

Exposé de Pierre COLLET

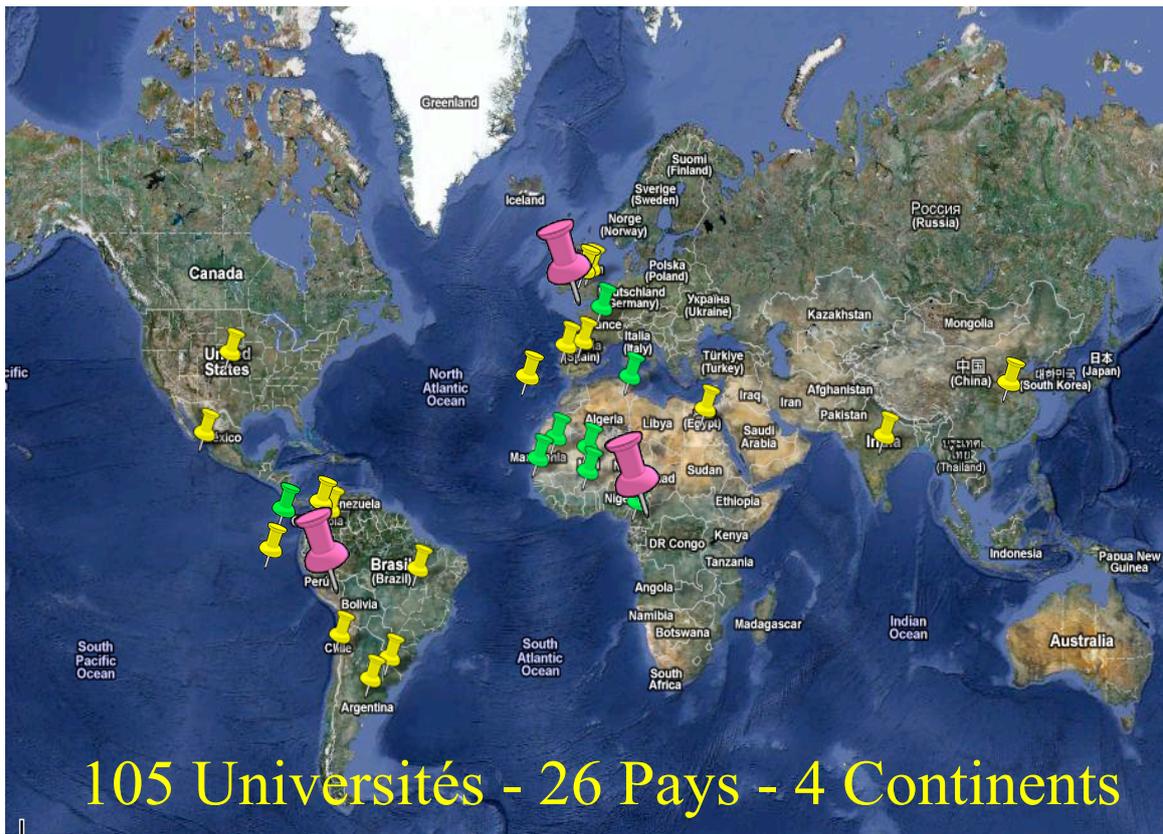
« Influence de la cyberscience sur la vie de l'homme et sa vision du monde »

Chantal DILLER : Nous accueillons le Professeur Pierre COLLET qui dirige le Département d'Informatique de l'Université de Strasbourg et qui coordonne l'UniTwin Campus Numérique des Systèmes Complexes de l'UNESCO. Nous vous remercions de nous initier à la cyberscience, née de la révolution du numérique et du virtuel, secteur de grand avenir concernant tous les domaines dont la santé, l'éducation, l'art... Merci de nous parler de l'influence de la cyberscience sur la vie de l'homme et de sa vision du monde.

Pierre COLLET : Mon exposé a de grandes implications avec le précédent. Ce que je vais vous présenter ici se fait dans le cadre d'un Campus Numérique des Systèmes Complexes, qui est un UniTwin de l'UNESCO; UniTwin signifie « University Twinning ». C'est un programme de jumelage qui permet de créer un réseau entre des Universités qui souhaitent démarrer un nouveau domaine et en l'occurrence une nouvelle science. C'est un UniTwin mondial au sens où actuellement, nous avons cent-six présidents d'universités qui ont signé une lettre d'engagement forte à promouvoir et à développer la science des systèmes complexes. Notre grand démarrage, avec la signature par Irina Bokova, directrice générale de l'Unesco, se fait la semaine prochaine, du 23 au 26 juin 2014, au Havre. Ce projet mondial, présidé par Paul Bourguin (l'un des grands scientifiques français) est coordonné par l'université du Havre et l'université de Strasbourg.

Nous faisons le pari que l'éducation sera l'un des moyens de lutter un peu contre la folie humaine. Je connais personnellement plein de manières de faire des bombes extrêmement puissantes dans le coin de mon garage, avec des choses que je peux acheter dans un magasin de bricolage. Mais j'ai la faiblesse de penser qu'en ayant une certaine éducation, je ne vois pas l'intérêt de faire sauter tous les gens. Il y a bien des traités de non-prolifération des bombes atomiques, mais il y a des États qui ont des bombes et on ne peut pas les empêcher d'appuyer sur le bouton. On est en train d'essayer d'empêcher certains États d'y accéder, mais si nous avons une bombe atomique, qu'est-ce qui nous permet de dire « vous, vous n'avez pas le droit parce que nous, nous en avons une » ? Si nous possédons une bombe atomique, pourquoi ces états ne pourraient-ils pas en avoir une ? Leur demande est légitime ! Et puis on se rend compte que finalement, ceux qui l'ont ne s'en servent pas parce que justement, avec de grands moyens et de grands pouvoirs arrivent de grandes responsabilités, et cela change la nature des gens.

Tout ce que je vous montre ici se fait dans le cadre de l'Unesco, qui demande spécifiquement à ce que soit développé un transfert des connaissances du Nord vers le Sud, et du Sud vers le Sud. Clairement, ce sont des axes qu'il faut respecter, et dans le cadre des UniTwin de l'Unesco, il faut que deux tiers des membres soient des pays « du Sud » – l'acception est celle que vous voudrez – et un tiers des pays du Nord. Nous avons pour l'instant une feuille de route continentale africaine, une feuille de route sud-américaine et une feuille de route européenne.



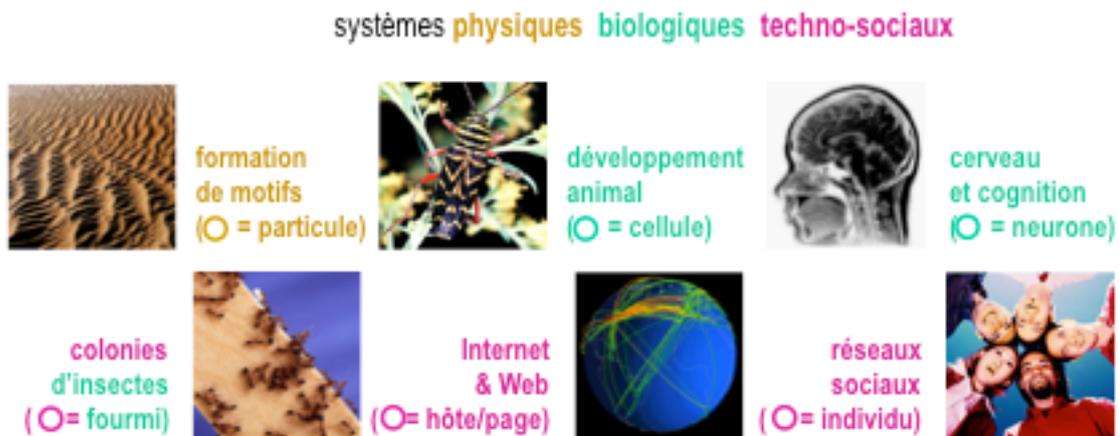
Une nouvelle science a émergé au début du XX^e siècle, appelée la science des systèmes complexes. Il y a eu des prémices, notamment avec Poincaré qui a montré avec la théorie des trois corps qu'éventuellement, avec des équations déterministes, parfaites – qui sont des équations de la gravitation de Newton, des choses extrêmement simples d'un point de vue mathématique –, si l'on ne connaît pas la position exacte de trois corps au sens mathématique du terme, on est totalement incapable de prédire où est-ce que ces trois corps vont se retrouver dans quelques dizaines ou quelques milliers d'années. C'est totalement imprédictible parce que c'est un système qu'on appelle chaotique ; le système chaotique fait que même si l'on en connaît les équations et les démarches de manière absolument certaine et exacte, la moindre petite modification des conditions initiales fait que ce système va évoluer d'une manière totalement différente. C'est le fameux effet papillon dont la plupart d'entre vous ont entendu parler.

Cela a commencé à chambouler les esprits des scientifiques qui ont fini par se dire : est-il réaliste d'imaginer que l'on est capables de mettre l'environnement dans des équations exactes ? Il est très probable que non, on l'a clairement démontré parce qu'en fait, une table n'est pas exactement un rectangle, les angles ne sont pas à 90 degrés, etc. Pendant longtemps, on s'est dits que les petits défauts par rapport à une représentation mathématique parfaite n'étaient pas très importants. Mais la découverte de systèmes chaotiques sensibles aux conditions initiales a montré que non. Une différence infime des conditions initiales peut avoir une très grande influence dans le futur. Maintenant, on sait qu'on ne peut pas modéliser le monde avec des équations mathématiquement exactes. L'idée a été de mener la réflexion suivante : qu'est-ce qu'on peut utiliser pour essayer de modéliser quelque chose qui, par essence, n'est pas exact et qu'on ne connaît

pas de manière parfaite ? C'est ainsi qu'une science des systèmes complexes a émergé depuis un certain nombre d'années.

Comment définir un système complexe ? La définition que je vous donne ici est de plus en plus consensuelle : c'est « tout système composé d'un grand nombre d'entités autonomes en interaction, créant plusieurs niveaux d'organisation collective aboutissant à des comportements émergents ». C'est un peu compliqué, mais je vais vous montrer par quelques vidéos à quoi cela correspond.

Des systèmes complexes, nous en voyons partout dans la nature. Si nous regardons par exemple du sable, il s'organise en faisant soit des grandes dunes, soit des motifs que nous voyons au bord de la mer quand elle se retire. Maintenant, si nous regardons un animal, nous voyons qu'il est composé d'un très grand nombre de cellules. Chaque cellule a une vie autonome et se développe, mais le propre d'un animal est qu'il est composé d'un très grand nombre de cellules qui interagissent entre elles et qui font qu'un homme, c'est autre chose que quatre-vingts kilos de viande et d'os achetés chez le boucher. La différence est que les cellules qui composent un être vivant interagissent et ont un comportement émergent. Aristote disait que le tout est plus que la somme des parties ; nous essayons de mettre le doigt dessus pour comprendre en quoi est-ce que le tout est plus que la somme des parties.



Pour le cerveau, c'est pareil : il a dix mille milliards de neurones et nous sommes capables de prendre une décision en quelques dixièmes de secondes. Comment ces processus cognitifs fonctionnent-ils ? Là aussi, la pensée que nous avons, la réaction que nous allons avoir sera un comportement émergent de ces milliards de neurones qui interagissent entre eux de manière quasiment instantanée. Mais les neurones n'interagissent pas tous les uns avec les autres.

Idem pour les colonies de fourmis et les insectes : une fourmilière a un comportement intelligent alors qu'une fourmi toute seule n'en est pas capable. Cela se retrouve à tous les niveaux avec le web qui est la traduction de comportements sociaux, et maintenant les réseaux sociaux avec Twitter ou Facebook. Cela fait que de temps en temps, un adolescent invite ses quinze copains pour son anniversaire, et puis il y en a deux mille

qui débarquent et qui cassent toute la maison... C'est aussi un comportement émergent, un comportement social que nous observons.

Les exemples de systèmes complexes que je vais vous montrer vont des sciences dures jusqu'aux sciences sociales. Aristote disant que « le tout est plus que la somme des parties », finalement, le fait d'accepter de ne pas pouvoir tout mettre en équation exacte nous fera dire que nous ne pouvons pas tout prédire exactement. Ilya Prigogine, qui était l'un des grands penseurs derrière cette nouvelle science, a dit quelque chose de très pertinent : « Il ne s'agit pas de prédire ce qui *va* se passer, mais ce qui *peut* se passer » en probabilité. Si nous avons des modèles qui fonctionnent pour reconstituer le présent, nous allons peut-être pouvoir les utiliser et, en allant plus loin, prédire ce qui peut se passer dans un futur relativement proche. C'est ce que nous voyons avec la météo qui est de plus en plus fiable : nous sommes maintenant capables d'avoir une météo raisonnable à un jour, voire deux jours près. Il y a une trentaine d'années, avoir une météo fiable à un jour près était très difficile.

De manière intéressante, la plupart des grands prix Nobel en sciences et en économie travaillent sur des systèmes complexes. René THOM était celui qui a fait la théorie des catastrophes avec un grand mot, bien repris par Israël NISAND, qui est celui des bifurcations : au bout d'un certain temps, un système complexe va bifurquer et faire un choix au niveau moléculaire. Même si ce sont des équations purement mathématiques qui gouvernent le développement du système complexe, de temps en temps, les systèmes font des choix que nous ne connaissons pas, ce qui signifie que nous ne pouvons pas remonter dans le temps pour savoir ce qui s'est passé.

Nous avons également la chance d'avoir trois prix Nobel en activité à l'Université de Strasbourg :

- Jean-Marie LEHN prix Nobel de Chimie en 1987 (et parrain du Campus Numérique des Systèmes Complexes de l'Université de Strasbourg) dirige le laboratoire de Chimie des systèmes complexes.

- Jules HOFFMANN, en 2011, a obtenu son prix Nobel sur l'immunologie. Si je me coupe, des bactéries vont éventuellement rentrer dans la plaie, et que va-t-il se passer ? Un de mes globules blancs passera dans le coin, verra une bactérie et se dira qu'il va commencer à la phagocyter. Un certain nombre de molécules chimiques vont être émises, qui feront que d'autres globules blancs seront recrutés, et tout d'un coup, une bataille s'organise et ça chauffe... Mais ce n'est pas moi qui me suis concentré en disant à tous mes globules blancs « attention, je me suis coupé, rendez-vous à cet endroit-là ». Tout cela s'auto-organise, se fait naturellement et de manière autonome parce qu'il s'agit ici d'un système complexe.

- Plus récemment, Martin KARPLUS a obtenu un prix Nobel en 2013. Il a été le premier à reconstruire des réactions chimiques dans un ordinateur à partir d'équations, qui sont une manière de modéliser des systèmes complexes.

De manière intéressante, à l'Université de Strasbourg, qui a trois prix Nobel très centrés sur les systèmes complexes, il n'y a pas Licence ou de Master sur les systèmes complexes !

Il y a des gens qui travaillent sur les systèmes complexes en musique, en sciences humaines, sur les comportements sociaux, sur l'économie. Qu'est-ce que la Bourse ? Ce

sont des centaines de milliers d'entreprises autonomes. Il n'y a pas une seule entreprise qui a toutes les autres pour fournisseur ou pour client, et pourtant, quand Lehman Brothers se casse la figure en 2009 – Lehman Brothers, ce n'est rien du tout au niveau mondial, même en nombre de dollars –, toute l'économie mondiale est subitement entraînée vers le bas. Là aussi, c'est parce que tout le monde est interconnecté et qu'il y a un tissu d'entreprises d'ailleurs complexes – *complexus* signifie en latin « ce qui est enchevêtré », donc la racine du mot est très bien choisie.



La phénoménologie complexe, on la voit dans les sciences dures, par exemple dans la mécanique des fluides. Cette illustration montre Guadalupe Island, une petite île au sud-est du Mexique, avec une montagne qui a la bonne altitude pour que, lorsque les vents sont dans de bonnes conditions, nous puissions voir des rues de Von Karman qui se produisent. Ces turbulences, qui sont produites parce que le vent se prend dans cette île, nous pouvons les simuler mathématiquement à une échelle inférieure.

Voilà ce que l'on peut faire en simulation, avec l'exemple d'un écoulement turbulent. En dessous d'une certaine vitesse, nous avons un écoulement laminaire et au-dessus, un



Animation visible sur
[Lien « écoulement turbulent » non trouvé](#)

écoulement turbulent. Cela a été modélisé par des équations de Navier-Stokes. En fait, les particules qui fabriquent ces tourbillons ne savent pas

visible sur
www.youtube.com/watch?feature=player_detailpage&v=x7S2FS2Q

qu'elles les fabriquent ; ils sont le résultat d'interactions locales, de frottements entre les particules qui font qu'au bout d'un certain temps et avec des conditions particulières, ils se forment. C'est le comportement émergent de particules qui interagissent

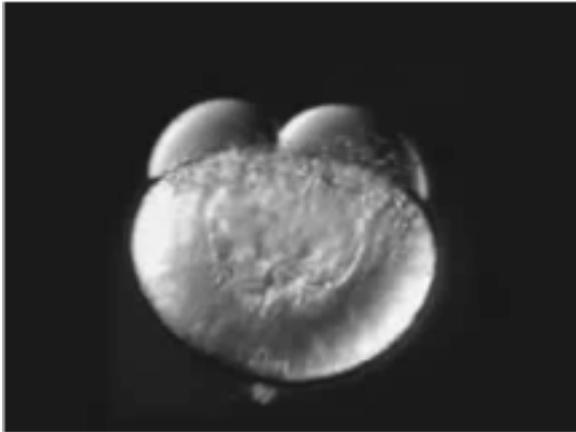
localement et n'ont absolument pas conscience qu'à un niveau supérieur, elles fabriquent ce type de tourbillons.

Nous parlions du comportement collectif avec les mouvements de foule. Vous avez tous déjà vu des vols d'étourneaux : tout d'un coup, il y a un grand vol, cela semble



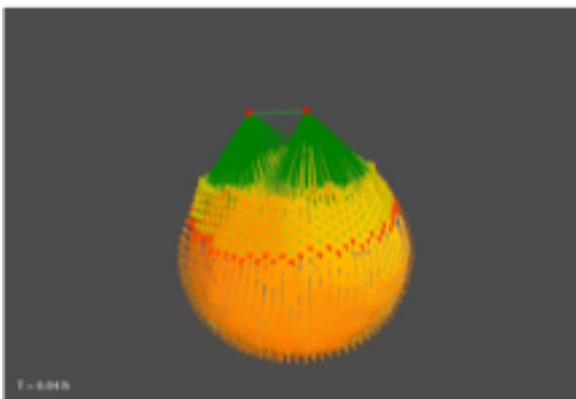
compact et on a l'impression que quelqu'un gouverne cela. C'est pareil pour les bancs de poissons : quelquefois, un barracuda essaye d'attraper des poissons, le banc se divise autour du barracuda et se reconstitue derrière. Tout comme on a retrouvé les équations mathématiques de Navier-Stokes derrière les écoulements turbulents, on a retrouvé les équations mathématiques derrière des mouvements collectifs. On est capable de refaire exactement la même chose sur ordinateur. C'est ce qui sert dans les films, par exemple dans *Jurassic Park* : le troupeau de dinosaures est simulé par ordinateur avec des caractéristiques qui sont celles d'un troupeau qui se déplace.

Les zebrafish sont des petits poissons très sympas parce qu'ils sont transparents et en plus, comme ils sont tout petits, ils rentrent dans un microscope laser. Nous pouvons en



Animation visible sur
<https://www.youtube.com/watch?v=cjZrEn5FkFY>

regarder le développement et l'embryogenèse. Cette animation montre quatre cellules, avec en dessous le jaune d'œuf qui amène les nutriments. Ensuite, les cellules vont se diviser : 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64... C'est un développement absolument géométrique, parfait, dont la modélisation mathématique est très simple (le nombre de cellules double à chaque génération). Sauf qu'au bout d'un certain temps, les conditions ne vont pas être exactement les mêmes pour toutes les cellules et un code génétique va faire que certaines vont se différencier. Il y aura un certain nombre de contraintes dues à la gravité, dues à la présence de plusieurs couches de cellules dont certaines n'auront plus accès au jaune d'œuf. Les conditions sont différentes, cela va s'amplifier par le contenu des gènes et donc, tout d'un coup, ces cellules vont se différencier. Au bout d'un moment vont apparaître la queue, la tête, puis des organes tels que l'œil, le foie, etc.



Animation visible sur
[Lien non trouvé](#)

Si nous avons été capables de reconnaître la division par 2, 4, 8, 16, 32, etc., qui est une suite géométrique, ne pourrions-nous pas simuler la même chose dans un ordinateur ? Mais ce que nous faisons, c'est que dès que nous nous rendons compte qu'il y a une différence entre ce que nous observons et nos équations, nous les modifions pour que cela corresponde. C'est ce que nous appelons des équations intégro-différentielles, et le calcul visible ici a été effectué dans le cadre de la thèse de Julien Delile, qui a utilisé le super-calculateur de notre équipe à Strasbourg pour effectuer une partie de ses calculs : là aussi, les premières cellules se divisent et au bout d'un moment, l'épibole va se réaliser de la même manière. Nous assistons à une différenciation

cellulaire d'environ cinq heures de développement d'un zebrafish avec le début d'organes qui vont commencer à apparaître.

Depuis des dizaines d'années, il y a des gens qui travaillent sur un modèle mathématique partiel du foie, d'autres sur un modèle mathématique du cœur, des poumons, du système immunitaire, etc. À partir du moment où on a un groupe de cellules dont on sait, parce qu'on l'observe sur le vrai animal, qu'il va devenir un foie, on peut remplacer cet amas de cellules par un modèle mathématique du foie. Aux derniers entretiens de Barcelone sur la question, l'on pense que d'ici à 2030, nous serons capables d'obtenir le physiome humain : c'est actuellement un grand projet. La grande idée est d'arriver à être capable de simuler dans un ordinateur le développement d'un être humain, de la première cellule jusqu'au stade adulte et jusqu'à sa mort. Il y a bien entendu de grosses implications derrière cela.

Un congrès a eu lieu en 2012 à Strasbourg : « La simulation numérique pour la santé, de la cellule à l'humain virtuel ». Nous ne sommes pas du tout dans de la science-fiction, c'est aujourd'hui que cela se passe... L'idée est de développer ce que l'on appelle une « santé 4P » : c'est une santé participative, prédictive, préventive et personnalisée.

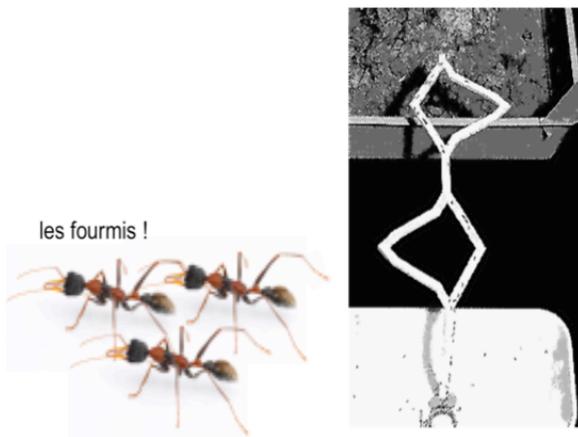
Nous arrivons à l'objectif de cette présentation. Tout ceci ne se fait que grâce à une santé participative qui consiste à créer des cohortes de patients. Actuellement, des cohortes de plusieurs centaines de milliers de patients existent dans différents pays. En Angleterre, la progression dans la vie de 400 000 patients est suivie d'un point de vue médical, et de temps en temps, il y a malheureusement quelqu'un qui développe par exemple une maladie orpheline. Si quinze personnes développent cette maladie sur les 400 000 faisant partie du même protocole, nous allons essayer de regarder quelles étaient leurs trajectoires. Par exemple, sont-elles toutes diabétiques ou ont-elles toutes eu la varicelle à 4 ans ou ont-elles toutes une mutation génétique particulière ? Nous pouvons essayer de voir si elles ont des points communs. À partir du moment où elles en ont, nous essayons d'établir des trajectoires communes à toutes ces personnes grâce à la santé participative. L'idée est qu'ensuite, si nous voyons quelqu'un en train de suivre cette trajectoire, cela nous aidera à prédire la suite (en probabilité).

Attention, il ne s'agit que d'une prédiction en probabilité : nous ne cherchons pas à prédire ce qui va se passer, mais ce qui peut se passer. Et si nous constatons que quelqu'un a les mêmes antécédents génétiques et est en train de prendre la même trajectoire qu'un grand nombre de personnes ayant développé une maladie, ne peut-on pas imaginer que cette personne puisse développer à terme ce type de maladie ?

Si nous sommes capables de faire une prédiction sur ce qui peut se passer en utilisant les trajectoires ainsi fabriquées, ne pouvons-nous pas essayer d'infléchir ces trajectoires en faisant de la prévention ? Tout cela peut paraître de la science-fiction, mais je vous rappelle que l'année dernière, on a prédit à Angelina Jolie qu'elle avait environ 87 % de risque de développer un cancer du sein ; il se trouve que sa situation a été très médiatisée parce que c'est une actrice. Ayant vu sa mère décéder d'un cancer des ovaires à 56 ans, elle a décidé de subir une double mastectomie pour réduire sa probabilité de développer cette maladie. La médecine cherche à faire en sorte que nous vivions le plus longtemps possible et dans les meilleures conditions. C'est pour cela qu'on va vous dire : « Si vous êtes en surpoids, si vous mangez trop de charcuterie, il y

a de fortes chances pour que vous développiez une maladie cardiovasculaire dans le futur. La prévention consistera à conseiller d'essayez de changer vos habitudes pour que ceci ne se produise pas. »

L'utilisation du physiome du patient intervient ensuite pour faire une santé personnalisée, car pourquoi administrer exactement le même traitement à plusieurs personnes différentes ? Nous sommes tous différents et peut-être que certains seront capables d'assimiler des molécules mieux que d'autres. Comment le savoir ? Au lieu d'associer à chaque bébé une simple carte Vitale, on pourrait lui associer un physiome, c'est-à-dire un modèle mathématique et, au fur et à mesure de son développement, modifier ce modèle pour qu'il reflète ce qu'est cet être humain ; si un jour il fait un cancer ou doit subir une transplantation, et qu'il faut lui administrer un certain nombre de molécules pour que tout se passe bien, peut-être que nous pourrions essayer ces molécules à l'avance sur le modèle mathématique de cette personne pour nous assurer que, par exemple, son système rénal soit compatible, etc.



Animation visible sur
<http://litis.univ-lehavre.fr/~dutot/MiscResearch.html>

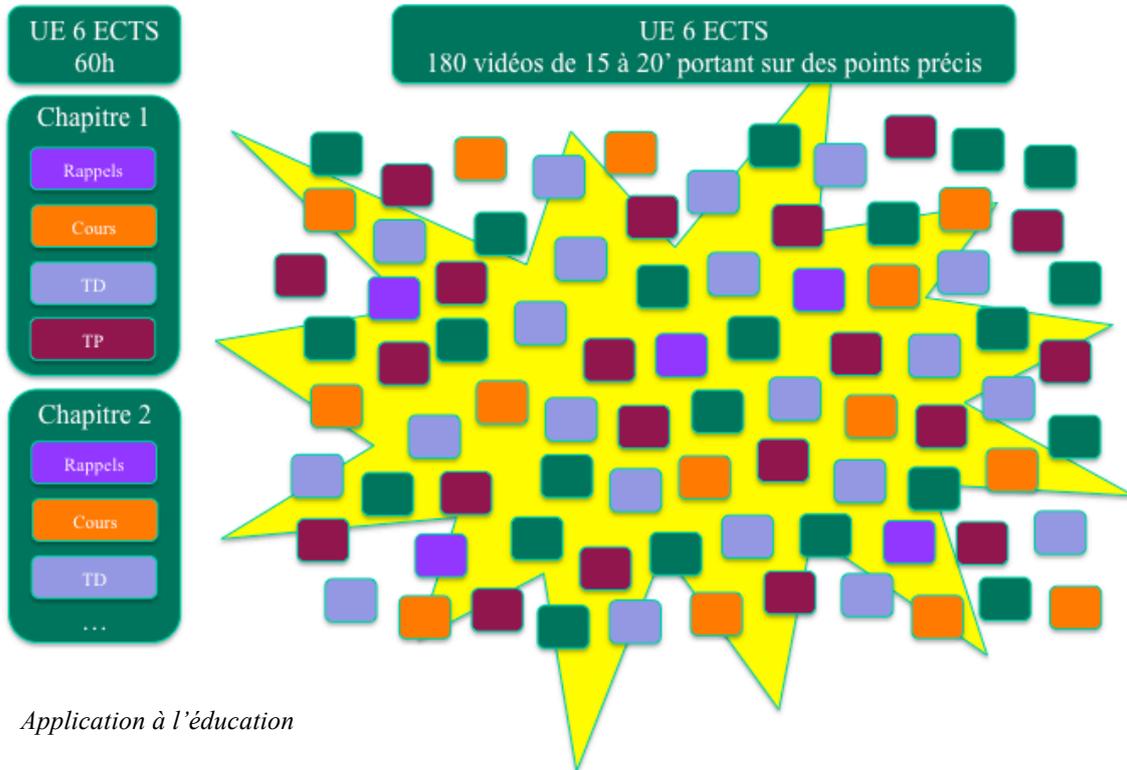
Nous parlions jusque-là de santé, mais les comportements collectifs peuvent aussi être utilisés à d'autres escients. Voici une vidéo de fourmis. Une fourmi toute seule ne contient pas beaucoup de neurones, elle n'est pas capable de faire des choses très intelligentes. En revanche, si vous mettez une fourmilière dans un bac et de la nourriture à distance, quelques heures après, il y aura une colonne de fourmis avec une particularité : la trajectoire empruntée par cette colonne sera le plus court chemin entre la fourmilière et le point de nourriture. Le plus court chemin, c'est quelque chose d'extrêmement compliqué

et les fourmis arrivent à le faire ! Depuis cent cinquante millions d'années qu'elles sont là, elles ont eu le temps de développer des heuristiques intéressantes. Là encore, nous avons retrouvé ces stratégies : nous sommes capables de refaire exactement ce que font les fourmis et de trouver les plus courts chemins de cette manière.

Nous pouvons utiliser cela par exemple dans l'éducation. Jusqu'à maintenant, nos cours sont formés de chapitres bien organisés : des rappels de cours, des cours, des travaux dirigés, des travaux pratiques, etc. Mais cette organisation a été faite pour la masse et ne conviendra pas à des étudiants qui sont un peu plus lents que d'autres ; la progression telle qu'elle est sera trop rapide pour eux. À l'inverse, d'autres sont un peu plus rapides, comprennent mieux les choses et peuvent aussi avoir des connaissances plus grandes ; pour eux, la progression sera trop lente.

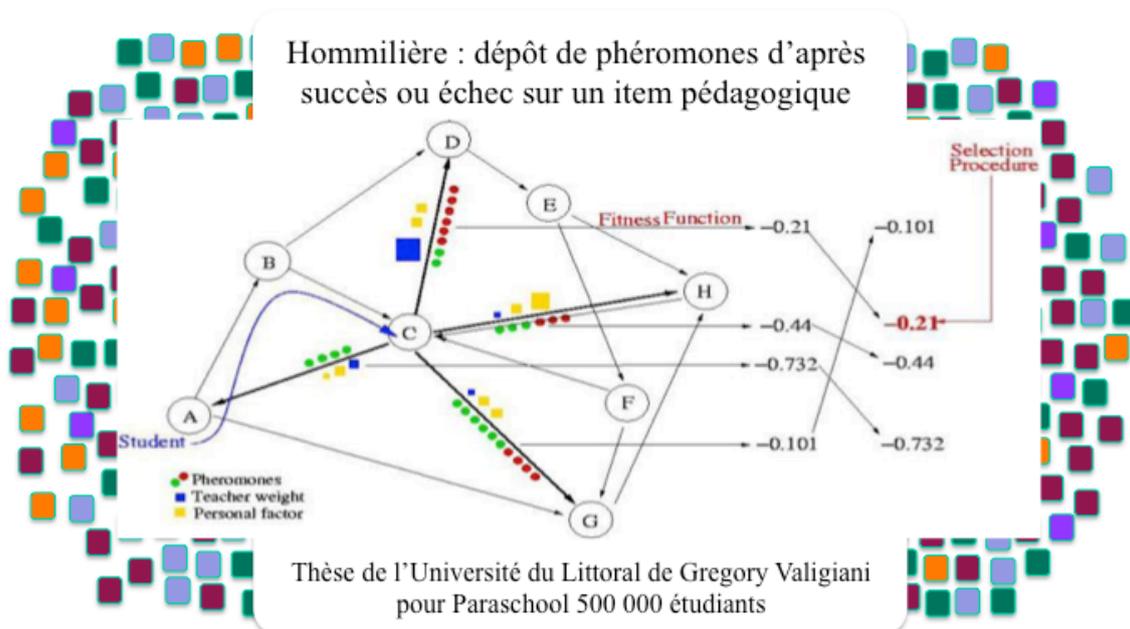
L'idée est la suivante : plutôt que d'avoir un seul système éducatif pour tous, ne serait-il pas possible d'arriver à personnaliser et à faire des trajectoires éducatives différentes pour chacun ? Ce que nous pouvons faire, c'est utiliser ce que nous avons vu avec les fourmis en éclatant les cours traditionnels, c'est-à-dire que nous aurons plein de petits

modules qui vont juste adresser un seul point particulier. Donc, nous faisons de la déconstruction de cours. Nous allons par exemple faire des petites vidéos de 15 à 20 minutes, chacune sur un point précis. Si chaque cours est divisé en petites vidéos, cela veut dire que nous aurons 1 800 vidéos pour toute une année.



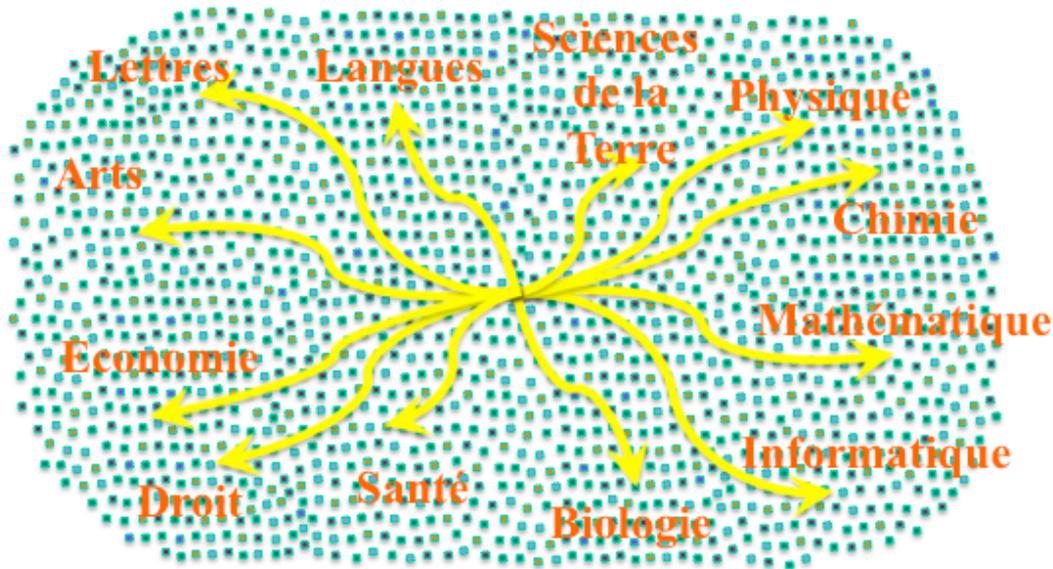
Application à l'éducation

Là-dessus, que pouvons-nous faire ? Nous pouvons relancer un algorithme à colonies de fourmis appelées les hommilières, puisque ce sont des fourmilières appliquées à l'homme avec un mode de fonctionnement un peu différent. Cela a été utilisé pour Paraschool par 500 000 étudiants. Et que se passe-t-il ? En fait, on se rend compte que sur l'ensemble des disciplines, on est capable de faire émerger des chemins optimaux : un chemin ira vers la chimie, un autre vers les mathématiques, vers l'informatique, etc. Le gros intérêt de ces chemins est qu'ils n'ont pas été fabriqués par le corps enseignant, mais par les étudiants. Eux-mêmes ont trouvé quelle était la succession des items qu'il



Au niveau d'une année : 60 ECTS = 1 800 items

valait mieux prendre. Pour moi, en tant que professeur qui enseigne la même chose depuis vingt ou trente ans, les choses sont évidentes et je ne vois même pas où est le problème, contrairement à un étudiant qui n'a pas la même culture ou le même recul. Peut-être que la succession d'exercices ou la progression qui me semble raisonnable ne l'est pas du tout pour l'étudiant. L'idée est qu'en faisant cela à la manière des fourmilières, les étudiants vont eux-mêmes créer leur trajectoire. Ce sont des trajectoires optimales parce qu'on utilise le même mécanisme que celui des fourmilières qui, lui, est optimal.



Sur l'ensemble des disciplines : émergence de chemins optimaux parmi des milliers d'items grâce à une hommière (projet POEM, CNSC Strasbourg)

Encore une fois, nous sommes dans le collectif et le participatif pour fabriquer cette trajectoire optimale. Nous allons faire participer des centaines de milliers d'étudiants. Actuellement, un gros domaine appelé MOOC – Massive open online courses – est en train de se développer, avec des millions d'étudiants qui participent sur internet ; l'idée est de récupérer leurs échecs et leurs erreurs pour fabriquer ces trajectoires optimales.

Actuellement, il y a des invasions de criquets pèlerins ; ils sont en ce moment à Madagascar. Ils ont des phases solitaires et des phases grégaires qui sont réversibles et le facteur déclenchant est tout bêtement la densité. Une invasion de criquets représente 20 % des terres émergées du monde, c'est absolument monstrueux et cela cause des milliards de dollars de dégâts. Quand une invasion de criquets est prise à temps, avant d'arriver au stade grégaire et au stade invasif, et si on se rend compte que la densité va devenir un seuil critique, la méthode actuelle est de disperser de l'insecticide pour arriver à ce que la densité soit inférieure à celle qui fait que tout d'un coup, la nuée de criquets se développe. Dans ce contexte, si nous développons l'écotourisme, nous pouvons arriver à prévenir ces nuages de criquets absolument dévastateurs. C'est cela que l'on peut appeler une science citoyenne : arriver à éduquer les gens pour qu'ils puissent reconnaître que dans cette situation-là, une catastrophe peut arriver.

Nous faisons cela dans le cadre d'un grand campus numérique mondial coordonné par Strasbourg et par l'université du Havre, sachant que bien entendu, il comprend

beaucoup de personnes. Il travaille également sur tous les réseaux d'irrigation, les problèmes d'inondation ou les bassins versants. Il cherche à savoir comment les petits ruisseaux vont s'agréger en plus grandes rivières et feront qu'au-delà d'un certain seuil, une inondation va se produire, ou un éboulement, etc.

Tout cela nous amène vers une société de la connaissance intégrée, avec une belle phrase de Schopenhauer : « La tâche n'est pas tant de voir ce que personne n'a encore vu, mais de concevoir ce que personne n'a encore imaginé mais que tout le monde voit. » Je vous invite à penser autrement avec les systèmes complexes.

Débat

Chantal DILLER : Merci pour votre exposé qui nous donne des perspectives assez incroyables. Je ne sais pas si en médecine, cela approchera des dangers que nous a révélés le professeur NISAND. Ce n'est peut-être pas du même ordre.

Pierre COLLET : Je voudrais vous donner un exemple de médecine personnalisée concernant la transplantation de poumons. Autrefois, on faisait une circulation extracorporelle pour oxygéner le sang à l'extérieur du corps de la personne pendant qu'on changeait les poumons et qu'on mettait ceux d'un donneur. Ensuite, on redémarrait tout ça.

De nos jours, on commence par exemple par le poumon gauche en intubant la personne et en mettant de l'air dans le poumon droit. Donc, on coupe l'arrivée dans le poumon gauche, on fait la même chose pour tout ce qui est alimentation sanguine, et on peut enlever le poumon gauche de la personne qui respire à ce moment-là sur son poumon droit seulement. Pendant ce temps-là, on récupère le poumon gauche du donneur qu'on transplante dans la cage thoracique du receveur. Cela fait, on reconnecte toute la tuyauterie sanguine et respiratoire et instantanément, le poumon se regonfle. La personne peut ensuite respirer sur son poumon gauche pendant qu'on fait la transplantation du poumon droit.

Il se trouve que j'assistais à une transplantation il y a quelques mois et le chirurgien m'a cité un cas qui s'était produit un peu auparavant : la receveuse était une jeune fille de 16 ans qui avait une mucoviscidose, donc qui était un peu chétive et pas très développée du fait de ses problèmes respiratoires. Le donneur – il y a très peu de donneurs – était un garçon de 9 ans, mais bien développé. Finalement, du point de vue du volume thoracique, cela convenait. La transplantation démarre, on prend le poumon du garçon qu'on met dans la cage thoracique de la jeune fille, ça va à peu près, et au moment de rebrancher et de remettre la circulation sanguine, on se rend compte au bout d'un moment que la pression sanguine baisse et que le cœur ne suit pas. Le problème, c'est que le débit du cœur de la jeune fille est beaucoup trop fort pour faire passer la totalité du volume sanguin dans le poumon gauche seulement du garçon de 9 ans.

Si on avait eu un modèle mathématique du cœur de la receveuse ainsi que celui des poumons du donneur, on se serait aperçu avant l'intervention que le poumon seul du garçon ne serait pas capable de faire passer le débit sanguin total du cœur de la jeune fille. Et au lieu de faire une circulation extracorporelle en urgence – dans des conditions qui sont ce qu'elles sont parce que tout d'un coup, il y a tout qui s'allume partout et

qu'il faut gérer ça dans l'urgence –, on aurait pu s'y préparer et faire cela dans de meilleures conditions, en diminuant beaucoup les risques. Nous pouvons donc faire une médecine personnalisée à partir du moment où nous avons des connaissances suffisantes sur les patients.

Jean-Claude THIERRY : Merci d'avoir présenté l'étude des systèmes complexes avec tout l'avenir que cela représente. La modélisation était un des points dominants de votre intervention. Concernant la complexité, ma génération voulait sauver l'humanité en trouvant un médicament sur une protéine, sans tenir compte du voisinage. Maintenant, plus que la complexité, n'est-ce pas aussi la pluridisciplinarité et l'intégration des méthodes qui font que, couplée à la modélisation, l'étude à différents niveaux de résolution permet d'aborder des systèmes complexes qui, eux, sont multirésolution, puisqu'ils passent du niveau atomique – et même parfois subatomique – pour aller à l'ensemble cellulaire ou sociétal ? Donc, ne faudrait-il pas quand même étendre l'approche à l'ensemble de la pluridisciplinarité ?

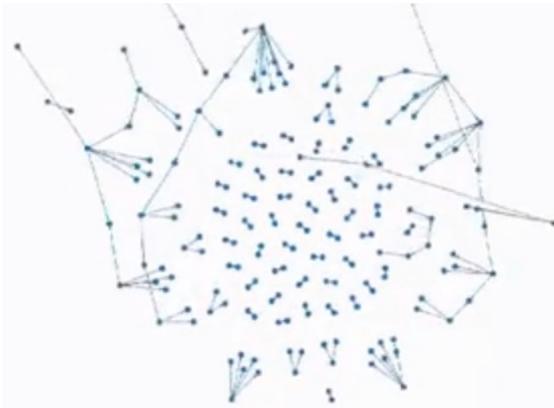
Pierre COLLET : Les systèmes complexes sont non seulement pluridisciplinaires, mais ils sont transdisciplinaires. Le campus numérique des systèmes complexes au niveau mondial est en train de démarrer. Nous en avons fait un au niveau de l'université de Strasbourg qui s'appelle le Campus numérique des systèmes complexes de l'université de Strasbourg, dont je vois qu'il y a des membres qui sont ici. Ce campus comprend des musicologues, des physiciens, chimistes, des mathématiciens, des informaticiens, des biologistes,... Ce qui est très intéressant dans la mise en œuvre d'un tel campus est qu'il permet à ces personnes-là de se réunir, d'échanger sur leurs méthodes qui finalement sont des méthodes communes de systèmes complexes. Cela permet de faire des ponts entre les sciences et, ce faisant, de réduire le diamètre de la science et de faire en sorte que des personnes qui n'auraient jamais été en contact les unes avec les autres soient capables de discuter parce qu'elles utilisent les mêmes méthodes pour des objets différents. Un des objets de la science des systèmes complexes est de réduire le diamètre des sciences : sciences dures, sciences molles, sciences humaines comme par exemple la musique ou l'art.

Récemment, j'ai présidé une thèse en littérature comparée ; c'était une balade entre l'Orient et l'Occident par une perspective soufie. En fait, la littérature et les langues sont aussi des systèmes complexes avec des interactions entre différents courants. Il y avait des langues indo-européennes qui sont arrivées aux langues germaniques, aux langues latines, etc. Tout cela, ce sont des systèmes complexes, et cette science est extrêmement large parce que justement, elle touche aussi bien aux humanités qu'aux sciences dures.

Nicolas RIVIER : Tu as montré avec les fourmis et avec ton hommilière que le comportement émergent se fait au hasard, avec des composantes aléatoires qui sont nécessaires. C'est finalement pour détourner le titre de Monod : « Ce n'est pas le hasard et la nécessité, mais c'est la nécessité du hasard. » Tu es d'accord ?

Pierre COLLET : Totalement. C'est pour cela que ce sont des processus stochastiques, c'est-à-dire que si nous avons des choses qui sont exclusivement déterministes, nous ne nous en sortons pas. En fait, la nature est intrinsèquement stochastique, donc si nous essayons de modéliser quelque chose de naturel qui a des composantes aléatoires avec

un processus uniquement déterministe, nous ne sommes pas au même niveau, nous ne jouons pas dans la même cour. Donc, il faut forcément intégrer des processus stochastiques avec une part aléatoire si nous voulons être capables de nous interfacer avec quelque chose qui, par nature, est totalement aléatoire. C'est l'intégration de ces processus stochastiques qui fait des systèmes complexes une nouvelle science, là où avant, on pensait qu'on pouvait tout faire de manière carrée et exacte. Maintenant, nous savons que nous ne pouvons pas et donc, nous approchons les choses de manière différente et nous observons à partir de grandes bases de données ; nous observons les données et à partir de là, nous tentons de trouver des modèles qui leur correspondent le mieux possible, pour ensuite essayer d'utiliser ces modèles permettant de faire de la prédiction et ensuite de la prévention.



Animation visible sur

<https://www.youtube.com/watch?v=2guKJfvq4ul>

tout d'un coup, ça va exploser. Le résultat est finalement la révolution égyptienne, vue à la manière d'un système complexe qui est la population humaine.

Puisque nous avons un politique qui va arriver plus tard pour faire une présentation, j'en profite : les systèmes complexes ont aussi des applications en politique. Je voudrais vous montrer la révolution égyptienne sous forme de système complexe. Comment cela a-t-il été fait ? Tout bêtement, ils ont regardé les tweets et les échanges entre les différentes personnes, et ils ont déterminé le noyau où la révolution avait démarré. Voilà comment, avec des échanges de tweets, les communications ont commencé à s'agréger, et cela a été modélisé de manière intéressante. Vous allez voir que

C'est ce qu'on appelle un petit monde. Nous montrons ainsi que moyennant six ou sept contacts, vous connaissez toutes les personnes de notre planète – il y a sept milliards de personnes sur terre –, parce qu'il y a des gens qui vont agréger un grand nombre de contacts. Vous êtes capables d'entrer en contact avec un petit enfant du Sahel moyennant sept contacts, parce que c'est un petit monde. Tout le monde n'est pas connecté de manière homogène et certaines personnes vont concentrer plein de connexions. Si je veux passer d'un endroit à un autre de ce petit monde qui est en train de se constituer, je vais passer par celui-là qui va passer par celui-ci et je vais retomber de l'autre côté ; et en sept intervalles, on contacte n'importe qui dans le monde entier. Vous pouvez voir sur l'animation à quel point cela peut augmenter, aller de plus en plus vite et prendre de l'ampleur. Le mécanisme émergent, c'est le fait d'avoir renversé le pouvoir. C'est un système humain complexe.

Ce que vous voyez ici, c'est ce que nous essayons de faire au niveau mondial, mais pour les sciences et si possible pour faire progresser l'éducation. En utilisant POEM – Personalised Open Education for the Masses –, nous proposons une éducation de masse personnalisée et ouverte. Tout ceci est complètement gratuit et se fait sous l'égide de l'Unesco. Il n'y a pas de « grands avides » derrière, dans le sens où il n'y a pas d'argent. Tout est libre, tout est à la disposition de tous.

Rainier BALTZ : La propagation d'une infection est-elle simulable ?

Pierre COLLET : Bien sûr, à partir du moment où nous avons les données. Actuellement, c'est le problème du *big data*, c'est-à-dire que des microscopes fabriquent des téraoctets de données par jour. L'UniTwin est composé en départements dans lesquels nous avons des e-laboratoires ; certains e-laboratoires travaillent sur les écosystèmes complexes de calculs, d'autres sur les *big data*, etc. À partir du moment où nous avons les données dans le temps, l'idée est d'essayer de trouver une modélisation qui soit capable de simuler ce que nous observons. Une fois que nous avons un modèle, la prévention consiste à dire : s'il y a un accident qui se produit, qu'est-ce que nous pourrions faire pour modifier l'existant et pour que cela ne se produise pas ? Dans l'exemple d'une inondation avec un bassin versant, où faudrait-il mettre une réserve d'eau pour que l'inondation ne se produise pas ? Il en va de même avec la propagation des infections. Tous les assureurs et réassureurs travaillent actuellement à fond dans les systèmes complexes pour essayer de prévenir les catastrophes.