGARDS CROISÉS DE CHERCHEUR.E.S

LA DÉPÊCHE
DU MIDI



COLLECTION
PETIT ILLUSTRÉ n°34

4,90€

SOMMAIRE « Systèmes complexes illustrés »

Pages 2-3	Introduction aux systèmes complexes
Pages 4-5	Maîtriser les phénomènes émergents des applications informatiques complexes
Pages 6-7	Simuler le social : une modélisation des systèmes complexes
Pages 8-9	L'algorithme de Google pour classer l'information : des sites web au classement des universités
Pages 10-11	Les mobilités au cœur de la complexité urbaine
Pages 12-13	Quelle morale pour les voitures sans conducteur.trice.?
Pages 14-15	Dynamique de décisions collectives
Pages 16-17	Décrypter les interactions entre individus dans un banc de poissons
Pages 18-19	Comprendre les comportements collectifs des cellules tumorales
Pages 20-21	Molécules, organisez-vous et géliez !
Pages 22-23	La pollinisation, plus complexe qu'il n'y paraît
Pages 24-25	La biodiversité est l'assurance-vie de l'écosystème
Pages 26-27	Penser la ville de demain grâce à Monte Carlo
Pages 28-29	Quand le désordre aide à mieux comprendre l'ordre des choses : le cas des risques industriels
Pages 30-31	La ville et le climat : deux systèmes complexes
Pages 32-33	Les aléas de la prévision des catastrophes hydrométéorologiques
Pages 34-35	Crues et inondations : mieux comprendre l'aléa pour mieux le prévoir
Page 36	L'Institut d'études des systèmes complexes de Toulouse

ÉDITO

VOUS AVEZ DIT « SYSTÈME COMPLEXE » ?

Pour comprendre ce que signifie cette expression, allons voir du côté de l'étymologie. Le mot « système » dérive du grec ancien *syn* : avec et *tithémi* « je place », qui donnera en grec le verbe *syteō* signifiant « assembler ». « Complexe » vient du latin *complexus* « entrelacé ». Aussi cette expression englobe-t-elle la notion d'assemblage de parties qui interagissent entre elles.

Cela ouvre un champ d'exploration formidable d'objets variés : une foule d'individus, un banc de poissons, une ville, un réseau urbain, un réseau de neurones, des réseaux sociaux, les paramètres météo. Ces objets peuvent tous être décrits comme des systèmes complexes. Ce n'est que récemment que ces systèmes, qui nécessitent une approche multidisciplinaire, sont devenus des objets d'étude à part entière. Les scientifiques s'intéressent aujourd'hui à décrire le comportement collectif de ces objets. Leur compréhension est rendue possible grâce à notre capacité actuelle à accumuler de nombreuses données sur les objets étudiés, à les analyser afin de paramétrer le comportement collectif du système, enfin à le modéliser. Celui-ci n'est pas qu'une simple somme de comportements individuels car les interactions entre les objets/individus modifient la donne. Cette interaction est ce qui rend le système complexe donc riche à étudier.

De nombreux.ses chercheur.e.s toulousain.e.s se sont lancé.e.s dans cette aventure hautement multidisciplinaire puisque sont concernées des champs de recherche variés : la physique théorique, les mathématiques, l'informatique, les sciences humaines et sociales, les sciences du climat, l'astrophysique, l'écologie, la biologie ou encore l'économie... À travers des exemples concrets, les scientifiques vous invitent à découvrir, à la lecture de ce *Petit illustré*, l'univers fascinant des systèmes complexes dans lesquels le proverbe « *L'union fait la force* » est plus que jamais d'actualité !

Christophe Giraud

Délégué régional du CNRS en Midi-Pyrénées

CONTRIBUTEUR :

Bertrand Jouve, France, Amériques, Espagne, sociétés, pouvoirs, acteurs – Framespa (CNRS, Université Toulouse – Jean Jaurès).
Coordonnateur de l'Institut d'études des systèmes complexes de Toulouse (XSYS).

INTRODUCTION

AUX SYSTÈMES COMPLEXES

Quel rapport existe-t-il, entre l'effondrement des marchés boursiers, un embouteillage ou encore les Printemps arabes ? Ce sont des exemples de systèmes complexes dont différentes disciplines scientifiques aident à mieux connaître les interactions.

Dire que la complexité est partout est bien sûr un cliché : changements environnementaux, mondes sociaux, dynamiques collectives dans les systèmes biologiques, mondes urbains et systèmes de transports, événements naturels extrêmes, sont des exemples qui illustrent bien cette diversité de thématiques. Analyser les systèmes complexes a été difficile jusqu'au milieu du XX^e siècle, en partie à cause du manque de données. Le monde numérique qui est maintenant le nôtre depuis la fin des années 90 a permis de produire une grande quantité de données sur la façon dont ces systèmes fonctionnent, ce qui, combiné à l'augmentation des puissances de calcul et de stockage, a autorisé un accès renouvelé vers la compréhension et la maîtrise de la complexité. Un système complexe est constitué de nombreuses entités dont les interactions produisent un comportement global du système qui ne

peut être facilement expliqué à partir des seules propriétés individuelles de ses constituants : on parle d'émergence. Par exemple, les phénomènes de bulles financières ou d'effondrement des marchés ne sont pas la simple concaténation des transactions des traders. Autre exemple, un embouteillage est plus que l'addition des comportements individuels des conducteurs. Dans ces différents exemples, les interactions des individus entre eux se superposent aux comportements individuels.

Effet domino

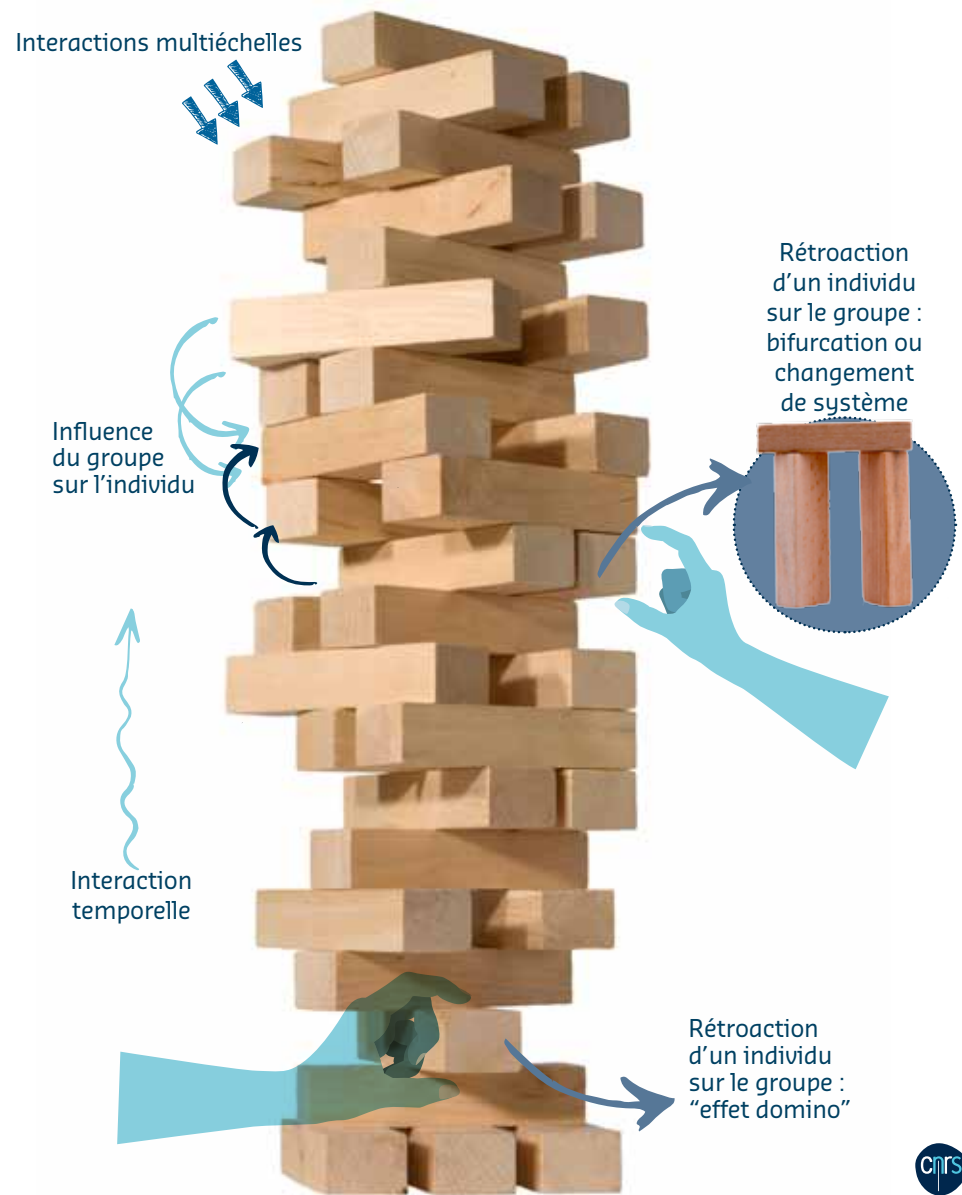
Bien définir les interactions dont il est le siège constitue une clef importante pour la compréhension et la maîtrise de l'évolution d'un système complexe. Ces interactions sont d'abord temporelles, c'est-à-dire qu'elles évoluent dans le temps. Elles sont aussi multi-échelles, c'est-à-dire qu'elles opèrent à différents niveaux sur le système. Dans un réseau social par exemple, un individu peut agir sur un groupe dont il fait partie ou

dont il subit l'influence : on parle alors de rétroaction sur le système. Ces phénomènes de rétroactions, qui ne sont pas toujours explicites, entraînent des comportements globaux qui sont dits non-linéaires au sens où ils ne sont pas simplement proportionnels aux comportements individuels des composants élémentaires. Peuvent s'en suivre des phénomènes de cascades, appelés aussi « effet domino », et des bifurcations dans l'évolution du système. Une bifurcation correspond à un changement subit du système. Que l'on pense à la faillite de la banque d'investissement *Lehman Brothers*, le 14 septembre 2008, ou à l'immolation de Mohamed Bouazizi, le 17 décembre 2010, les dynamiques en cascade ont conduit dans le premier cas à une crise qui a menacé la stabilité politique à l'échelle internationale et, dans le deuxième, aux Printemps arabes.

Nouveaux concepts et nouveaux outils

Ce sont toutes ces dynamiques que nous avons du mal à analyser, à comprendre et à prédire avec les méthodes usuelles reposant souvent sur des principes de causalité et de linéarité. En renouvelant les concepts, les méthodes et les outils, la science de la complexité permet des avancées majeures. Les outils récents sont au croisement de la statistique, de l'informatique, de la théorie des graphes ou de la physique (*machine learning, statistical learning, data mining, random network, agent-based models*), ils utilisent les concepts disciplinaires de la biologie ou de la sociologie (*multi-scale, community, self-organisation, weak and strong ties*) et se nourrissent de « Big Data ». ●

ILLUSTRATION D'UN SYSTÈME COMPLEXE



CONTRIBUTRICE :

Marie-Pierre Gleizes, Institut de recherche en informatique de Toulouse – IRT (CNRS, INP Toulouse, Université Toulouse Capitole, Université Toulouse – Jean Jaurès, Université Toulouse III – Paul Sabatier).

Smartphones, objets interconnectés...
l'intelligence artificielle envahit le quotidien.
Les chercheurs réfléchissent à de nouvelles
approches pour étudier ces systèmes complexes.

MAÎTRISER LES PHÉNOMÈNES ÉMERGENTS DES APPLICATIONS INFORMATIQUES COMPLEXES

Comment contrôler une myriade d'objets connectés ?

La famille *Geek* dispose de nombreux objets connectés dans sa maison : volets, caméras, lave-linge, cafetière, pièces thermostatées, éclairages, panneaux solaires, agendas... Elle veut les contrôler à distance pour améliorer son bien-être et optimiser sa consommation (électricité, eau, gaz). Elle passe deux heures quotidiennes à rechercher le meilleur compromis possible !

La famille *Geek* a décidé de faire automatiser ce contrôle par une entreprise spécialisée qui gère des milliers d'autres ménages. Ce scénario à peine futuriste provient de la tendance actuelle où nos smartphones, tablettes, ordinateurs, dispositifs électroniques en tous genres communiquent régulièrement - et souvent à notre insu - des informations sur Internet.

Des phénomènes émergents en informatique : enjeux et principes

Comme l'ensemble des dispositifs interconnec-

tés dans une maison, les systèmes complexes sont constitués de nombreuses parties interdépendantes qui engendrent des phénomènes dits émergents dans le sens où ils n'existent pas dans les parties prises isolément (comme la conscience dans un cerveau). Ces phénomènes émergents empêchent de concevoir des systèmes informatiques complexes avec les méthodes classiques.

La recherche informatique menée en Intelligence Artificielle, consiste à trouver une nouvelle approche pour concevoir ces systèmes complexes. Les phénomènes émergents sont maîtrisés par un processus permanent d'auto-adaptation du système au cours de son activité. Ainsi, le système s'adapte de manière autonome à son environnement ce qui simplifie le développement des applications et améliore leurs performances.

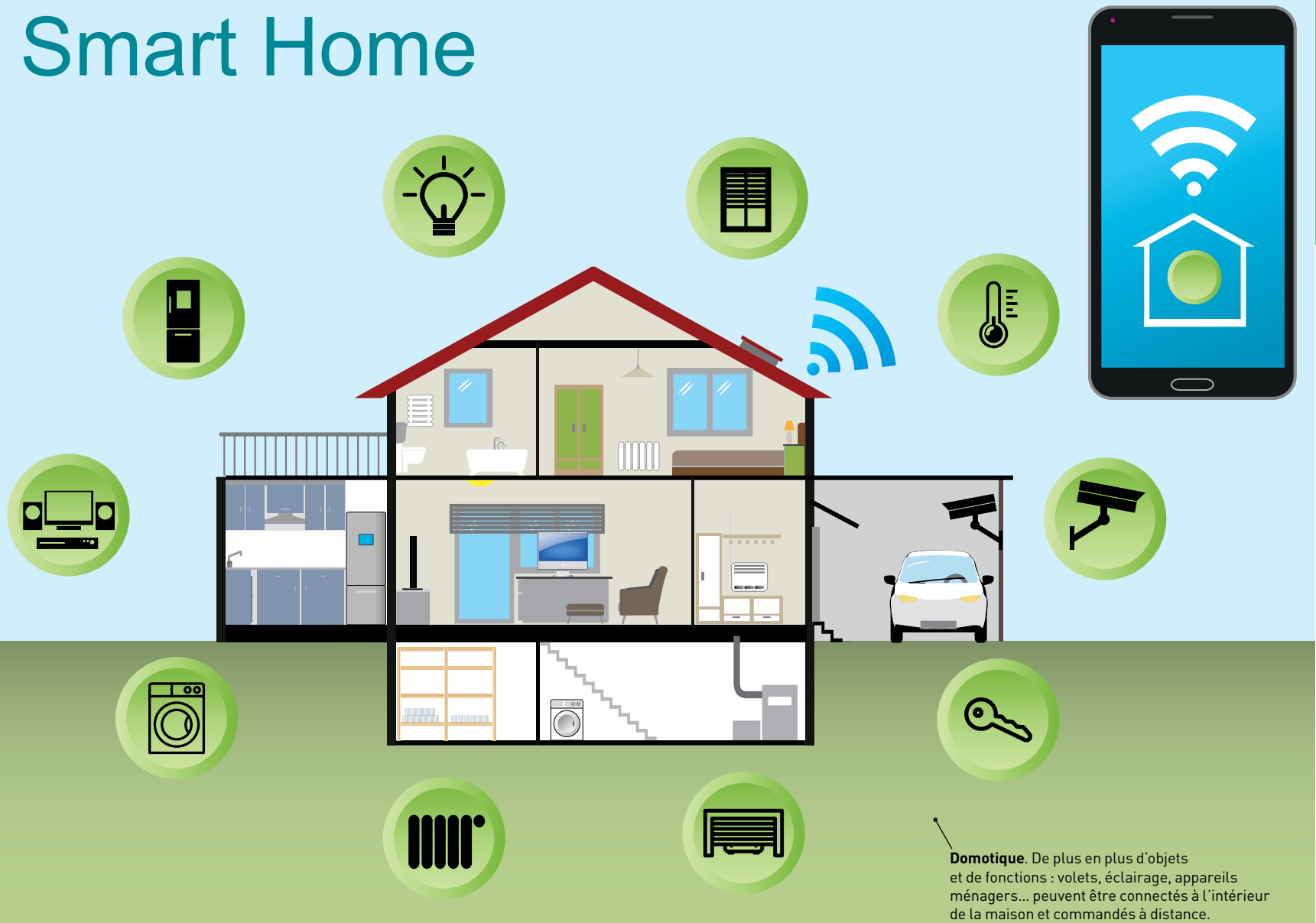
Pour atteindre cet objectif, ont été définies des lois comportementales de coopération qui régissent localement les éléments du système appelés agents qui sont par exemple les

objets connectés. En fonctionnement, ces lois peuvent inciter localement un agent du système à modifier ses interactions avec le voisinage, ou à faire apparaître/disparaître des agents : c'est le phénomène d'auto-organisation. Le comportement collectif s'adapte ainsi aux situations changeantes sans qu'aucun agent ne le maîtrise globalement. Cette théorie permet la conception d'applications plus sophistiquées, plus sûres, plus robustes dans de multiples domaines tels que : l'apprentissage, la planification ou le contrôle.

Perspectives

L'auto-adaptation coopérative des applications informatiques est un moyen de maîtriser la survenue de phénomènes émergents sans devoir affronter la complexité du problème global. L'informatique du complexe peut ainsi participer à répondre aux défis sociétaux, médicaments innovants, « smart cities », changement climatique, usine du futur, « *smart grids* ». ●

Smart Home



Domotique. De plus en plus d'objets et de fonctions : volets, éclairage, appareils ménagers... peuvent être connectés à l'intérieur de la maison et commandés à distance.

CONTRIBUTEUR :

Frédéric Amblard, Institut de recherche en informatique de Toulouse – IRIT (CNRS, INP Toulouse, Université Toulouse Capitole, Université Toulouse – Jean Jaurès, Université Toulouse III – Paul Sabatier).

SIMULER LE SOCIAL

UNE MODÉLISATION DES SYSTÈMES COMPLEXES

Une rumeur, l'émergence d'idées ou d'idéologies nouvelles appartiennent aux phénomènes sociaux collectifs qui peuvent être étudiés à l'aide des outils proposés par les systèmes complexes, en particulier la modélisation.

Quoi de commun entre l'adoption ou la diffusion d'une innovation, la propagation d'une rumeur, et l'émergence de nouveaux mouvements politiques ? Dans chacun des cas, il s'agit de phénomènes sociaux collectifs qui trouvent leur origine dans des comportements et des décisions individuels. C'est une des caractéristiques des systèmes complexes en général : des ensembles d'entités en interaction (niveau individuel) dont émergent des phénomènes au niveau macroscopique (niveau collectif). Les systèmes sociaux, humains en particulier, possèdent également d'autres propriétés. Par exemple, la capacité qu'ont les individus de pouvoir se représenter (pas toujours de manière précise ni même correcte) l'état global du système et de prendre en compte ces représentations dans leur prise de décision. Ceci a

été observé au cours du premier tour des récentes élections présidentielles lorsqu'un certain nombre d'électeurs cherchaient à voter pour la personne qui pourrait battre le Front National au deuxième tour.

Un choix collectif par défaut

Cette situation est capturée par la métaphore du concours de beauté de Keynes¹ où il s'agit pour les membres du jury (les électeurs.trices) de voter pour le candidat dont ils pensent qu'il sera élu par les autres membres du jury, sans pouvoir communiquer directement entre eux. Situation dans laquelle chacun-e, en essayant d'anticiper le choix collectif, peut être amené.e à ne pas choisir la personne qu'il préfère ce qui peut conduire collectivement à l'élection d'une personne qui ne serait le meilleur



DES DÉCISIONS INDIVIDUELLES
À L'ORIGINE DES PHÉNOMÈNES
SOCIAUX COLLECTIFS

choix individuel d'aucun membre du jury. Ces dilemmes sociaux, aussi bien que les phénomènes sociaux cités plus haut peuvent être étudiés à l'aide des outils et méthodes proposés par les systèmes complexes.

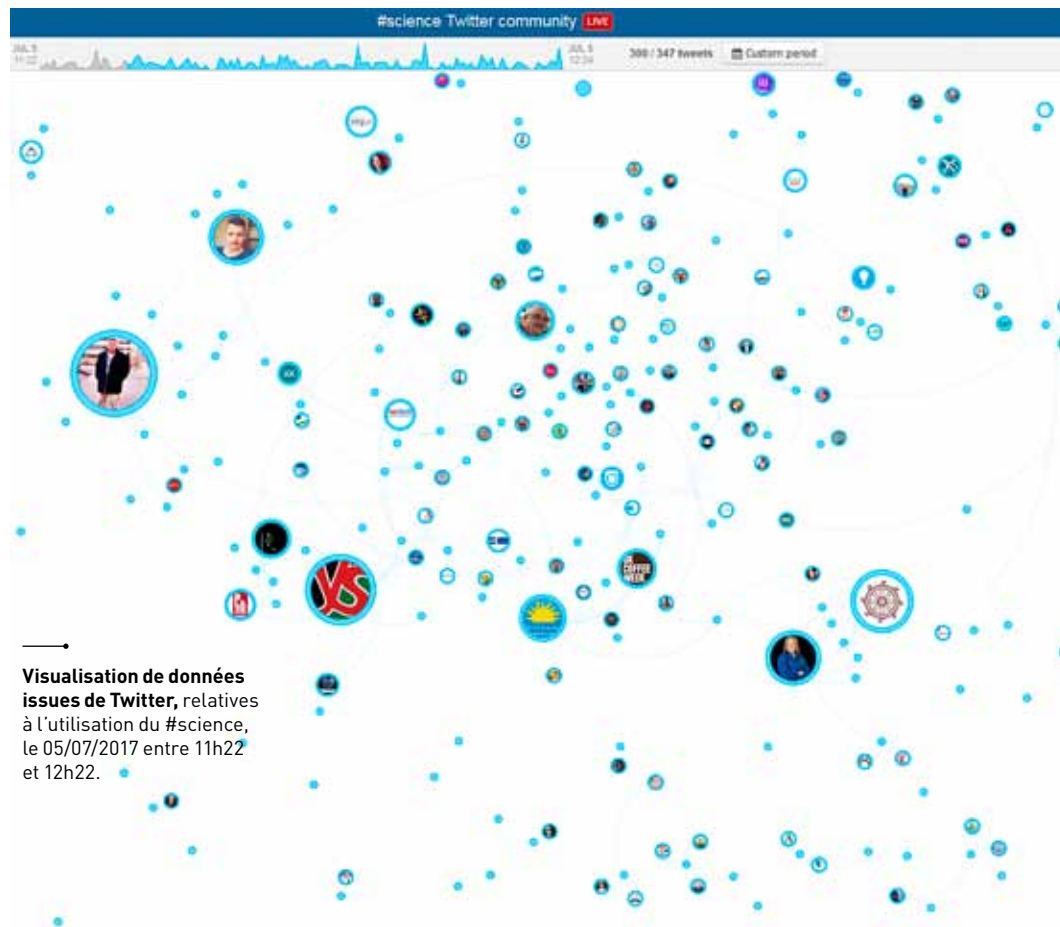
Anticiper le résultat d'une simulation

En particulier, la modélisation et la simulation multi-agents est une approche qui permet de construire des programmes informatiques qui modélisent les individus, leurs décisions et leurs comportements mais également les interactions entre ces individus (imitation, diffusion d'information, influence sociale). Ces programmes prennent en compte différentes structururations sociales (réseaux sociaux par exemple) ou spatiales. Une fois construit, le programme est une forme de projection par l'ordinateur des comportements d'une société artificielle d'entités en interaction. Cette approche permet d'anticiper le résultat des simulations suite aux comportements et aux interactions de centaines voire de milliers d'agents. À la surprise du modélisateur qui a conçu les comportements et règles de décision individuels, le résultat est souvent différent de celui qu'il avait prévu du fait des effets collectifs. Bien plus qu'un outil de prévision ou de prédiction des phénomènes sociaux réels, il permet aux scientifiques de comprendre les mécanismes individuels produisant des régularités collectives émergentes et d'en identifier les éléments importants. ●

(1) *Le Monde* : 27/04/2017 : « Le premier tour de l'élection présidentielle a tourné au concours de beauté », par David Chavalarias.



COMPRENDRE LES MÉCANISMES INDIVIDUELS PRODUISANT DES RÉGULARITÉS COLLECTIVES



—
Visualisation de données issues de Twitter, relatives à l'utilisation du #science, le 05/07/2017 entre 11h22 et 12h22.

CONTRIBUTEUR :

Bertrand Georgeot, Laboratoire
de physique théorique – LPT (CNRS,
Université Toulouse III – Paul Sabatier).



Représentation schématique
d'un réseau complexe,
avec des liens reliant les
différents nœuds.

©Dima Shepelyansky

L'ALGORITHME DE GOOGLE

POUR CLASSER L'INFORMATION : DES SITES WEB AU CLASSEMENT DES UNIVERSITÉS

Les scientifiques appliquent l'algorithme PageRank, utilisé par Google, à d'autres systèmes complexes qui peuvent, comme le Web, être décrits sous forme de réseau.

Les systèmes complexes génèrent souvent de gigantesques bases de données. L'enjeu n'est pas seulement d'y trouver de l'information, mais aussi de pouvoir identifier celle qui est la plus pertinente. Un algorithme qui a fait la fortune de *Google* permet de répondre à ce problème, même au-delà d'Internet. Le succès de l'entreprise *Google* est dû, en grande partie, à la mise au point, par Sergei Brin et David Page, d'un algorithme permettant de hiérarchiser les sites pour un moteur de recherche, l'algorithme dit de PageRank. En effet, les moteurs de recherche sur le Web effectuent deux processus successifs : parcourir tous les sites Web et les indexer, pour savoir lesquels ont utilisé un terme ou un mot-clé choisi par l'internaute ; ensuite, disposer d'un outil qui ordonne ces pages Web pour l'utilisateur. C'est là

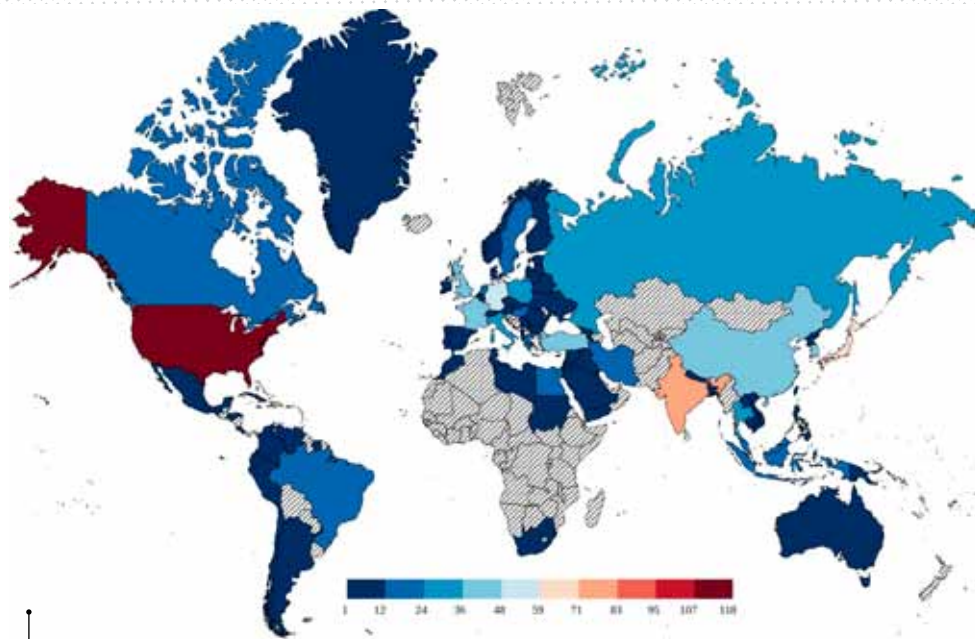
qu'intervient l'algorithme de PageRank : il permet de donner un ordre à cette liste de sites, du plus important au moins important.

Comment fonctionne l'algorithme de PageRank ?

Le Web, comme de nombreux autres systèmes complexes, se présente sous la forme d'un réseau : les sites Web (nœuds du réseau) sont reliés par des liens (les liens hypertexte, c'est-à-dire les autres sites Web dont l'adresse *www* est indiquée sur le site). Pour ce type de système, il est possible de hiérarchiser les sites du plus important au moins important en étudiant comment un surfeur aléatoire se déplace sur le réseau. Imaginons une personne qui avance d'un site à un autre en suivant les liens du réseau. Sur chaque site, elle



L'ALGORITHME DE PAGERANK
OUVRE DES PERSPECTIVES
FASCINANTES...



Distribution géographique des universités apparaissant dans les 100 les mieux classées par l'outil du PageRank appliqué à l'encyclopédie en ligne *Wikipédia* en 24 langages différents. Les couleurs s'échelonnent de bleu foncé (peu d'universités) à rouge foncé (grand nombre d'universités). Les pays hachurés n'ont aucun représentant dans les 100 universités les mieux classées pour les 24 éditions de *Wikipédia*. ©Dima Shepelyansky

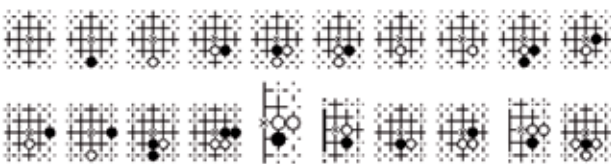
choisit au hasard vers quel autre site aller. Imaginons maintenant que l'on attende un temps extrêmement long : le surfeur aléatoire revient plus souvent à certains endroits, que l'on peut considérer comme plus importants que d'autres. L'algorithme de PageRank permet de calculer de manière précise la probabilité de présence de ce surfeur sur chaque site dans la limite des très grands temps. Ceci permet de classer tous les sites de manière précise, et de

proposer aux internautes utilisant le moteur de recherche une liste de site par ordre d'importance. Le succès de *Google* a montré que ce classement était effectivement raisonnable.

L'algorithme de PageRank pour d'autres réseaux complexes

De nombreux systèmes complexes peuvent s'écrire sous la forme d'un réseau comme le Web, avec des nœuds reliés par des liens. Ceci peut aller des réseaux sociaux aux réseaux de transport, mais peut aussi s'appliquer à des exemples où la structure en réseau n'est pas immédiatement visible. Les scientifiques ont appliqué les outils du PageRank à de tels types de réseaux au-delà du Web. Par exemple, l'étude des liens entre pages de l'encyclopédie en ligne *Wikipedia* a permis de définir un nouveau classement des universités mondiales, différent du fameux classement de Shanghai. Sur le même principe, ils ont étudié le réseau construit à partir de parties de jeux de go : les liens du réseau sont les coups qui se suivent dans des parties jouées. L'utilisation de l'algorithme de PageRank permet de déterminer les coups les plus importants de différentes catégories de joueurs et de distinguer les stratégies des parties jouées par les humains et les ordinateurs.

Ainsi la puissance de cet algorithme de PageRank ouvre des perspectives fascinantes sur la façon dont tout un chacun peut se retrouver au sein d'une base des données et plus généralement au sein de n'importe quel ensemble multi-dimensionnel à la manière du fil d'Ariane au sein du labyrinthe. ●



Les vingt coups les plus importants au jeu de go d'après l'algorithme du PageRank pour des joueurs humains (le résultat est différent pour les parties jouées par des ordinateurs). Chacune des plaquettes représente un environnement possible pour une pierre jouée à l'emplacement de la croix. ©Bertrand Georgeot

CONTRIBUTEURS/TRICE :

Laureline Angot, Philippe Dugot,
Bruno Revelli, Jean-Pierre Wolff,
Laboratoire interdisciplinaire solidarités,
sociétés, territoires – LISST (CNRS,
Université Toulouse – Jean Jaurès,
EHESS - ENSFEA).

Pour faire entrer le train dans la ville :

exemple du tram-train à Karlsruhe
(Allemagne). © Jean-Pierre Wolff



LES MOBILITÉS

AU CŒUR DE LA COMPLEXITÉ URBAINE

La mobilité est au cœur des problèmes qui animent les villes. Sa complexité réside, en partie, dans le conflit entre l'intérêt collectif et les intérêts particuliers.

Les villes sont le siège d'un paradoxe. Elles sont par définition des nœuds d'échanges d'hommes et de marchandises, mais cette accumulation produit des dysfonctionnements sources de pertes de temps, d'atteintes à la qualité de vie. Lorsque la condensation des dysfonctionnements devient trop importante, la ville

ne peut plus tenir son rôle de commutateur des flux. Le problème est que le coupable est toujours l'autre : le livreur qui bouche la rue, l'automobiliste qui n'avance pas assez vite ou le piéton qu'il faut laisser passer. Toute la complexité des mobilités urbaines est là. Chacune possède sa légitimité d'un point de vue individuel (entreprise ou particulier). Mais la concentration des flux débouche sur des contradictions croissantes entre les usagers d'habitudes ou de cultures variées. La mobilité est parfois perçue comme un moyen de choisir sa ville et peut être considérée comme un droit. Cette situation demande une gestion lourde budgétairement pour la collectivité et nourrit souvent des insatisfactions tant le consensus est difficile à atteindre.

Des accommodements successifs

Les technologies de l'information, de plus en plus embarquées dans des véhicules de livraison ou les transports collectifs, aident à ajuster les flux de personnes et de mar-

chandises. Les réseaux sociaux permettent de développer des solutions de partage (co-voiturage par exemple). L'amélioration permanente des infrastructures et des réseaux de transports collectifs, la mise à disposition de véhicules de moins en moins polluants sont d'autres éléments de réponse. Mais tout cela ne suffit pas car le problème ne réside pas simplement dans les outils d'une fluidification des vecteurs de transports. Une gestion correcte ne peut être que le fait d'accommodements successifs entre tous les besoins de mobilité. Il convient aussi de diminuer l'impact sur les ressources communes.

Le rôle de la recherche

C'est là qu'intervient le rôle des chercheur.e.s en sciences humaines et sociales en charge d'une réflexion devant intégrer les dimensions à la fois techniques, urbanistiques, économiques, environnementales, sanitaires, sociales, culturelles et politiques des mobilités. Il s'agit de transmettre leurs connaissances sur les expériences et réalisations qui existent ailleurs. Il s'agit aussi, surtout, de participer à la production d'une information plus qualitative à base d'enquêtes auprès des divers utilisateurs. C'est une possibilité d'entrevoir dans leur plura-



PRODUIRE UNE
INFORMATION
PLUS QUALITATIVE
À BASE
D'ENQUÊTES
AUPRÈS DES
UTILISATEURS



Thrombose urbaine régulière pour cause de livraisons.
© Philippe Dugot

lité les regards et les besoins des uns et des autres. La cartographie des flux d'humains et de marchandises, leur inscription dans le reste de la ville avec ses équipements, logements ou zones d'activité, permet d'en visualiser le fonctionnement et d'en anticiper les besoins. Les chercheur.e.s mettent ainsi en avant les enjeux collectifs qui existent derrière la question des mobilités : enjeux économiques mais aussi enjeux environnementaux et sanitaires. En définitive, ces travaux de

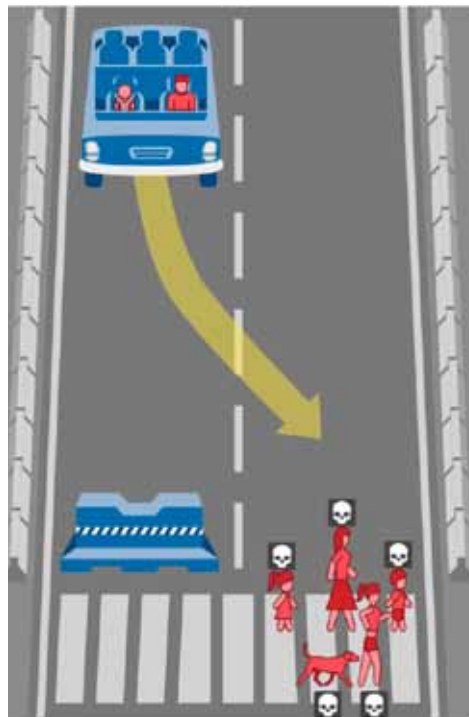
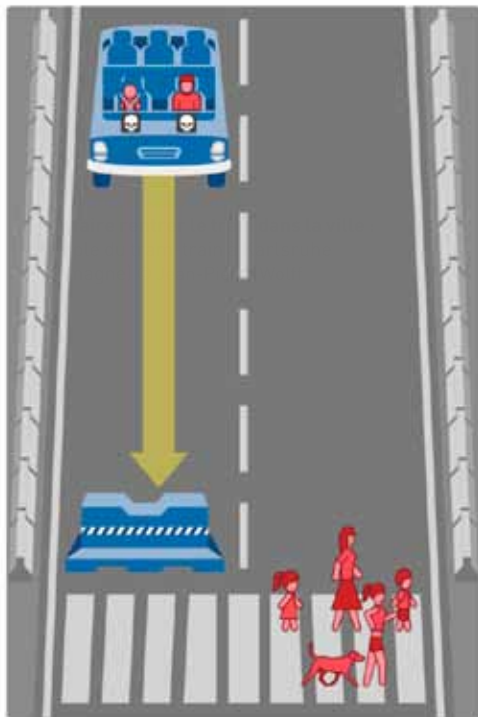
recherche ont pour objectif d'accompagner les élu.e.s dans une démarche d'évolution des pratiques de mobilité. Aux côtés d'autres acteur.e.s, l'intérêt de ces réflexions et études est de contribuer à l'élaboration de plans de déplacements dont la mise en place relève des collectivités publiques. ●

CONTRIBUTEUR :

Jean-François Bonnefon, Centre de recherche en management – CRM (CNRS, Université Toulouse Capitole, TSE R/IAST).

Une voiture sans conducteur fait face à un choix difficile : sauver les piétons ou bien ses propres passagers ?

© Lyad Rahwan



QUELLE MORALE POUR LES VOITURES SANS CONDUCTEUR ?

Les robots ne devraient pas pouvoir tuer des humains, et pourtant les voitures sans conducteur devront parfois choisir qui va vivre et qui va mourir dans un accident. Comment les programmer sans plonger dans nos propres contradictions morales ?

L'avènement des voitures sans conducteur nous promet un trafic plus fluide, moins polluant, et surtout moins dangereux. En effet, selon certaines estimations, jusqu'à 9 accidents sur 10 sont le résultat d'une erreur humaine. Dans la mesure où une voiture sans conducteur ne se fatigue pas, n'est pas distraite, et respecte scrupuleusement le code de la route, on peut penser qu'elle évitera la plupart de ces accidents.

Certains accidents, pourtant, ne pourront pas être évités, et la voiture sans conducteur pourra avoir à faire des choix très difficiles. Par exemple, que faire dans une situation où la voiture doit choisir entre écraser un groupe de piétons ou sacrifier la vie de ses passagers pour les éviter ?

Une décision programmée

Les conducteurs humains n'ont pas à se poser ce genre de question, car lorsque les choses se passent en une fraction de

LA DIFFICULTÉ EST DE CONCILIER LE MEILLEUR CHOIX POUR LA SOCIÉTÉ ET CE QUI SEMBLE PRÉFÉRABLE POUR SOI-MÊME

seconde, ils prennent une décision instinctive, sans avoir le temps d'y réfléchir. Et il ne sert à rien pour ce conducteur, de décider à l'avance de ce qu'il fera dans une telle situation, car rien ne garantit que sa décision instinctive puisse être « programmée » à l'avance.

Mais les voitures sans conducteur, elles, peuvent et doivent être programmées à l'avance. Alors, sommes-nous prêts à monter dans une voiture programmée pour nous tuer quand notre sacrifice peut sauver les autres, même s'il n'y a qu'une chance minuscule que cette situation se produise ?

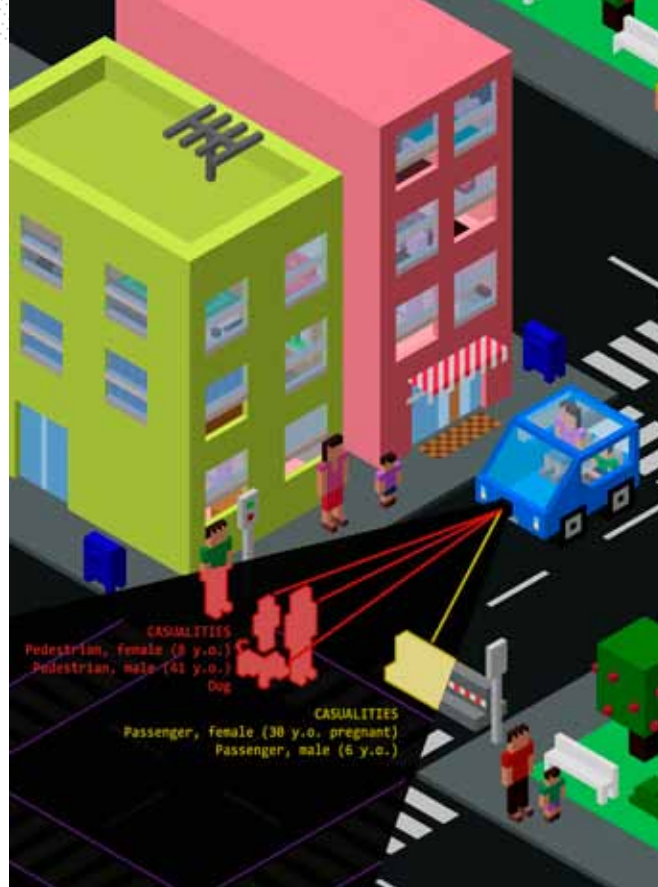
Un dilemme moral

Pour répondre à cette question, les scientifiques mènent des enquêtes comme celles auxquelles il est possible de répondre en se connectant au site moralmachine.mit.edu. Et les résultats sont parfois surprenants. Par exemple, plus de 75% des Américains qui ont été interrogés par l'équipe toulousaine sont moralement convaincus (et fortement

Le site moralmachine.mit.edu permet à chacun de dire ce qu'une voiture sans conducteur devrait faire en cas de choix moral difficile. Plus de trois millions de personnes se sont déjà exprimées, sur près de 30 millions de scénarios. © Lyad Rahwan

convaincus) que la voiture devrait sauver le plus de vies possibles, même si cela demande de sacrifier ses passager.ère.s. Mais, quand on leur demande quelle voiture ils préféreraient acheter, leur choix se porte sur une voiture qui protège ses passager.ère.s dans tous les cas ! Cela montre que la difficulté à réconcilier le meilleur choix pour la société et leur intérêt propre. Dans ce cas, on attend souvent des gouvernements qu'ils décident pour les citoyen.ne.s, en produisant des lois.

Mais il sera extrêmement difficile de trouver les bonnes lois quand la question est de décider qui une voiture a le droit de tuer, et encore plus de promulguer des lois qui, par exemple, puissent être acceptées dans tous les pays de l'Union Européenne, où les populations peuvent avoir des idées différentes de ce qui est moralement acceptable. Les recherches consistent à rendre ce travail plus facile en mesurant ce que les citoyen.ne.s sont prêt.e.s à accepter. ●



CONTRIBUTEURS :

Roberto Pasqua, Mathieu Roy, Gilles Tredan,
Laboratoire d'analyse et d'architecture des
systèmes – LAAS-CNRS.

Figure 1 - Expérience de ségrégation spatiale réalisée à l'Université Toulouse III - Paul Sabatier. Les participant.e.s, au centre, doivent se séparer en deux groupes distincts à l'aide d'informations fournies par la plateforme sur leur environnement local. C'est l'efficacité de cette ségrégation qui est mesurée par Souk.

© David Villa, SciencelImage, CBI, CNRS Toulouse.



DYNAMIQUE DE DÉCISIONS COLLECTIVES

L'expérience de chacun.e, les informations dont on dispose influencent la formation du collectif. La plateforme SOUK collecte ces informations sur les déplacements individuels afin de comprendre les processus de formation des groupes.

Considérons un ensemble d'individus en mouvement. Est-il possible de comprendre l'influence des informations disponibles au niveau individuel sur l'évolution du collectif ?

C'est pour répondre à cette question que des scientifiques toulousain.e.s ont développé une plateforme d'observation sociale des cinétiques humaines : SOUK (*Social Observation of hUman Kinetics*).

Le principe de cette plateforme est de pouvoir collecter avec une grande précision spatiale et temporelle la position des individus d'une foule dense, quels que soient les individus. SOUK fonctionne ainsi comme un GPS très précis (erreur de l'ordre de 15 cm) et rapide (jusqu'à 120 positions par seconde). Grâce à ce système, il est possible de suivre le déplacement de groupes d'individus (jusqu'à 60 personnes) dans des espaces délimités.

Cet outil utilisé lors de plusieurs campagnes expérimentales à Toulouse sur des





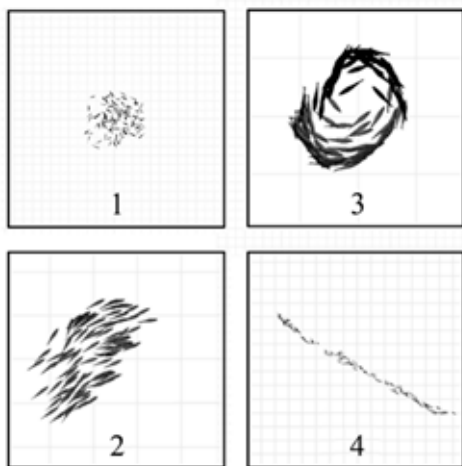
UNE FOIS COLLECTÉES,
IL A FALLU PLUS DE TROIS ANS
POUR TRAITER LES DONNÉES
ET ÉTABLIR LES MODÈLES !

ensembles d'individus variés (personnes dans une foule, danseurs, cyclistes, animaux au sein d'un troupeau...) a permis d'obtenir des résultats tout à fait originaux sur la dynamique collective : ainsi en observant les positions de deux groupes de personnes cherchant à effectuer une tâche collective avec des consignes variées, les scientifiques ont pu étudier l'existence d'un niveau d'information optimale à diffuser aux individus pour optimiser la réalisation de cette tâche collective simple (*figure 1*).

CONTRIBUTEURS :

Clément Sire, Laboratoire de physique théorique – LPT (CNRS, Université Toulouse III – Paul Sabatier).

Guy Theraulaz, Centre de recherches sur la cognition animale – CRCA, Centre de biologie intégrative – CBI (CNRS, Université Toulouse III – Paul Sabatier).



Différents états d'un banc de poissons

communément observés et reproduits par le modèle, en variant l'intensité des interactions d'attraction et d'alignement :

1. La phase d'essaim désordonné ;
2. Le banc aligné ;
3. La phase vortex ;
4. La phase oblongue. © CRCA/LPT/

DÉCRYPTER LES INTERACTIONS ENTRE INDIVIDUS DANS UN BANC DE POISSONS

Le décryptage des interactions entre poissons montre que l'attraction et l'alignement jouent un rôle clé dans la coordination des déplacements de bancs de poissons.

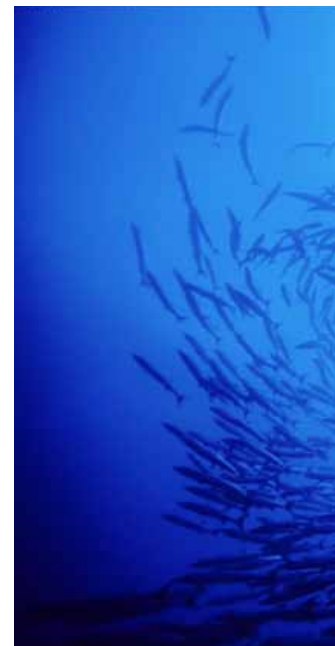
Plus de la moitié des espèces de poissons sont grégaires, soit environ 10 000 espèces. Ces animaux se regroupent en bancs qui se déplacent comme s'ils ne constituaient qu'un seul et même super-organisme. Ils adoptent également une étonnante variété de comportements collectifs pour repérer plus facilement des sources de nourriture, ou échapper aux prédateurs. Comme pour d'autres phénomènes observés chez des espèces grégaires, ces déplacements collectifs sont auto-organisés. Ils ne sont régis par aucun poisson leader, ni aucune hiérarchie. La coordination résulte d'un ensemble d'interactions entre les individus au cours desquelles ceux-ci échan-

gent des informations et y répondent en adaptant leurs mouvements.

On peut aujourd'hui décrypter ces interactions entre poissons, construire des modèles mathématiques fidèles, les simuler sur ordinateur, et ainsi mieux comprendre comment émerge leur intelligence collective.

Deux types d'interactions

Pour cela, des scientifiques de Toulouse ont combiné des techniques d'analyse des comportements utilisées en éthologie (science du comportement animal) avec des outils développés en physique statistique des systèmes





Une structure en vortex formée par un banc de barracudas (*Sphyraena barracuda*). © Adrian Kaye



LA PLUS PETITE MODIFICATION DU COMPORTEMENT D'UN SEUL POISSON PEUT FAIRE BASCULER LE BANC D'UN RÉGIME À UN AUTRE

complexes. Ils ont mis en évidence deux types d'interactions entre les poissons : l'attraction et l'alignement. Selon leur intensité et la façon dont ces deux interactions se combinent, le banc sera sensible à un infime changement de comportement d'un ou plusieurs poissons et il adoptera plusieurs formes de comportements collectifs. Chez les doules à queues rubanées (*Kuhlia mugil*), une espèce apparentée aux harengs, les chercheur.e.s ont identifié quatre formes de comportements collectifs.

Les poissons restent regroupés de manière lâche tout en se déplaçant au hasard sans direction définie : attraction, alignement et vitesse de nage sont alors faibles.

Adopter une réponse pour la survie

Lorsque la vitesse des poissons augmente, ils adoptent un mouvement polarisé où l'alignement domine la force d'attraction. Pour d'autres combinaisons des interactions, ils forment des structures en vortex et

tournent ainsi de façon persistante autour d'un axe vide de tout poisson.

Enfin, lorsque l'attraction est forte mais l'alignement faible, et pour des gammes de vitesses intermédiaires, le banc adopte spontanément une forme oblongue étirée.

On peut ainsi établir un

diagramme de phase très précis définissant les conditions d'apparition de ces différents comportements collectifs en fonction des paramètres d'attraction et d'alignement des poissons. Les physicien.ne.s utilisent de tels diagrammes pour décrire les différents états possibles d'un système. Ceux de l'eau, par exemple : solide, liquide ou gazeuse, selon les températures et les pressions considérées. De plus, dans certains cas, les doules se trouvent dans un état qualifié de « métastable » – entre le banc polarisé et la structure en vortex. Dans cet état, la plus petite modification du comportement d'un seul des poissons peut faire basculer le banc d'un régime à un autre. Le groupe très réactif devient alors sensible à toutes sortes de perturbations survenant dans son environnement, par exemple lorsqu'un prédateur est détecté. Cet état dit « métastable » lui permet d'adopter une réponse qui maximise les chances de survie de chaque poisson lorsque surviennent les attaques de prédateurs. ●

CONTRIBUTEUR/TRICE :

Bernard Ducommun, Valérie Lobjois,
Institut des technologies avancées
en sciences du vivant – ITAV (CNRS,
Université Toulouse III – Paul Sabatier).

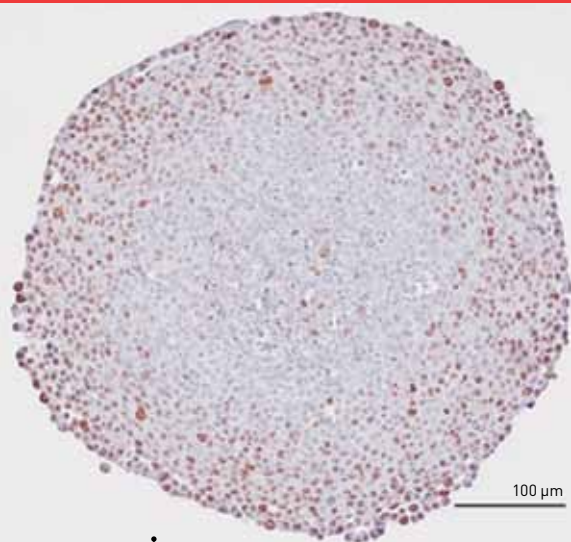


Figure 1 - Organisation 3D d'une population cellulaire. La croissance d'une microtumeur s'accompagne de la mise en place d'une structuration tridimensionnelle et d'une régionalisation illustrée ici par l'observation d'un gradient de prolifération de la périphérie vers le centre (marquage brun foncé).

© Céline Frongia - ITAV

COMPRENDRE LES COMPORTEMENTS COLLECTIFS DES CELLULES TUMORALES

La 3D permet de comprendre les relations collectives entre les cellules tumorales et leur environnement et d'explorer les capacités d'adaptation de ces cellules à leur environnement.

Une tumeur est un ensemble de cellules organisées, constituant un véritable organe, dont le comportement, la croissance, la plasticité, la physiologie vont résulter d'un comportement collectif lié à des interactions multiples entre les cellules constitutantes et les tissus environnants. Accéder à la compréhension de la complexité des relations collectives entre les cellules tumorales et leur environnement revêt par conséquent un intérêt majeur en cancérologie et pourrait ouvrir la voie vers de nouveaux horizons thérapeutiques.

Les cellules s'organisent en 3D

La compréhension du développement tumoral ne peut se satisfaire de l'étude de cellules dans une boîte de Petri dans laquelle les limitations technologiques l'ont longtemps cantonnée. Les moyens actuels d'exploration, en particulier la microscopie, permettent de découvrir la

complexité de l'organisation 3D d'une population cellulaire, de mettre en évidence la régionalisation de la dynamique de prolifération (figure 1) et d'en étudier les mécanismes en relation avec la croissance tumorale. Afin de mimer et d'explorer l'impact de l'environnement sur le comportement de cette population, de nouveaux microdispositifs sont capables de contraindre et de diriger la croissance collective de populations cellulaires. Ces approches expérimentales illustrées par la plasticité et le changement de forme de microtumeurs (figure 2) permettent d'explorer les capacités d'adaptation collective des cellules à l'environnement et aux contraintes mécaniques pour tenter de mieux en comprendre les bases et la régulation.

Cohésion des cellules cancéreuses et métastases

La dissémination des cellules tumorales pour former des métastases met en jeu une modification d'organisation au sein d'une tumeur.

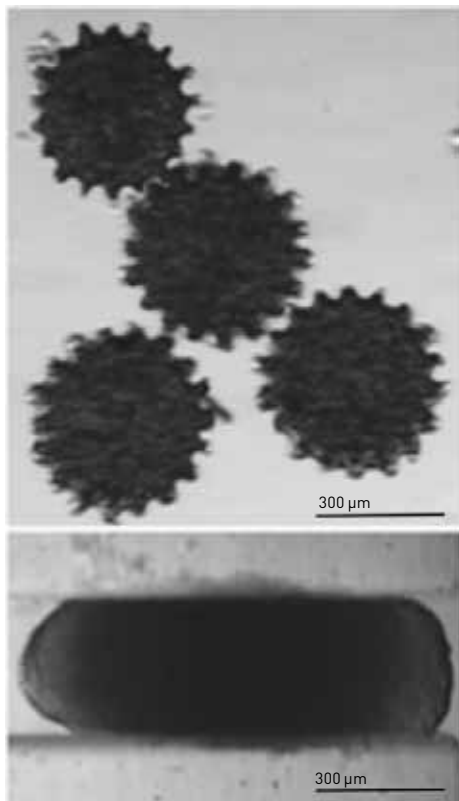


Figure 2 - Plasticité et adaptation. Illustration de la capacité d'une population de cellules tumorales à adapter sa croissance et sa forme globale à son environnement. Formes de microtumeurs d'un diamètre d'environ 0,5 mm observées lors de la croissance dans des microdispositifs de formes géométriques. © Céline Frongia - ITAV © Martine Cazales et Annaïck Desmaison - ITAV



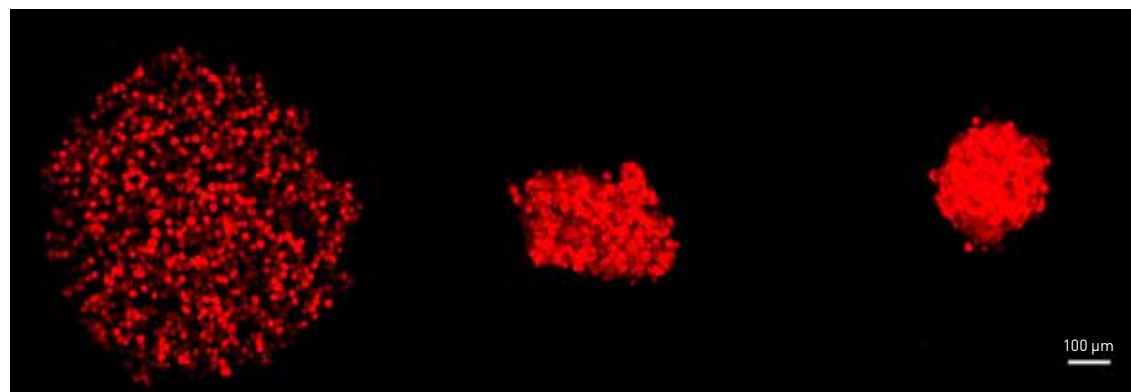
EXPLORER LES CAPACITÉS D'ADAPTATION DES CELLULES À L'ENVIRONNEMENT ET AUX CONTRAINTES MÉCANIQUES

Certaines cellules, sous l'influence d'altérations génétiques et de signaux de l'environnement, vont totalement perdre leur contact avec les cellules voisines pour rejoindre la circulation sanguine. Le dérèglement des processus d'adhésion entre cellules est ainsi associé à la dissémination de cellules métastatiques et à leur implantation à distance dans un autre organe

pour former des métastases. Ce processus dépend également de la survie des cellules tumorales isolées et de leur capacité à collectivement mettre en jeu un ensemble de mécanismes complexes leur permettant de se déplacer, de se déformer, d'interagir et d'adhérer pour former de petits groupes de cellules circulants. Ces derniers sont eux-aussi capables de former des métastases (*figure 3*). Des approches conjuguées d'imagerie dynamique en temps réel et de biologie cellulaire et moléculaire permettent d'explorer les mécanismes mis en jeu et d'identifier les constituants cellulaires et les régulations impliquées dans ces processus. ●

Figure 3 - S'associer pour survivre collectivement.

Images de cellules de cancer du pancréas observées par microscopie à fluorescence à différentes étapes de l'agrégation et de la formation d'un microtumeur. Marquage fluorescent rouge des cellules. De gauche à droite, temps initial puis après 4h et 24h. © Valérie Lobjois et Annie Valette - ITAV



CONTRIBUTEUR :

Christophe Mingotaud, Laboratoire interactions moléculaires et réactivité chimique et photochimique – IMRCP (CNRS, Université Toulouse III – Paul Sabatier).

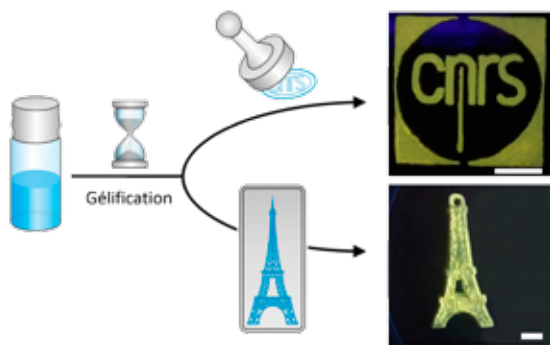


Figure 1 - Une solution liquide est difficile à mettre en forme mais il suffit de trouver les conditions de gélification pour qu'elle soit alors exploitable à l'aide d'un tampon, avec le logo du CNRS ou d'un moule, ici en forme de tour Eiffel. Cette stratégie permet ici de former des structures organiques/inorganiques fluorescentes. © IMRCP & LCC – CNRS / Z. Zhao, C. Mingotaud & M. L. Kahn
La barre blanche représente 1 cm

MOLECULES. ORGANISEZ-VOUS ET GÉLIFIEZ !

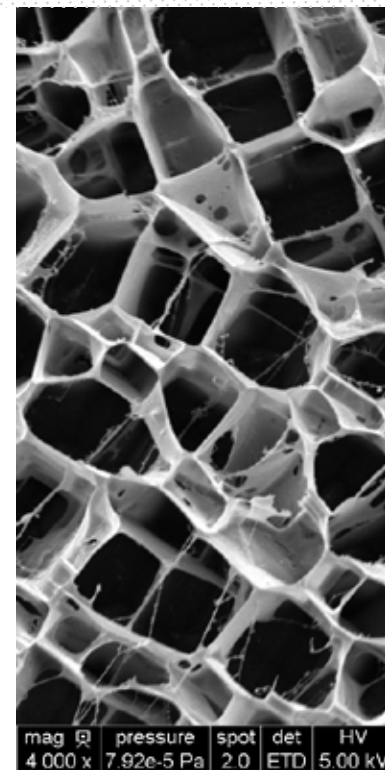
Tout le monde connaît les gels. Dans ces mélanges complexes, c'est la collectivité qui prime sur l'individu. Les chercheur.euse.s tentent de comprendre et de prédire les comportements de ces réseaux moléculaires.

Sauces et mayonnaises de nos cuisines, shampoings et crèmes cosmétiques de nos salles de bains, savons et détergents de nos buanderies sont de multiples exemples de matière dite « molle », mélange complexe de molécules. Les propriétés uniques de ces mélanges ne sont pas liées à celles d'une molécule particulière isolée, mais elles découlent d'un comportement global de ces composés qui ont tendance à s'assembler et s'organiser. Dans ces mélanges complexes, c'est la collectivité qui prévaut par rapport à l'individu, c'est le grand nombre qui l'emporte sur l'unité. Comprendre et maîtriser cet ensemble est l'objet de recherches actuelles. Parmi tous les systèmes étudiés, les gels sont certainement les plus étranges. Lointains cousins de nos gels à raser et gélatine culinaire, ces matériaux, ni solides ni liquides, peuvent contenir plus de 99% d'eau (on parle alors d'hydrogel) ou de solvant organique (organogel).

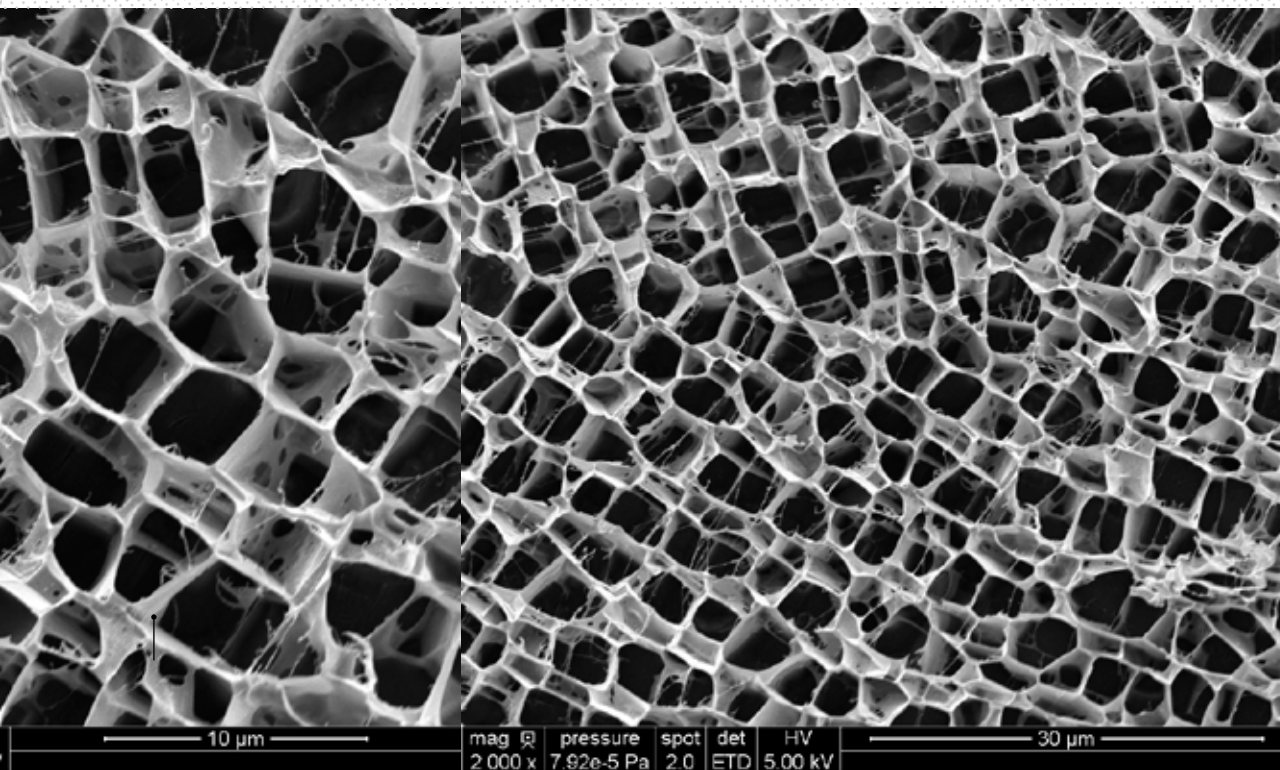
Comment 1 gramme de composé arrive-t-il à contenir et maîtriser 99 grammes d'eau ? Grâce à un comportement collectif ! Les molécules ou macromolécules mises en présence s'organisent sous la forme d'un réseau tridimensionnel qui piège l'eau ou le solvant dans les alvéoles ainsi formées (figure 2a). Ce réseau peut être construit directement à partir des molécules, ou bien à partir de briques élémentaires sous forme de cylindres, fibres, cristaux... résultant de l'association de molécules. Il peut se former spontanément ou suite à une réaction chimique.

Créer les gels de demain

Cette structure est responsable des propriétés mécaniques, mais aussi chimiques de l'ensemble. Pour en contrôler les caracté-



mag	4 000 x	pressure	7.92e-5 Pa	spot	2.0	det	ETD	HV	5.00 kV
-----	---------	----------	------------	------	-----	-----	-----	----	---------



Figures 2a et 2b - Un hydrogel vu au microscope électronique à balayage : le polymère utilisé s'organise en un réseau formant un ensemble d'alvéoles dans lesquelles l'eau peut être piégée.

© IMRCP - CNRS / J. Royes Mir & A.-F. Mingotaud

ristiques, les scientifiques choisissent judicieusement les composés à mélanger, puis analysent le réseau formé à l'aide de différentes techniques microscopiques ou d'instruments, tels qu'un rhéomètre permettant de quantifier les propriétés mécaniques de ces gels. Comprendre et prédire le comportement de ces réseaux moléculaires est l'un des objectifs ainsi poursuivis.

Les gels dits « intelligents » qui réagissent à la température, qui gonflent ou dégonflent à la lumière, ou qui se déforment en fonction d'un stimulus magnétique sont des exemples



CES MATÉRIAUX INNOVANTS SONT UTILES TANT EN RECHERCHE FONDAMENTALE QU'APPLIQUÉE

de matériaux développés de nos jours et qui sont prometteurs pour de multiples raisons (figure 2b). En effet, ces matériaux innovants sont utiles tant en recherche

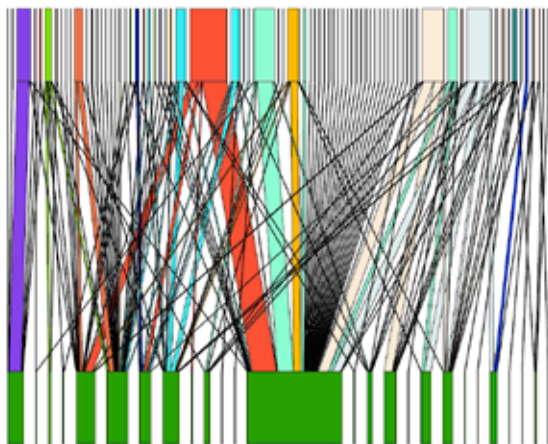
fondamentale (sur le cancer, le développement des neurones...) qu'appliquée (dans le domaine des détecteurs de gaz, capteurs de polluants, transporteurs de médicaments, constituants de cosmétiques...). Dans certaines de ces applications, il est nécessaire d'affaiblir ou de détruire ce réseau moléculaire, permettant par exemple de libérer de manière précise une substance active.

Ainsi, dans tous ces systèmes, les scientifiques s'emploient à contrôler de manière simple cette organisation moléculaire complexe, afin de créer les gels de demain. ●

CONTRIBUTEURS/TRICES :

Christophe Andalo, Monique Burrus, Nathalie Escaravage, Frédéric Magné, André Pornon, Évolution et diversité biologique – EDB (CNRS, ENSFEA, IRD, Université Toulouse III – Paul Sabatier).

Espèces de pollinisateurs



Espèces de plantes

Exemple d'un réseau plantes-pollinisateurs dans une lande à rhododendron dans les Pyrénées. © C. Andalo - EDB

LA POLLINISATION, PLUS COMPLEXE QU'IL N'Y PARAÎT

Le mutualisme entre les pollinisateurs et les plantes se déroule au sein de réseaux d'interactions incroyablement complexes de plus en plus souvent décrits par des méthodes de génomique environnementale et de séquençage d'ADN.

Indispensable à la reproduction des plantes à fleurs, la pollinisation est le plus souvent assurée par des insectes : dans le cadre d'une relation positive (mutualisme), les plantes procurent pollen et nectar aux insectes, lesquels en retour assurent leur pollinisation. Derrière cette apparente simplicité se cache une incroyable complexité !

Une interaction peut en cacher une autre

Dans ce mutualisme, les « intérêts » des partenaires ne sont pas toujours convergents. Les plantes requièrent un maximum de pollen de leur propre espèce pour optimiser leur reproduction, alors que les pollinisateurs doivent souvent diversifier leur alimentation en visitant plusieurs espèces végétales. En conséquence, ils transfèrent fréquemment du pollen inadapté à la pollinisation des plantes receveuses. Le mutualisme peut alors se transformer en parasitisme lorsque l'insecte prélève nectar et pollen sur la plante et y dépose du pollen non spécifique, sans intérêt pour elle.

L'équilibre subtil entre les intérêts des plantes et des insectes est menacé notamment par l'invasion d'espèces exotiques, la fragmentation des habitats qui réduit et isole les populations ou par la disparition d'espèces. La diminution des effectifs des populations de pollinisateurs peut conduire, par exemple, les plantes à entrer en compétition pour obtenir leur service et à manquer de pollen pour leur reproduction.

Des réseaux étonnamment élaborés

On a longtemps cru que les interactions plantes-pollinisateurs étaient spécialisées, associant une espèce végétale à une espèce pollinisatrice. En réalité, les interactions s'organisent en réseaux complexes (*figure de gauche*) où une espèce de pollinisateur interagit avec plusieurs espèces de plantes et réciproque-



LA DIMINUTION DES EFFECTIFS
DE POLLINISATEURS PEUT
CONDUIRE LES PLANTES
À ENTRER EN COMPÉTITION

Pollinisation de la vipérine
(*Echium vulgare*) par un bourdon
terrestre (*Bombus terrestris*). Vue
d'ensemble.

© Hugo RUPF Photography



ment. Cependant, des études récentes suggèrent que chaque individu pollinisateur ne visite que quelques espèces végétales disponibles. Il est donc plus spécialisé que ne l'est globalement son espèce.

Ces réseaux sont d'autant plus complexes que la taille d'une plante et sa position dans la population végétale peuvent changer la probabilité qu'elle soit visitée.

Un outil performant, la génomique environnementale

De nouvelles méthodes de génomique environnementale (*metabarcoding*) couplées au séquençage d'ADN à haut débit sont utilisées

pour décrire les réseaux de pollinisation. Elles permettent d'identifier les grains de pollen présents sur le corps des pollinisateurs ou sur les stigmates des plantes, grâce à leur code-barre à ADN (1), afin de révéler les multiples interactions au sein des réseaux. Les résultats de ces recherches permettront de mieux décrire la complexité des interactions dans la pollinisation et d'évaluer les conséquences des changements globaux sur les réseaux plantes-pollinisateurs. ●

(1) code-barre à ADN : courte séquence d'ADN, variable entre espèces mais très conservée au sein d'une même espèce

**Pollinisation
de la vipérine**
(*Echium vulgare*)
par un bourdon
terrestre (*Bombus
terrestris proboscis*)
communément
appelé « trompe ».

© C. Lauzeral - EDB

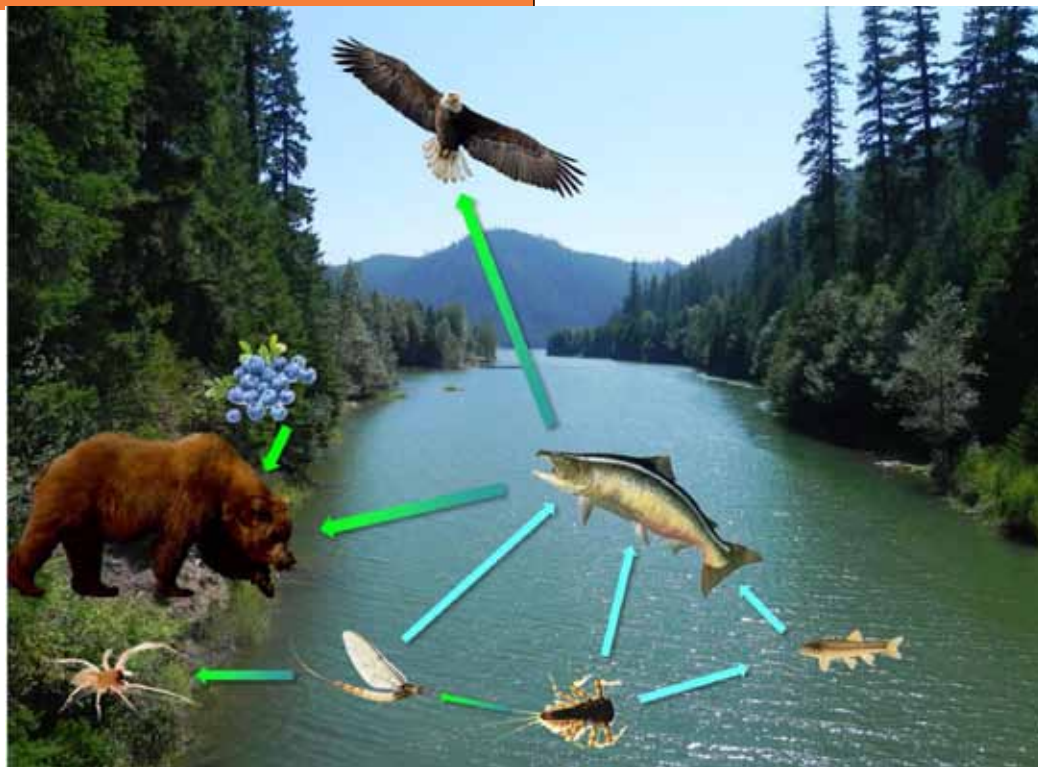


CONTRIBUTEURS :

Régis Cereghino, Éric Tabacchi,
Laboratoire écologie fonctionnelle et
environnement – ECOLAB (CNRS, INP
Toulouse, Université Toulouse III – Paul
Sabatier).

LA BIODIVERSITÉ EST L'ASSURANCE-VIE DE L'ÉCOSYSTÈME

L'écologie du paysage étudie les frontières et les échanges qui existent entre les écosystèmes. Autant d'éléments qui les connectent et les mettent en réseaux.



La biodiversité n'est pas qu'une somme d'espèces qui coexistent, c'est aussi la toile du vivant qui relie ces espèces par des interactions. Ces espèces sont responsables de la capture et de la conversion de matière et d'énergie au sein des écosystèmes, assurant ainsi des fonctions comme par exemple la production de matière organique, ou la minéralisation, dont l'humain dépend. Les réseaux d'interactions établis entre les espèces jouent un rôle prépondérant dans la stabilité de ces fonctions interdépendantes. Un exemple de réseau écologique le mieux connu est le réseau trophique (*figures 1 a et b*)

Figure 1a - Réseau trophique fortement simplifié d'un système fluvial du Nord-Ouest américain (Oregon) montrant les principaux transferts de matière liés à la prédation au sein des milieux terrestres (vert) et aquatique (bleu) et à l'interface entre ces milieux.

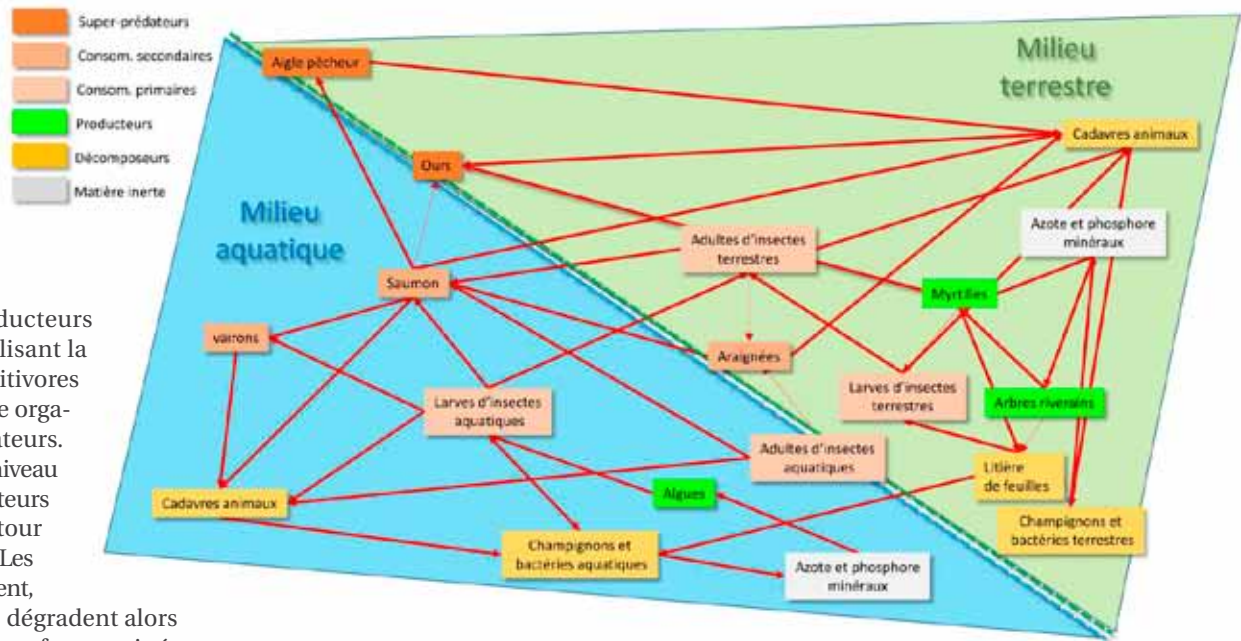
©Éric Tabacchi / ECOLAB

Figure 1b - Le même réseau, un peu plus détaillé, et indiquant la hiérarchie des niveaux trophiques. Les flèches rouges indiquent les principaux flux de matière.

©Eric Tabacchi / ECOLAB

faisant intervenir des producteurs primaires (organismes utilisant la photosynthèse) et des détritivores (espèces utilisant la matière organique inerte) comme initiateurs. Ces maillons nourrissent le niveau trophique supérieur (prédateurs primaires), qui sont à leur tour la proie d'autres prédateurs. Les décomposeurs, essentiellement, bactéries et champignons, dégradent alors l'ensemble des cadavres sous forme minérale, réutilisable par les premiers niveaux du réseau. Désormais, les chercheurs sont capables de positionner précisément chacun des organismes impliqués dans la hiérarchie du réseau trophique.

Deux espèces assurant les mêmes fonctions écologiques proches au sein d'un réseau n'affaiblissent pas le fonctionnement de l'écosystème en exploitant les mêmes ressources, bien au contraire. C'est cette redondance qui donne tout son sens à la biodiversité. D'une part, elle est un moteur de l'évolution génétique, en tendant à favoriser une divergence dans la spécialisation des espèces, d'autre part, les chances de re-stabilisation du fonctionnement de l'écosystème après une forte perturbation est accrue par la redondance fonctionnelle. La biodiversité, comprise comme un



ensemble d'espèces en interaction, est donc l'assurance-vie de l'écosystème.

Relations entre les écosystèmes

Enfin, les écosystèmes fragiles ne sont pas indépendants. Les éléments de mise en relation géographique de ces écosystèmes, lorsqu'ils stimulent les échanges d'espèces, de matières ou d'informations, connectent les réseaux de chaque écosystème. À l'échelle planétaire, on peut ainsi extrapoler ce schéma entre continents. Un exemple évident de cette liaison est la conséquence écologique, suite aux voyages intercontinentaux, de l'introduction par l'humain, d'espèces originaires d'autres régions. Même si un grand nombre de ces espèces introduites disparaissent faute d'adaptation

à leur nouvel habitat, certaines s'intègrent, et d'autres (une minorité) peuvent dominer les écosystèmes au point d'en bouleverser le fonctionnement. Ces invasions illustrent clairement l'intérêt de prendre en compte les réseaux intercontinentaux, régionaux et locaux pour comprendre l'évolution récente de la biodiversité.

Dans ce cadre, des scientifiques toulousains analysent le rôle des dynamiques actuelles et passées de la biodiversité dans le recyclage des matières inertes et vivantes au sein des écosystèmes. Ils-elles s'intéressent notamment aux effets des activités humaines, changements globaux, pollutions, introduction d'espèces, simplification des réseaux trophiques, sur ces processus. ●

CONTRIBUTEURS/TRICE :

Stéphane Blanco, Richard Fournier,
Laboratoire plasma et conversion
d'énergie (CNRS, Université
Toulouse III-Paul Sabatier, INP
Toulouse)

Jean-Jacques Bézian, Mouna El Hafi
Centre de recherche d'Albi en génie
des procédés des solides divisés, de
l'énergie et de l'environnement -
RAPSODEE (CNRS, École des Mines
d'Albi)

Cyril Caliot, PROMES, Méso-Star et une
équipe de l'Institut Pasteur.

PENSER LA VILLE DE DEMAIN GRÂCE À MONTE CARLO

Penser la ville de demain, face notamment aux enjeux énergétiques et aux mutations climatiques, nécessite de nouveaux outils qui s'appuient sur la méthode statistique.



Aléatoire : L'image montre des centrales PS10 et PS20 situées à Santlúcar, près de Séville, en Andalousie. Avec un échantillonnage à la minute des conditions météorologiques, chaque chemin aléatoire parcourt la scène dans toute sa dimension en pénétrant les détails de l'imperfection des miroirs. . © Creative Common/Kozal 1983

Les ingénieur.e.s spécialistes de la gestion des énergies renouvelables sont confronté.e.s à la question de concevoir des systèmes de plus en plus complexes, soumis à des fluctuations environnementales dont la prédiction est elle-même un challenge. Il s'agit du développement d'outils permettant de penser la ville de demain, avec des milliers de bâtiments, tous très spécifiques, mais conçus pour se protéger mutuellement des événements climatiques les plus extrêmes, optimisés thermiquement et équipés de toute la diversité des récepteurs solaires actuels. On citera les panneaux photovoltaïques, les concentrateurs thermiques type Fresnel, les convertisseurs photo-(bio)-réactifs.

Les scientifiques ont mis au point une plateforme numérique, EDStar, et développé une, méthode dite de Monte Carlo, qui a apporté une réponse efficace et immédiatement disponible à plusieurs des grands verrous de la thermique et de l'énergétique actuelles. Le succès de cette méthode vient de l'observation suivante : si la complexité d'un modèle vient

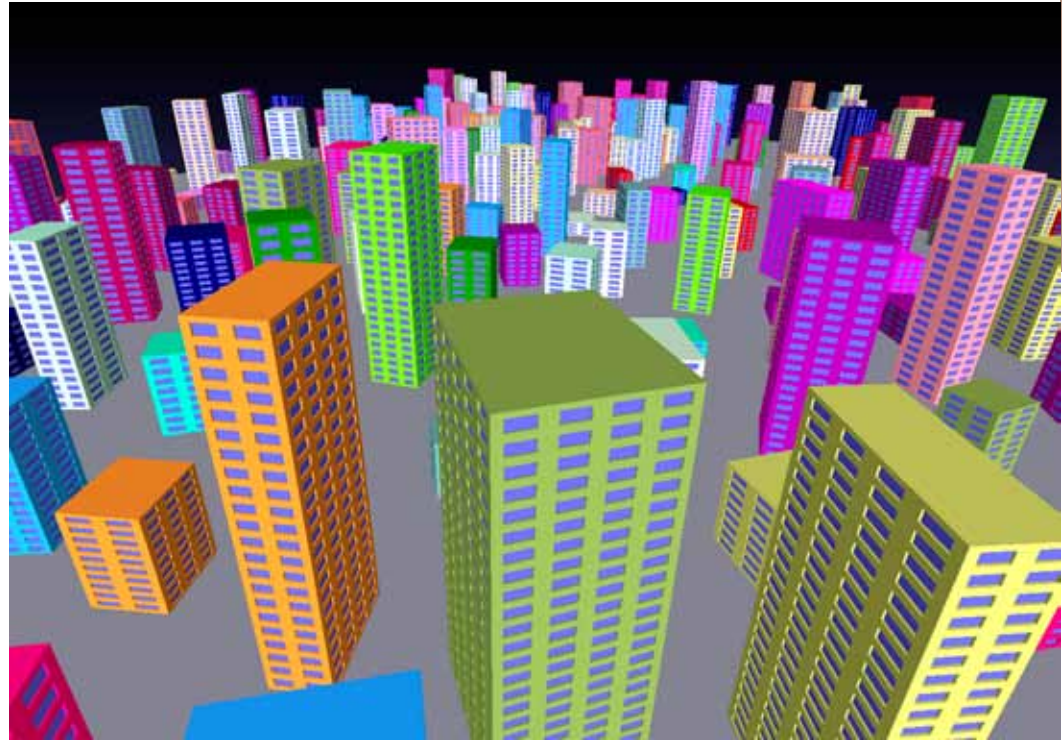


► **Statistiques** : La méthode statistique permet d'augmenter la qualité de résolution de l'image en augmentant le nombre de «chemins» aléatoires qui parcourent la scène (500 fois plus pour l'image la plus résolue). © Mésio-Star

de la dimension élevée du problème (un grand nombre de phénomènes couplés), alors il existe un niveau de complexité au-delà duquel seules les approches statistiques sont pertinentes. Les scientifiques ont ainsi appris à transformer un problème déterministe en un problème statistique équivalent. On, peut alors aborder des systèmes avec de grands rapports d'échelles. Les scientifiques simulent typiquement le rendement d'une centrale solaire thermique sur 50 années d'exploitation, avec des fluctuations d'ensoleillement à la minute, en tenant compte de chacun des détails géométriques du concentrateur ; c'est-à-dire le champ d'héliostats de dimension kilométrique et du récepteur, un matériau poreux de dimensions millimétriques. L'élément critique dans les recherches actuelles est la fiabilité du dimensionnement énergétique d'un point de vue environnemental et financier. ●



IL EXISTE UN NIVEAU
DE COMPLEXITÉ AU-DELÀ
DUQUEL SEULES LES
APPROCHES STATISTIQUES
SONT PERTINENTES



► **Modèle** : Il devient possible par les méthodes statistiques de calculer l'énergie consommée dans cette ville en tenant compte du détail de chauffage et d'isolation de chacune des pièces de tous les bâtiments. © Mésio-Star

La méthode de Monte Carlo est une technique de simulation qui s'appuie sur la génération de nombres aléatoires et utilise les fondements mathématiques des théories probabilistes et statistiques. La physique s'est emparée de cette technique au milieu du XX^e siècle pour simuler un comportement de la matière supposé être aléatoire (par exemple l'émission radioactive). Cette technique est devenue un outil incontournable de la physique purement déterministe. Sa principale force est que, contrairement aux méthodes numériques usuelles, le nombre de calculs croît très peu avec la dimension du problème.

CONTRIBUTEUR/TRICE :

Irène Gaillard, Gilbert de Terssac,
Centre d'étude et de recherche travail,
organisation, pouvoir – CERTOP (CNRS,
Université Toulouse – Jean Jaurès,
Université Toulouse III – Paul Sabatier).

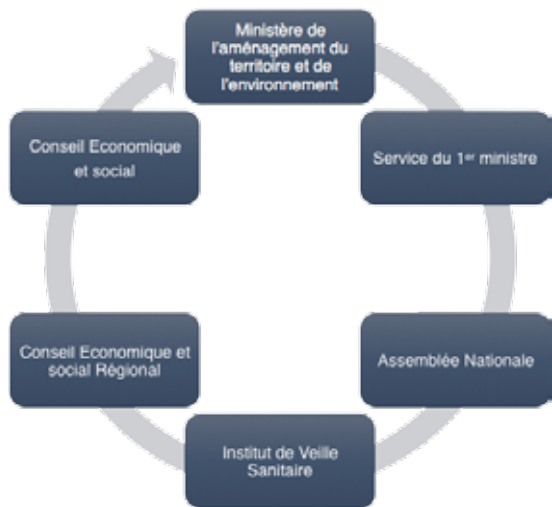


Figure 1 - Institutions publiques
ayant mené des expertises publiques
suite à la catastrophe de l'usine AZF,
à Toulouse.

QUAND LE DÉSORDRE AIDE À MIEUX COMPRENDRE L'ORDRE DES CHOSES : LE CAS DES RISQUES INDUSTRIELS

L'étude des expertises publiques
post-catastrophes permet
de comprendre comment
la sécurité et les risques
industriels trouvent leur origine
dans les pratiques de chacun.

Les scientifiques cherchent à comprendre comment la sécurité et les risques industriels trouvent leurs origines dans les pratiques réelles de chacun, qu'il s'agisse des salarié.e.s qui assurent la production, des professionnel.le.s en charge de la sécurité, ou encore de ceux-celles qui contrôlent et conseillent au nom de l'État... Des choix sont faits, des arbitrages sont posés pour assurer la production dans les industries. Ces décisions comportent des compromis face à de multiples contraintes qui peuvent être contradictoires entre la nécessité de produire,

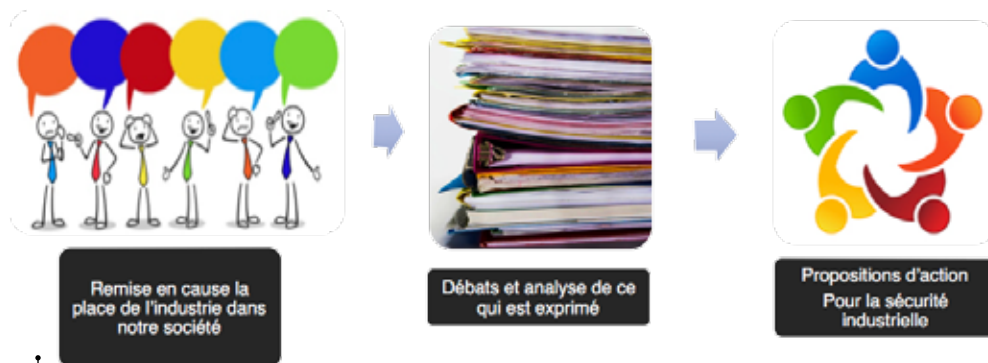


Figure 2 - Les rapports d'expertise mettent de l'ordre face au désordre.



CES INFORMATIONS SONT ORGANISÉES AUTOUR D'UN MÊME MODÈLE, NON EXPLICITE, DES RISQUES INDUSTRIELS

les moyens matériels et financiers, le niveau de sécurité qu'il faut assurer tout en faisant face à de nombreux aléas. Ainsi la démarche consiste à mener une enquête au cœur des pratiques pour comprendre comment, à partir de l'action de chacun, la sécurité se construit et dépasse très généralement le seul respect des règles établies.

Les enseignements d'AZF

La catastrophe d'AZF, à Toulouse, a matérialisé les risques industriels. Nombre de citoyen.ne.s ont alors remis en cause la place de l'industrie dans notre société. La question de la sécurité industrielle a fait l'objet de vifs débats dans tout le pays. Les riverain.e.s, les associations de victimes ont interrogé la présence d'industries à risque. En réponse, les représentant.e.s de l'État se sont mobilisé.e.s en organisant des expertises et des débats pour entendre et comprendre les désaccords.

Dans ce cadre, six institutions publiques ont mené un travail d'expertises pour comprendre les termes de ce débat, pour analyser les connaissances sur la maîtrise des risques et pour préconiser des actions au regard de leur rôle (figure 1). Au-delà des éléments scientifiques et techniques, ces actions intègrent les points de vue exprimés

Figure 3 - Mise en évidence de la conception des risques qui guide toutes les expertises et permet à tous de se mettre d'accord.



par les publics et les acteurs concernés. Malgré la masse d'informations, les tensions et les désaccords, l'ensemble de ces expertises a réussi à réconcilier les parties en présence. Elles ont servi à élaborer la loi du 30 juillet 2003 « *relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages* ». Elles ont aussi recréé le lien social (figure 2).

Passer au risque acceptable

Les chercheur.e.s ont analysé le contenu des rapports d'expertises pour comprendre comment ils permettent de passer du rejet du risque industriel à l'idée d'un risque acceptable. Au-delà des débats passionnés suscités par la catastrophe, tous arrivent à poser une vision des risques industriels de manière

apaisée et à faire des propositions concrètes d'action. À l'aide d'un outil d'analyse du contenu de textes, il a été possible de découvrir que de manière sous-jacente, toutes ses informations sont en fait organisées autour d'un même modèle des risques industriels qui n'est pas explicite. Ce modèle comporte différentes facettes qui constituent autant de pistes pour maîtriser et agir sur les risques industriels (figure 3). Au-delà du respect des règles, il prend en compte que ce risque nécessite aussi d'en maîtriser les conséquences ; de préciser le rôle des acteur.e.s notamment en matière de prévention ; de développer des recherches, car toutes les connaissances ne sont pas encore établies et de donner de l'information tout en se concertant. ●

CONTRIBUTRICES :

Sinda Haouès-Jouve, Julia Hidalgo,
Laboratoire interdisciplinaire
solidarité, société, territoires – LISST
(CNRS, EHESS, ENSFEA, Université
Toulouse – Jean Jaurès
Aude Lemonsu, Centre national de
recherches météorologiques – CNRM
(CNRS, Météo France).

LA VILLE ET LE CLIMAT

DEUX SYSTÈMES COMPLEXES

Plusieurs disciplines, des sciences de l'atmosphère aux sciences humaines et sociales, sont convoquées pour étudier les interactions entre deux systèmes complexes, la ville et le climat.

La ville contemporaine est une organisation socio-spatiale caractérisée par le couple densité/diversité et composée d'entités hétérogènes en interaction : habitant.e.s, constructions, arbres, automobiles, activités, services, etc. Elle est indéniablement un système complexe : ses entités constitutives dépendent de l'échelle d'observation : individus et bâtiments à l'échelle micro, quartiers et collectifs à l'échelle méso, etc. Leurs interactions sont rarement prévisibles, notamment du fait de l'individuation croissante des modes de vie. Enfin, le pilotage du système urbain, traditionnellement assuré par des acteur.trice.s public.que.s dans une logique *top-down*, associe de plus en plus habitant.e.s, associations, entreprises, etc., à ce que l'on nomme désormais la « gouvernance urbaine ».

Le système climatique doit sa complexité aux interactions entre ses composantes (atmosphère, surfaces continentales, hydrosphère,

cryosphère, biosphère) auxquelles s'ajoutent des contraintes externes d'origine naturelle et anthropique. Sa prévisibilité est limitée par la nature chaotique de son comportement : d'infimes changements peuvent générer des effets de grande ampleur. La modélisation du climat futur vise à évaluer l'effet des activités humaines sur son évolution et en retour, l'impact de celle-ci sur le fonctionnement des écosystèmes. Les écosystèmes urbains sont emblématiques de ce type de rétroaction : les villes subissent les impacts locaux du changement climatique, mais contribuent aussi au déséquilibre climatique global par leurs émissions de gaz à effet de serre et l'artificialisation des sols qu'elles génèrent.

À l'interface de ces deux systèmes complexes : l'exemple de l'adaptation des villes aux canicules

Sous nos latitudes, le changement climatique entraîne une intensification des canicules qui

pose dans les villes des problèmes de santé publique, de confort des espaces intérieurs et extérieurs, de surconsommation énergétique et d'émissions de gaz à effet de serre. Ces villes sont par ailleurs sujettes à l'îlot de chaleur urbain qui désigne l'élévation locale de la température due à l'accumulation de chaleur dans les matériaux urbains (*figure 1*). Canicules et îlot de chaleur combinés aggravent les vulnérabilités urbaines. Des stratégies d'ajustement mobilisent les acteur.trice.s urbain.e.s (élu.e.s, professionnel.le.s de l'urbanisme, habitant.e.s...) et se

 CANICULES
ET ÎLOTS
DE CHALEUR
COMBINÉS
AGGRAVENT LES
VULNÉRABILITÉS
URBAINES

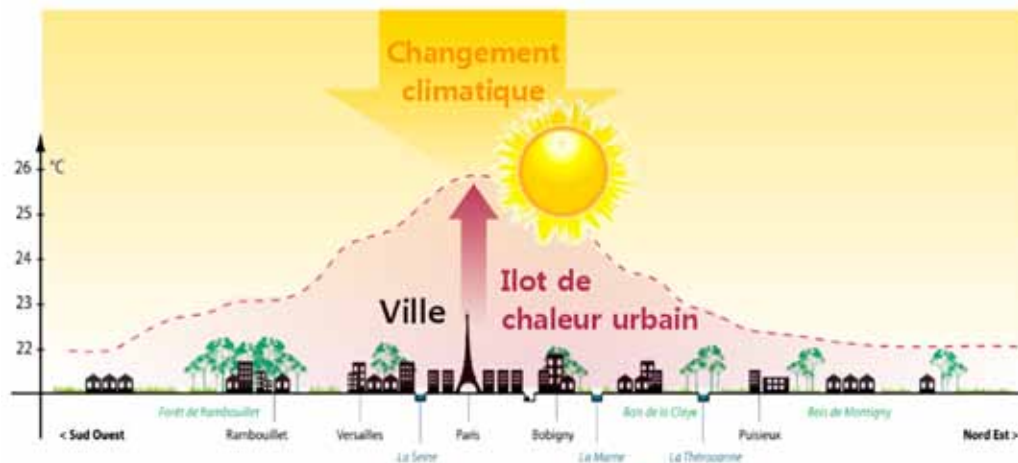


Figure 1 - Les villes face au risque caniculaire : combinaison des effets d'îlot de chaleur urbain et du changement climatique. © Aude Lemonsu

traduisent par des actions sur le bâti et les formes urbaines à différentes échelles, mais aussi par une évolution des pratiques habitantes et des formes d'organisation collective face au risque (figure 2).

Les recherches actuelles portent sur l'étude des interactions entre système urbain et système climatique pour accompagner les acteur.e.s locaux dans l'élaboration de stratégies d'adaptation face au risque caniculaire. Ces travaux reposent sur la production et le croisement de données diverses : mesures météorologiques, enquêtes sur les perceptions, les représentations et les pratiques, analyse des systèmes d'acteurs, cartographie urbaine, etc. Elles convoquent une forte interdisciplinarité – notamment entre sciences humaines et sociales et sciences de l'atmosphère – et mobilisent souvent la modélisation pour tenter de reproduire les phénomènes réels, leurs interactions et leur dynamique, et tester des scénarios prospectifs. ●

OBJECTIFS	LEVIER D'ACTION
Accroître la part de couverts naturels et réduire les surfaces imperméables	> Implantation de surfaces en eau, de sols perméables et de végétation > Maîtrise de l'extension urbaine
Réduire l'impact de l'ensoleillement dans les espaces intérieurs et extérieurs	> Systèmes d'ombrage (brises vue, arbres de rue) > Matériaux de construction réfléchissants > Isolation thermique des bâtiments
Optimiser la ventilation par le vent à différentes échelles spatiales	> Couloirs de ventilation naturels à l'échelle de la ville > Orientation des rues et bâtiments à l'échelle du quartier > Système de ventilation des bâtiments (fenêtres)
Réduire le flux de chaleur anthropique	> Réduction des émissions de chaleur liées aux activités industrielles, au trafic routier, aux systèmes de climatisation
Réduire la vulnérabilité des populations, anticiper les situations à risque	> Plans d'alerte (exemple : Plan Canicule) > Campagnes d'information et de sensibilisation > Comportements individuels

Figure 2 - Quels leviers d'action pour adapter les villes au risque caniculaire et atténuer l'îlot de chaleur urbain ?
© Aude Lemonsu

CONTRIBUTEURS/TRICE :

François Bouttier et Olivier Nuissier,
Centre national de recherches
météorologiques – CNRM (CNRS,
Météo France)
Evelyne Richard, Laboratoire
d'aérodynamique – LA (CNRS, Université
Toulouse III-Paul Sabatier).

LES ALÉAS DE LA PRÉVISION

DES CATASTROPHES HYDROMÉTÉOROLOGIQUES

Prévoir les inondations autour de la Méditerranée est très complexe. Les techniques de simulation des erreurs permettent d'identifier les informations utiles dans les simulations numériques du climat et de l'environnement.

Les inondations rapides, fréquentes autour de la Méditerranée, peuvent avoir des conséquences dévastatrices lorsqu'elles touchent des zones vulnérables. Leur prévision est un défi, car elles dépendent de processus interdépendants et difficiles à modéliser : la configuration de l'atmosphère en altitude, la présence d'un jet humide au voisinage de la côte, une succession rapide d'orages intenses en un même point, l'accumulation de pluie sur des bassins versants à réaction hydrologique rapide.

Prévoir la catastrophe

Dans les laboratoires toulousains, ces phénomènes peuvent être simulés en temps réel par des modèles numériques, qui représentent le monde réel de manière approximative. La simulation des crues par des modèles cou-

plés atmosphère + hydrologie contient un mélange des erreurs commises sur chacun de ces processus, avec pour conséquence des prévisions de qualité très inégale d'un épisode à l'autre. Alimenter les médias de vigilance hydrométéorologique par interprétation littérale des modèles numériques produirait de nombreuses fausses alertes et non-détections, avec des conséquences potentiellement catastrophiques pour les populations : il faut donc tenir compte des incertitudes des simulations. Pour interpréter à bon escient les modèles numériques, il faut estimer des marges de sécurité sur les prévisions d'intensité, localisation et timing des pluies extrêmes. Une alerte hydrométéorologique judicieuse doit aussi tenir compte des vulnérabilités des utilisateur.trice.s de ces informations. En général, la prévision des phénomènes à fort impact est

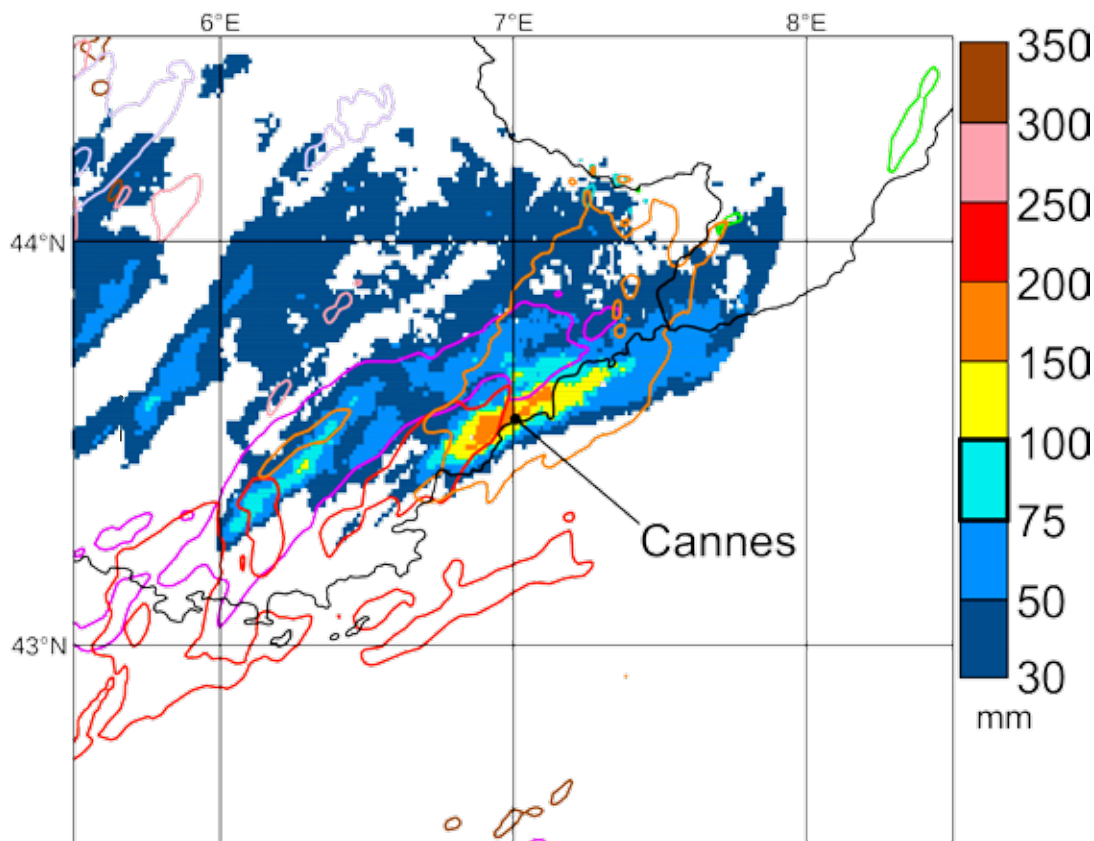
optimisée pour produire en moyenne 3 à 5 fois plus de fausses alertes que de non-détections : cela permet de prévoir les catastrophes presque à coup sûr, sans pour autant user la confiance des utilisateur.trice.s par de trop fréquentes fausses alertes. Y parvenir nécessite une connaissance fine des probabilités des prévisions.

Simuler les erreurs de prévision

Cette information peut être estimée par statistiques sur des événements passés, mais on peut faire beaucoup mieux. En effet, les évé-



LES TECHNIQUES
DE SIMULATION D'ERREURS
NÉCESSITENT DE FORTES
CAPACITÉS DE CALCUL



↑ **Prévision d'ensemble AROME** des pluies sur la zone de Cannes le 3 octobre 2015. Les contours délimitent les scénarios possibles de fortes pluies au moment de faire la prévision. Les zones colorées montrent les pluies qui ont effectivement eu lieu (observation par radar). ©CNRM

nements extrêmes étant rares par définition, obtenir des statistiques fiables est souvent problématique. C'est encore plus difficile lorsque le climat évolue. Comme certains épisodes sont beaucoup plus prévisibles que d'autres, il faut procéder au cas par cas. La méthode la plus performante consiste à simuler les erreurs des prévisions hydrométéorologiques par une technique appelée prévision d'ensemble : cela consiste à calculer en temps réel plusieurs dizaines de variantes du système de prévision couplé atmosphère+hydrologie, en y injectant des bruits numériques pour simuler les sources d'erreurs de prévision : erreurs d'observation, de formulation du modèle, de réglage des paramètres de différents aspects du système océan-sol-atmosphère-hydrologie, etc. L'évolution de ces bruits dans les équations des modèles numériques modélise la propagation des erreurs dans le système de prévision. On obtient alors les incertitudes sur les paramètres prévus, comme par exemple la hauteur d'une crue. Il reste ensuite à décider à partir de quel niveau de probabilité lancer l'alerte.

Ces techniques de simulation des erreurs sont en plein essor mais elles nécessitent de fortes capacités en temps de calcul, accessibles à Toulouse. Elles fournissent des éléments irremplaçables pour identifier les informations utiles dans les simulations numériques de l'environnement et du climat. Elles aident aussi à identifier les processus physiques qui limitent la qualité de ces simulations. ●

CONTRIBUTRICES :

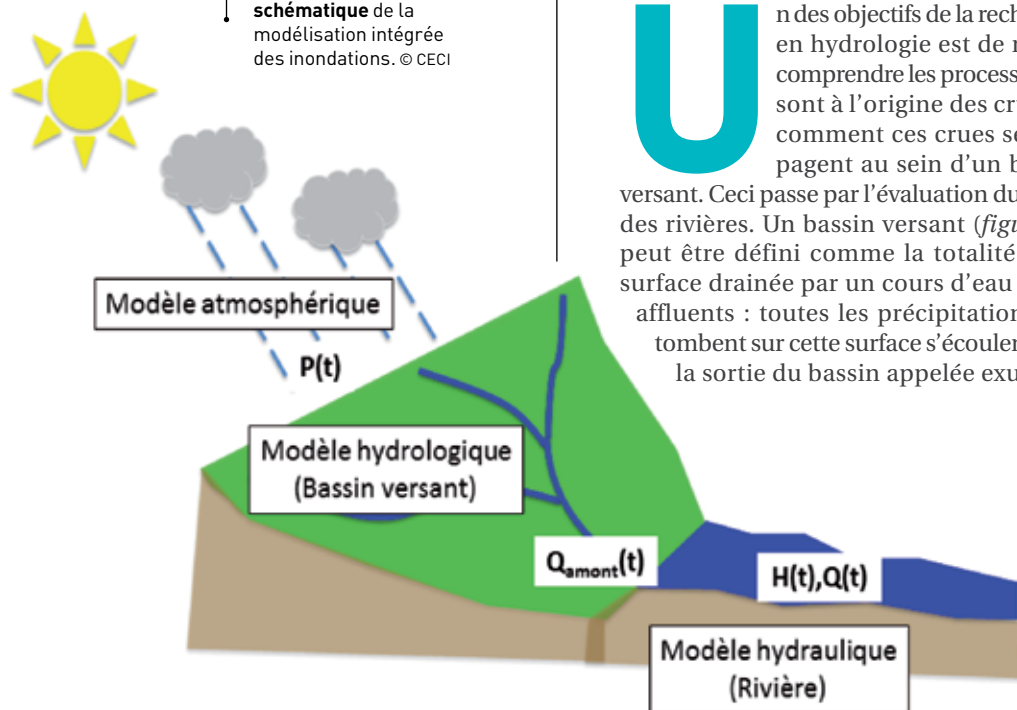
Sophie Ricci, Climat, environnement, couplages et incertitudes – CECI (CERFACS, CNRS)
Hélène Roux, Institut de mécanique des fluides de Toulouse – IMFT (CNRS, INP Toulouse, Université Toulouse III – Paul Sabatier).

CRUES ET INONDATIONS

MIEUX COMPRENDRE L'ALÉA POUR MIEUX LE PRÉVOIR

Deux laboratoires toulousains travaillent à la modélisation numérique des processus à l'origine des crues de rivières et de leurs incertitudes.

Figure 1 - Représentation schématique de la modélisation intégrée des inondations. © CECI



Un des objectifs de la recherche en hydrologie est de mieux comprendre les processus qui sont à l'origine des crues et comment ces crues se propagent au sein d'un bassin versant. Ceci passe par l'évaluation du débit des rivières. Un bassin versant (*figure 1*) peut être défini comme la totalité de la surface drainée par un cours d'eau et ses affluents : toutes les précipitations qui tombent sur cette surface s'écoulent vers la sortie du bassin appelée exutoire.

Deux laboratoires de recherche toulousains sont engagés dans cette problématique depuis plusieurs années. Dans un des laboratoires, les études se concentrent sur deux thématiques : les crues soudaines à l'échelle du bassin versant et la dynamique des écoulements dans une plaine d'inondation.

Améliorer les techniques de modélisation

Les crues soudaines sont causées par des pluies intenses, très localisées et de courte durée. Le niveau de l'eau dans la rivière monte alors très rapidement, souvent en quelques heures. Les petits bassins versants ($\approx 100 \text{ km}^2$) situés en zone montagneuse sont notamment touchés par ce type de crues.

Ils sont particulièrement dangereux, à cause de leur réaction rapide et violente. Les services publics compétents produisent alors une carte de vigilance accessible en ligne sur plus de 20 000 km de cours d'eau (*vigicrues.gouv.fr*), ainsi qu'un service d'avertissement

en cas de risque imminent de crue sur des petits cours d'eau non surveillés (*apic.meteo.fr*). D'un point de vue opérationnel, il s'agit d'alerter les décideurs et de leur fournir les informations pertinentes pour aider à la gestion de l'alerte en cas de crue. Pour la recherche, les enjeux sont doubles : il s'agit à la fois d'approfondir les connaissances actuelles sur la physique des phénomènes pour mieux les modéliser, mais également d'améliorer les techniques numériques et mathématiques nécessaires à la modélisation. Les recherches menées dans le second laboratoire, en calcul scientifique, visent à quantifier et réduire les erreurs dont les modèles numériques sont entachés afin d'améliorer la prévision des débits. La méconnaissance des données ainsi que la simplification des équations de la physique limitent les performances des modèles numériques. Les sources principales d'incertitudes proviennent de la

connaissance imparfaite des précipitations (*notées $P(t)$ sur la figure 1*), de la description approximative des frottements au fond de la rivière, ainsi que de la forme de son lit et des apports hydrologiques (*notés $Q_{amont}(t)$ sur la figure 1*). L'estimation résultante de la hauteur d'eau (*notée $H(t)$ sur la figure 1*) est donc sensiblement incertaine. Le modèle peut prévoir à tort une forte augmentation du débit et un débordement des berges, ou au contraire, sous-estimer un événement de crue extrême. La modélisation des processus

hydrologiques et de leurs incertitudes à fine échelle (*figure 2*), sur des domaines allant de la rivière au bassin versant, implique des ressources notables en matière de calcul à haute performance et un volume de données associé important. Un des enjeux pour la communauté scientifique est de proposer des solutions compatibles avec les contraintes opérationnelles des organismes de prévision des crues et de la gestion de la ressource en eau. ●

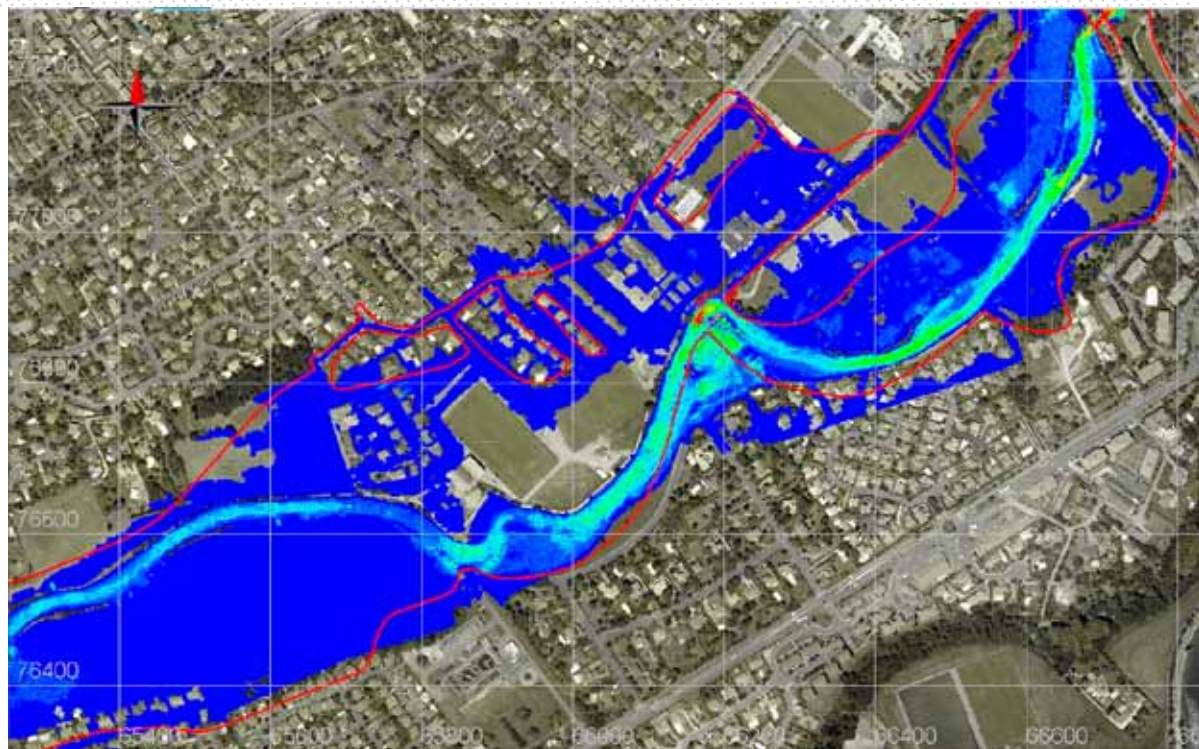


Figure 2 - Zone inondée et courants simulés, comparés aux limites observées lors d'une crue (en rouge). © IMFT et BD ORTHO © IGN

● ● ● PROPOSER DES SOLUTIONS
● ● ● COMPATIBLES AVEC
● ● ● LES CONTRAINTES DES
● ● ● ORGANISMES DE PRÉVISION

Direction : José Biosca
Coordination : Pascal Lemoine
Création graphique : Sandrine Lucas
Secrétariat de rédaction : Jean-Paul Bobin
Comité de rédaction CNRS : Catherine Dematteis,
Valeria Medina-Ambiado, Laure Vayssettes
et Clément Blondel
Coordination scientifique : Béatrice Chatel
Diffusion : La Dépêche du Midi

Photographies :
Couverture : Dépêche du Midi.
Adrian Kaye pour le verso.

Bien que la société Le Cèdre ait fait tout son possible pour citer correctement et contacter la source et/ou le(s) détenteur(s) du copyright de chaque photo, nous nous excusons par avance de toute erreur ou omission involontaire qui serait immédiatement corrigée dans une prochaine édition.



Journal de la Démocratie
Groupe La Dépêche du Midi
Société Anonyme au capital de 3 577 010 euros
Siège : Avenue Jean Baylet, 31095 Toulouse CEDEX
Tél : 05 62 11 33 00 - Fax 05 61 44 74 74
e-mail : contact@ladepeche.com

Président Directeur Général, responsable de la rédaction :
Jean-Michel BAYLET
Directeur de la publication
Jean-Nicolas BAYLET

Commission paritaire n : 0320 C 87785 – ISSN 0181- 7981
Impression : Techni Print, avenue de Suède, 82 000 Montauban



L'Institut d'études des systèmes complexes de Toulouse – XSYS – réunit des acteurs.trice.s de Toulouse et de la région Occitanie aux expertises complémentaires autour d'un projet unique en France : bâtir des approches méthodologiques transversales mêlant connaissances expertes et approches formelles pour analyser, comprendre et agir dans trois domaines prioritaires : réseaux dynamiques, déplacements collectifs et mobilités, adaptation aux risques.

L'XSYS vise à développer la recherche scientifique interdisciplinaire, l'innovation partenariale, la formation et le partage de connaissances sur les systèmes complexes et leurs applications.

L'XSYS est piloté par un comité de quinze membres appuyé sur un conseil scientifique international de haut niveau. Un ensemble de quatorze unités de recherche reconnues à l'international et dix-sept structures non académiques (PME, associations, collectivités) forment le cœur de la dynamique XSYS.

Site web : xsys.fr

REMERCIEMENTS

En plus de leur contribution à ce Petit illustré Systèmes complexes, le CNRS Midi-Pyrénées remercie particulièrement Aurélie Crette, Véronique Ducrocq, Bertrand Georgeot, Bertrand Jouve, Guy Theraulaz ainsi que Marina Léonard pour le Quai des Savoirs.



mgen[★]

MUTUELLE
SANTÉ
PRÉVOYANCE

MA SANTÉ, C'EST SÉRIEUX.

J'AI
CHOISI
MGEN

mgen.fr

MGEN, Mutuelle Générale de l'Éducation Nationale, n°775 685 399, MGEN Vie, n°441 922 002, MGEN Filia, n°440 363 588, mutuelles soumises aux dispositions du livre II du code de la Mutualité - MGEN Action sanitaire et sociale, n°441 921 913, MGEN Centres de santé, n°477 901 714, mutuelles soumises aux dispositions du livre III du code de la Mutualité.

À la CASDEN,
le collectif est notre moteur !

La CASDEN partage avec ses Sociétaires le sens de l'intérêt général et du service public et les accompagne au quotidien dans la réalisation de leurs projets personnels et professionnels.

Comme plus d'un million de Sociétaires,
faites confiance à la CASDEN !



Découvrez l'offre CASDEN
dédiée aux personnels du CNRS

Pour plus d'informations, contactez votre Chargée de Relation
Enseignement Supérieur et Recherche

Valérie Maria

valerie.maria@casden.banquepopulaire.fr

06 77 31 56 81 (Appel non surtaxé, coût selon votre opérateur)

Découvrez la CASDEN
sur **casden.fr**

Suivez-nous sur



CASDEN, la banque coopérative de toute la Fonction publique

LA DÉPÊCHE
PRESSE



Une foule, un banc de poissons, un réseau urbain, les réseaux sociaux, la pollinisation sont, entre autres, des systèmes complexes. Les scientifiques toulousain.e.s, à travers une approche multidisciplinaire, de la physique théorique aux sciences humaines et sociales, vous invitent à la découverte de ces systèmes étonnants.

M 28553 - 34H - 4,90 €

