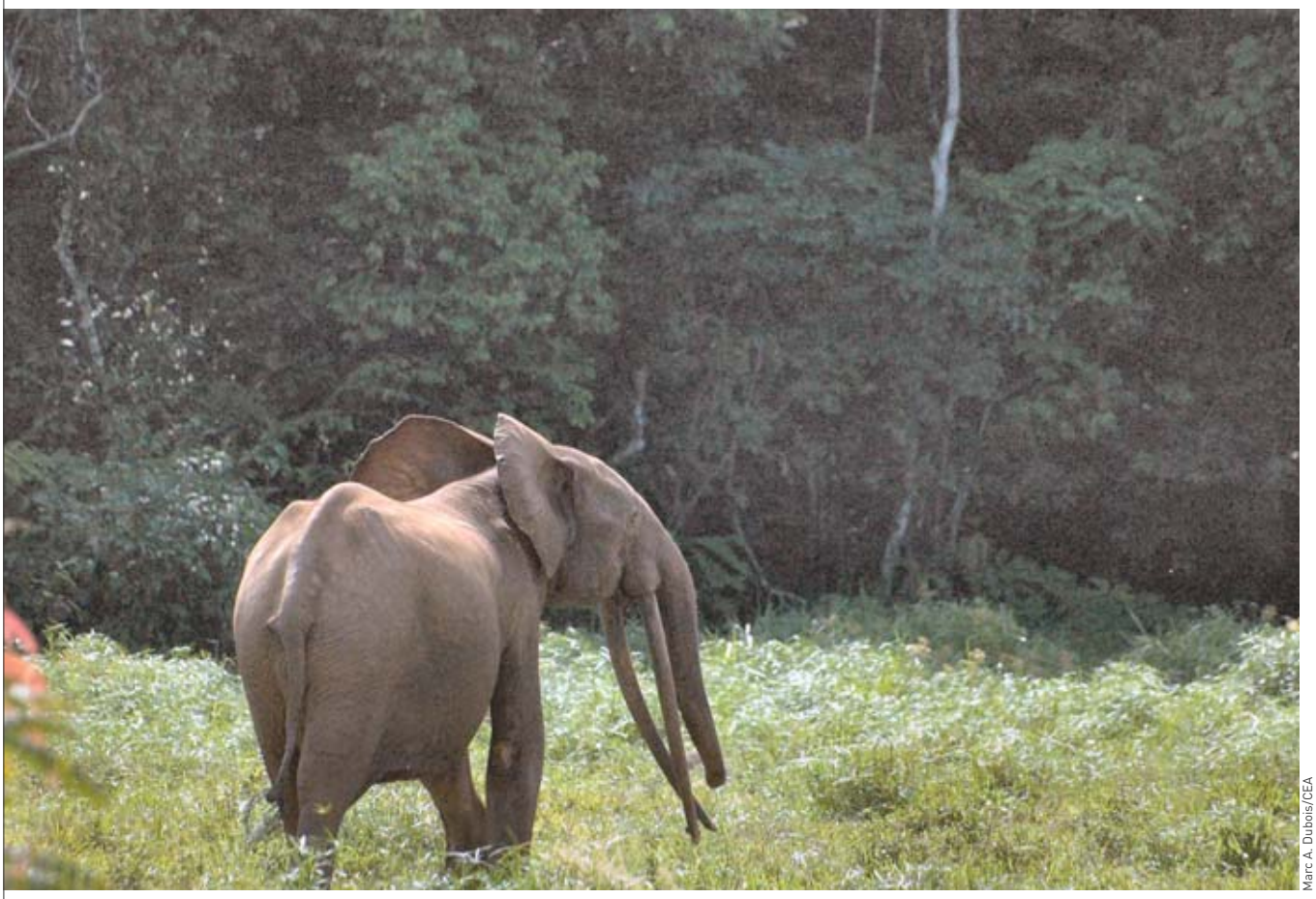
Les **systèmes écologiques** en tant que **systèmes complexes**

La physique, notamment la physique statistique et la physique de la complexité, offre désormais les outils indispensables pour comprendre les phénomènes en jeu sur la planète et, à terme, pour aider à mieux la gérer. Cette démarche explique l'implication de chercheurs du CEA dans l'étude de problématiques écologiques et épidémiologiques.



Marc A. Dubois/CEA

Éléphant de forêt (sous-espèce de l'éléphant d'Afrique) en lisière de forêt-savane (République centrafricaine).

On pense souvent que la physique ne s'intéresse qu'à l'inanimé : de l'infiniment petit de la physique des particules à l'infiniment grand de l'astronomie et de la **cosmologie**, en passant par les **nanotechnologies**, le magnétisme et la **thermodynamique**… Pourtant, à son commencement, la physique englobait dans son étude l'ensemble du réel, autrement dit la nature. En effet, le terme français "physique" nous vient du grec φύομαι que l'on peut traduire par l'expression : "j'apparais et grandis spontanément", sous-entendu comme une cellule ou une plante et donc comme un organisme vivant. Ainsi, à l'origine, la physique (φυσικη επιστημη) est bien la science de la nature et porte sur l'ensemble du réel… Au-delà, commence le domaine de la **métaphysique**. Ce n'est que parce que la méthode réductionniste a permis en premier aux sciences dites "dures" d'obtenir des résultats sous forme de lois et d'équations que les sciences du vivant ont quitté le champ de la physique dans son acception actuelle. Aujourd'hui, le mouvement tend à s'inverser.

La physique et le vivant

Les progrès récents des outils théoriques et des méthodes de mesure dans les sciences du vivant font qu'elles se trouvent à nouveau à l'étude dans le champ de la physique. Friedrich Hayek(1), fut l'un des premiers à introduire le concept de complexité dans les sciences. Véritable pionnier, il a distingué la possibilité de prévoir le comportement de systèmes simples avec des lois de celle de prévoir le compor-

(1) Hayek (Friedrich-August von), philosophe et économiste de l'École autrichienne (1899-1992). Promoteur du libéralisme, il s'est intéressé à divers champs de la connaissance humaine comme l'économie, le droit, la psychologie, la philosophie ou les sciences politiques. En 1974, il a reçu le prix Nobel d'économie pour ses travaux sur la théorie de la conjoncture.

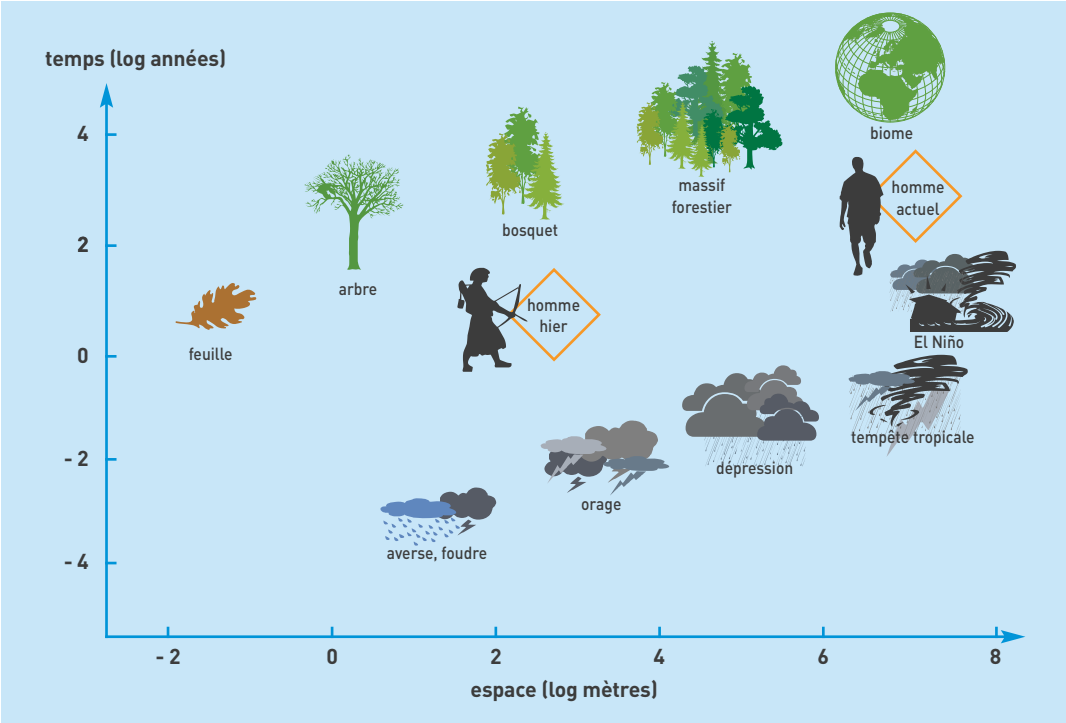


Figure 1.
Quelques échelles spatio-temporelles caractéristiques de systèmes vivants (ici : forêt) et de perturbations climatiques : les deux losanges indiquant les emprises spatiales et temporelles de l'homme préindustriel et de l'homme actuel respectivement.

tement de **systèmes complexes** avec des **modèles**, et cela pour l'économie, la biologie, la psychologie… En effet, ces systèmes font intervenir trop d'acteurs et de relations pour qu'il soit aisé de trouver une loi, c'est-à-dire une équation capable de relier un petit nombre de variables : il faut utiliser un grand nombre d'équations pour former un modèle. Ces équations, constitutives du modèle, ne peuvent évidemment pas se résoudre "à la main". L'arrivée des ordinateurs, puis des supercalculateurs actuels, a permis de calculer l'évolution temporelle de ces systèmes d'équations, sans lesquels il n'y aurait jamais eu de **climatologie** prédictive ; et il en va de même pour les **systèmes écologiques**. Cette approche "systèmes complexes" concerne maintenant l'écologie, les neurosciences, les sciences sociales, la **météorologie** et la climatologie, la chimie, l'informatique, la psychologie, la science de l'évolution, l'économie, la prédiction des tremblements de terre, l'**épidémiologie**, les systèmes de **réaction-diffusion**, la **biologie moléculaire**, la régulation du trafic…

L'homme et l'environnement

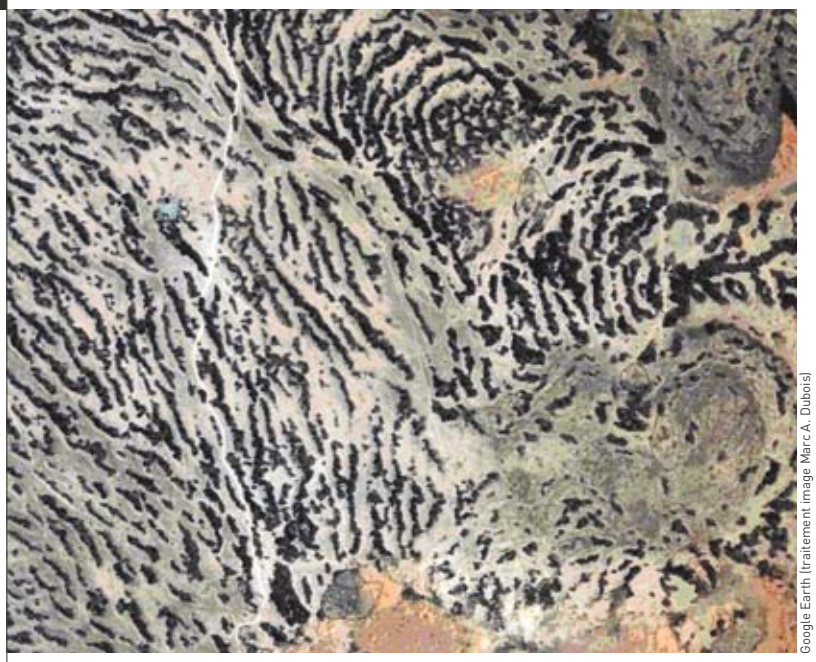
Mais alors que l'homme peut enfin commencer à étudier les **écosystèmes** et le **climat** avec les outils de la physique, l'impact de ses activités sur la planète vient lui poser, simultanément et avec vigueur (est-ce une coïncidence ?) des problèmes de survie à moyen terme. Nous ne nous trouvons donc plus dans la situation où découvrir et cataloguer suffisent puisque aujourd'hui, les espèces animales et végétales disparaissent à un rythme effroyable. Les raisons en sont l'emprise croissante de l'homme sur les écosystèmes ainsi que les changements climatiques d'origine anthropique. Le devoir des scientifiques consiste donc, non seulement à comprendre le fonctionnement des écosystèmes mais aussi – grâce à cette compréhension – à chercher à mieux les gérer (en les conservant ou en les adaptant) afin de maintenir l'équilibre d'une planète supportant de plus en plus mal l'empreinte écologique de la population humaine.

En s'inspirant du type de représentation introduit par Crawford S. Holling, en 1986 (2), on peut montrer quelques éléments écologiques et climatiques dans un diagramme temps-espace : de la feuille au **biome** et de l'averse aux changements climatiques de grande période (figure 1). Mais il faut également imaginer l'emprise de l'homme dans ce diagramme car, il y a 10 000 ans, vivaient environ 6 à 7 millions d'êtres humains contre 6 ou 7 milliards aujourd'hui, soit mille fois plus. À cette époque reculée les hommes étaient chasseurs-cueilleurs et leur action se situait au niveau de la feuille, tout au plus de l'arbre. À l'heure actuelle, les humains défrichent environ 300 km^2 de forêt tropicale chaque jour. Plus grave encore, les bouleversements apportés par l'homme au climat dépasseront, en moins de 100 ans, ce qui mettait des millénaires à se produire. Si, autrefois, la **biosphère** a pu réagir aux changements climatiques du passé grâce à l'évolution génétique, désormais, la rapidité des mutations s'avère telle que, ni les adaptations naturelles ni les migrations d'écosystèmes végétaux dans les gradients de température et d'**hygrométrie**, ne disposeront d'assez de temps pour se produire.

"Top-down" et "bottom-up"

En matière d'écologie, de nombreux exemples montrent qu'idées et modèles théoriques furent souvent élaborés avant même qu'une application soit envisagée. C'est notamment le cas avec plusieurs problèmes de **morphogenèse** pour lesquels les

(2) Holling (Crawford S.), 1986 : "The resilience of terrestrial ecosystems ; local surprise and global change", in W. C. Clark and R.E. Munn (eds.), *Sustainable Development of the Biosphere*, Cambridge University Press, Cambridge, U.K. Chap. 10 : 292-317.



Google Earth (traitement image Marc A. Dubois)

Brousse tigrée.

équations de réaction-diffusion et les automates cellulaires [3] furent utilisés pour expliquer les motifs du pelage des animaux, des coquillages ou bien encore des "brousses tigrées" au Niger et ailleurs. C'est aussi le cas des travaux sur les comportements collectifs où l'application aux vols d'étourneaux ou aux bancs de poissons s'avère postérieure aux travaux théoriques. Dans cette hypothèse, les chercheurs parlent d'une approche *top-down*, allant de l'abstrait vers le concret. Mais le plus souvent, la question se pose préalablement car il n'existe pas de théorie ni de modèle tout prêt pour y répondre : il faut cerner précisément la problématique avant de procéder au choix des outils de **modélisation**. L'approche s'opère alors *bottom-up* autrement dit du concret vers la formalisation abstraite. Bien entendu, une fois le but atteint, le physicien ayant bâti le modèle demeure en droit d'y chercher des régularités et des généralisations qui pourront rapprocher le système complexe écologique étudié de systèmes physiques plus traditionnels (voir encadré).

Bien poser une question

Le but visé ne consiste pas à chercher un modèle global des écosystèmes, les questions à résoudre étant pratiques et urgentes : comment comprendre et préserver tel type d'écosystème ? Comment sauver ce qui peut encore l'être ? Comment utiliser l'espace disponible et le vivant qui y subsiste au mieux, dans un endroit et un contexte précis ? Quand la demande a été bien définie, il faut alors rassembler des spécialistes de disciplines différentes (écologistes, botanistes, géologues, géographes, sociologues…) pour animer une discussion où seront définis les acteurs essentiels et les relations qu'ils ont entre eux. Par exemple, cette demande peut porter sur la gestion du stock piscicole dans un bassin versant où l'on construit un barrage, sur la lutte contre la désertification dans une zone aride sur-pâturée, sur la lutte contre l'érosion dans des zones déboisées, sur la définition des règles de chasse pour maintenir la ressource dans des pays où la "viande de brousse" figure parmi les éléments économiques cruciaux…
Devant ce système souvent très complexe, le modélisateur doit donc chercher, avec les autres scientifiques, à cerner les composantes essentielles et les relations qui les unissent. À ce moment seulement, le choix des outils de modélisation pourra être abordé. Mieux vaut privilégier un modèle, aussi minimaliste que possible, puis comparer ses "sorties" avec les données réelles, et seulement en cas de désaccord, rajouter des composantes au modèle. L'exploration de l'espace des paramètres du modèle va donner une compréhension du fonctionnement de l'écosystème étudié et il sera alors possible de tester des politiques de gestion pour atteindre les objectifs recherchés.

(3) Il s'agit d'une grille régulière de cellules pouvant prendre, à un moment donné, un état parmi un ensemble fini ; c'est un modèle de système dynamique discret mais aussi un modèle de calcul étudié en mathématiques et en informatique théorique.

Les modèles

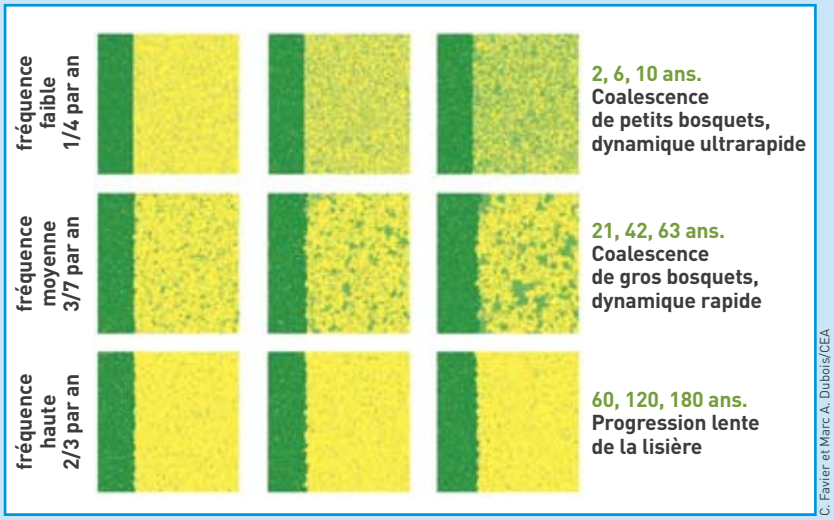
Il n'existe pas d'outil universel capable de modéliser des systèmes complexes en écologie. Seule la problématique posée conduit au choix de la méthode. Par exemple, une **analyse statistique en composantes principales** (**ACP**), prise isolément, est un modèle descriptif, qui peut suggérer des mécanismes sous-jacents. En combinant une analyse en composantes principales avec des méthodes de **régression** (linéaire ou non, simple ou multiple), on peut alors construire des modèles prédictifs opérationnels, du moins tant que le champ des paramètres s'avère bien couvert par les données acquises.
Les fourchettes larges – avec plus de trois ordres de grandeur entre les prédictions initiales "haute" et "basse" des victimes de la maladie dite de "la vache folle" – ont montré les limites de ces méthodes. Les modèles à base de réseaux de neurones artificiels sont naturellement à visée prédictive. Leur capacité de prédiction tient à l'intégration d'un nombre élevé d'observations : ils s'avèrent donc proches des méthodes statistiques traditionnelles. Néanmoins, si les performances de ces modèles dépassent généralement celles-ci, on leur reproche souvent leur côté "boîte noire", autrement dit de ne pas aider à comprendre, même si, de plus en plus, les chercheurs développent des méthodes pour "ouvrir la boîte" et en tirer des suggestions de mécanismes.
Entrent également dans les modèles prédictifs les modèles matriciels élaborés à partir de bases de données en suivi temporel. Là encore, si la base de données s'avère suffisamment complète et si les paramètres extérieurs ne sortent pas trop du champ dans lequel celle-ci a été acquise, leur fonction prédictive est utilisable. Pourtant, les chercheurs ne disposent toujours pas d'explication des phénomènes étudiés. L'approche dite "systèmes complexes" est non seulement prédictive mais également explicative. Elle vise un double objectif : comprendre le phénomène étudié et simuler un système réel en rassemblant des hypothèses sur ses mécanismes élémentaires (le verbe comprendre découlant du terme latin *cum-prehendere* qui signifie "prendre ensemble").
Le choix des outils s'opère dans une vaste panoplie. Ainsi, peut-on décrire la mécanique classique par des

La mosaïque forêt-savane

Il y a environ 6000 ans, une longue période de sécheresse dans le centre-ouest de l'Afrique ouvrait de grandes brèches dans la forêt équatoriale attirant des migrations bantoues dans ces régions où vivaient jusque-là les seules populations pygmées. Bien que cet épisode sec soit achevé depuis fort longtemps, des savanes persistent néanmoins sur de larges régions où le climat humide favoriserait nettement la forêt (voir page suivante : la mosaïque forêt-savane au Cameroun). Contrairement aux régions sub-sahéliennes plus arides et où l'on observe une transition continue entre le désert, la savane et la forêt, les zones plus humides présentent une savane arborée et une forêt claire : la transition forêt-savane est abrupte et avec une lisière bien marquée (voir ci-contre : une lisière au Congo). La persistance de cette mosaïque forêt-savane a longtemps intrigué les naturalistes. Dans un effort conjoint, le programme pluri-institutionnel Ecofit et le Groupement de recherche 489 du **CNRS**, impliquant des écologistes, des botanistes, des **paléo**-écologistes (**palynologues**, **algologues**...), des **pédologues**, des sociologues, des anthropologues et des physiciens du CEA, a permis d'avoir une vue et une compréhension globale de ce phénomène. Il a fallu pour cela un dialogue suivi entre les spécialistes des différentes disciplines pour identifier les facteurs importants, au premier rang desquels figurent la pluviométrie annuelle et la fréquence des feux naturels ou allumés par l'homme ; l'importance des sciences humaines est ici évidente. Il a aussi fallu prendre en compte les différents modes de dispersion des graines, les vents dominants, les hétérogénéités éventuelles du sol... Les deux processus essentiels sont d'abord le cycle herbe/arbres pionniers/forêt jeune/forêt mature puis les incendies de savane ; ils ont alors été implémentés sur un réseau spatialisé avec des **mailles** de 5x5 m, sorte d'"automate cellulaire" généralisé. Pour une pluviométrie donnée, différents modes de conquête de la savane par la forêt en fonction de la fréquence des feux ont été mis en évidence (figure 2). L'exploration de l'espace des paramètres a permis de comprendre l'ensemble des observations et en particulier pourquoi, en zone sèche et en l'absence de feu, on peut avoir une transition continue entre savane et forêt alors qu'en zone humide, ces phases se trouvent disjointes (figure 3). Pour traduire ces connaissances en termes de conseils de gestion du paysage dans les villages, des coopérations ont été établies entre les scientifiques et les responsables locaux. Il s'agit d'une étape cruciale pour que la recherche ne reste pas stérile, mais aussi d'une étape très délicate à mettre en place et à pérenniser. Elle nécessite notamment d'expliquer aux nomades peuls que la pratique consistant à entailler et rabattre les acacias pour faire paître leurs troupeaux aboutira à une désertification des zones qu'ils fréquentent.

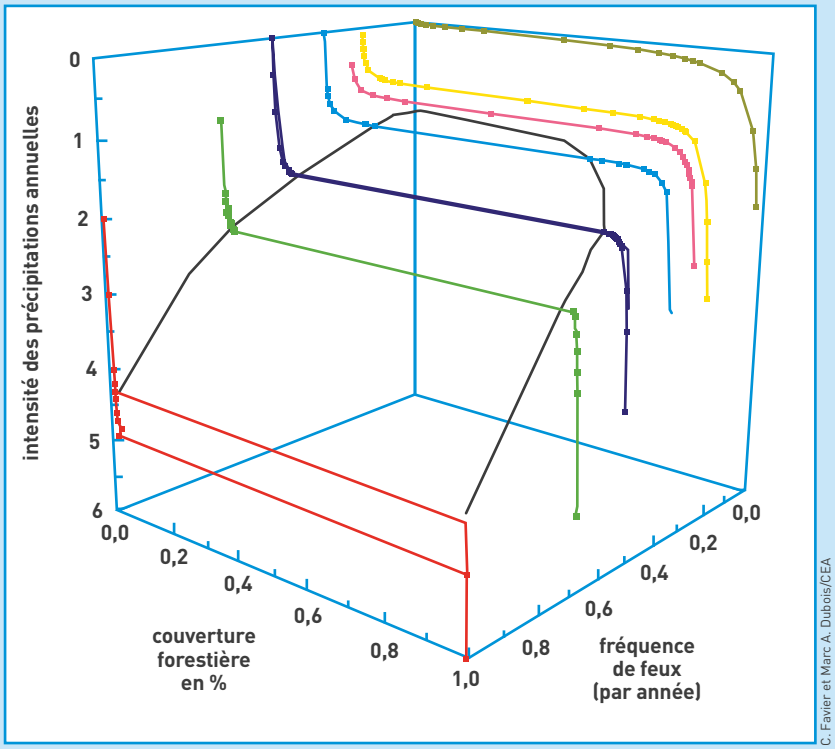
Marc A. Dubois/CEA

Une lisière au Congo.



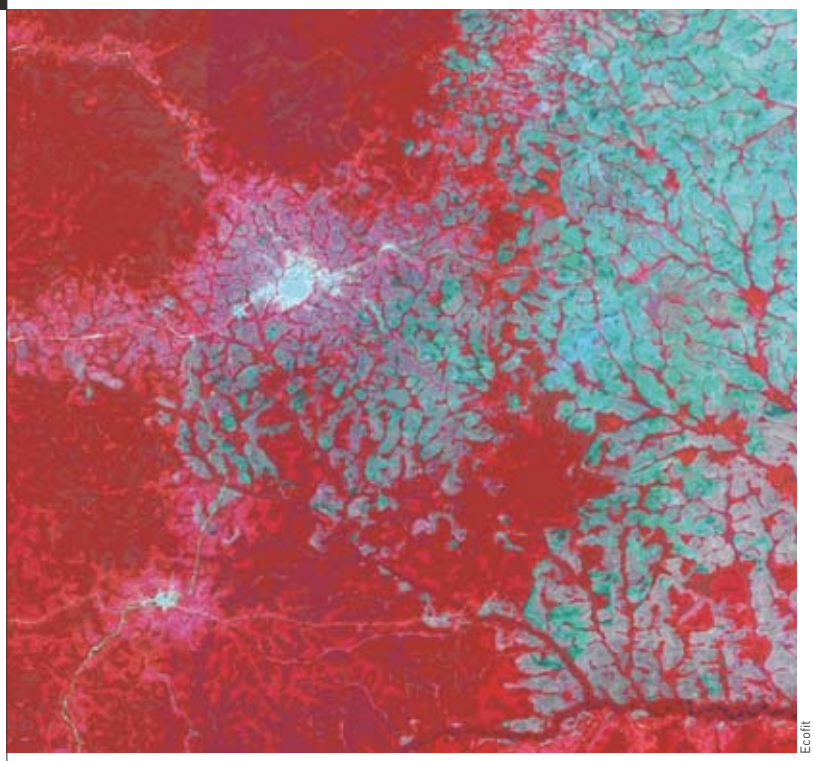
C. Favier et Marc A. Dubois/CEA

Figure 2.
Les sorties d'un **modèle**.



C. Favier et Marc A. Dubois/CEA

Figure 3.
Transition de phases.



Ecofit

La mosaïque forêt-savane au Cameroun.

équations différentielles dans un espace continu et avec des vitesses ainsi qu'un temps continu (systèmes dynamiques totalement continus). À l'opposé, il est possible de définir un système avec des variables d'état entières et un temps discret. Ces deux exemples entrent dans la catégorie des systèmes dynamiques totalement discrets (FDDS). Chacun connaît également les "automates cellulaires" (CA) dans lesquels chaque maille *M* d'un réseau, à une ou plusieurs dimensions, prend un état déterminé par l'état des mailles au voisinage de *M* au temps *t*-1, choisi parmi un nombre fini d'états (par exemple 0 ou 1), à tout instant *t* (le temps étant lui aussi discret, c'est-à-dire qu'il progresse par sauts d'égale durée).

La question pourrait alors se poser de savoir quelle est la « meilleure » méthode. Il s'agit d'une interrogation peu pertinente parce qu'il n'y a pas de réponse unique, la méthode devant s'adapter au problème posé. Ainsi, choisir la bonne méthode de **modélisation mécaniste** pour comprendre un phénomène réel nécessite, au préalable, de bien définir la ou les questions à se poser et seulement ensuite dresser la liste des données accessibles à la connaissance et à la mesure (par exemple, si un modélisateur demande, pour construire son modèle, les valeurs de milliers de paramètres inaccessibles, il ne parviendra jamais à son but). Enfin, il faut rassembler les observations suggérant des mécanismes du système étudié. Alors, et alors seulement, il devient possible d'opter pour un cadre de formalisation mathématique. Encore une fois, le processus de modélisation s'inscrit dans une démarche d'équipe et dans un cadre pluridisciplinaire. La règle à garder à l'esprit est qu'un modèle mécaniste doit être le plus simple possible : *small is beautiful* (que l'on pourrait traduire par "c'est dans les petits pots que l'on met les bons onguents !"). Compliquer un modèle ne vaut que lorsque la version minimaliste se trouve impuissante à expliquer les phénomènes observés.

Ecosystèmes, complexité et auto-organisation

Le troisième point caractéristique d'un système complexe concerne l'émergence d'une auto-organisation. Il s'agit d'un point fondamental car à la source même de la vie. En effet, l'auto-organisation intervient à toutes les échelles, depuis la cellule jusqu'à la planète, comme l'a montré James Lovelock (4) avec sa théorie *Gaïa*. Sans doute est-ce parce que nous percevons inconsciemment cette auto-organisation que tous les paysages naturels prennent, à nos yeux, une certaine forme de beauté. Et si tous les systèmes vivants montrent une grande capacité à retrouver un équilibre après une agression ou une perturbation – propriété nommée **résilience** –, c'est également grâce à ses propriétés d'auto-organisation. Mais il y a toujours une limite au-delà de laquelle la réparation devient impossible, entraînant, par exemple, la mort d'un organisme voire, à plus large échelle, d'un écosystème tout entier.

Comprendre est un but noble, mais d'autres enjeux entrent également en ligne de compte. Ainsi, il importe de conserver des zones où les écosystèmes demeureront aussi "vierges" que possible : d'abord, pour préserver la biodiversité, ensuite pour conserver des témoins d'une planète où l'homme était moins omniprésent, enfin pour chercher à utiliser, au mieux, les ressources nécessaires à la nourriture de ses habitants. Ce travail de compréhension en profondeur de la complexité d'un système écologique permet d'en discerner les propriétés d'auto-organisation et de cerner sa résilience à des perturbations. Il permet également d'apporter aux décideurs des outils d'aide à la gestion beaucoup plus performants que les outils purement prédictifs, parfois impuissants à opérer hors des régimes de fonctionnement sur lesquels ils ont été construits. Ainsi, comme a pu l'écrire Tom Stoppard dans son ouvrage *Arcadia* (traduction personnelle) : *"Cela me donne tant de joie. Être à nouveau au commencement, en ignorant presque tout. Tout le monde parlait de la fin de la Physique. Il semblait qu'à elles deux, la relativité et la mécanique quantique allaient tout résoudre. Une Théorie du Tout. Mais elles n'expliquaient que le très grand et le tout petit. Le cosmos, les particules élémentaires. Les choses à notre échelle, celles sur lesquelles on écrit des poèmes – les nuages, les jonquilles, les cascades… tout ça, c'est encore pour nous aussi plein de mystère que les Cieux l'étaient pour les Grecs."*

(4) Lovelock (James), spécialiste des sciences de l'atmosphère, il est l'auteur de l'hypothèse dite Gaïa (du nom de la déesse grecque primordiale représentant la Terre-Mère) annoncée par les travaux de Johannes Kepler, selon laquelle l'ensemble des êtres vivants évoluant sur terre constitueraient un vaste organisme autorégulant ses divers éléments de manière à favoriser les meilleures conditions de vie.

> Marc A. Dubois
Institut de rayonnement de la matière (Iramis)
Direction des sciences de la matière
CEA Centre de Saclay (Orme des Merisiers)