

Synthèse du thème 1

La représentation des systèmes complexes et de leurs transformations

Laurent PIET

MAP

Olivier MONGA

IRD

La notion de développement durable est apparue avec la volonté des décideurs publics de prendre en compte le long terme dans les stratégies publiques de développement. G.H. Brundtland (1987) le définit comme suit : « le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre à leurs propres besoins ». Deux concepts sont inhérents à cette notion : le concept de « besoin » et plus particulièrement des besoins essentiels des plus démunis, à qui il convient d'accorder la plus grande priorité, et l'idée des limitations que l'état de nos techniques et de notre organisation sociale imposent sur la capacité de l'environnement à répondre aux besoins actuels et futurs.

Ainsi, le développement durable c'est notamment :

- la prise en compte du temps long, avec l'idée sous-jacente que les conséquences des décisions actuelles ne sont pas nécessairement réversibles ; on est bien dans le domaine de la décision, en particulier de la décision publique ;
- l'espace élargi, ce qui implique de prendre en compte les interactions locales et à distance, et dans ce domaine on a besoin d'outils et de méthodes ;
- la mise en œuvre de projets collectifs, avec des trajectoires qu'il faut accompagner ;
- la prise en compte des capacités en termes d'éducation, de santé, de sécurité alimentaire, d'accès à l'eau potable, de préservation des ressources naturelles, etc.

Ces enjeux renvoient de près ou de loin à des questions de méthodes, d'outils et de décision publique. Leur spécificité est liée à la nature plurielle des facteurs et des modèles à prendre en compte : jeux des acteurs sociaux et économiques, processus naturels physiques et biologiques...

Cette diversité des éléments à prendre en compte sur des échelles de temps long constitue le trait caractéristique des questions méthodologiques et scientifiques posées par le développement durable.

Différentes formes de représentation des systèmes complexes

Un système complexe est un objet qui change de nature quand on ôte une de ses composantes :

- les règles de sa construction sont hétérogènes ;
- il possède l'identité de son mélange ;
- sa compréhension convoque plusieurs disciplines et les force à coopérer dans des activités de conception et de conceptualisation : théorie/expérience/modélisation.

Sa caractéristique est que l'analyse et la modélisation de son fonctionnement ne relèvent d'aucune discipline scientifique traditionnelle, ni des sciences dures, ni des sciences douces. Sa représentation « naturelle » est plus basée sur le discours que sur un formalisme scientifique bien défini. L'objectif du domaine naissant « Sciences de la complexité » est de proposer des formalismes et des outils scientifiques afin d'analyser, de modéliser et de simuler ces systèmes complexes.

Les difficultés de la représentation des systèmes complexes sont les suivantes :

- ils connaissent un grand nombre d'entités différenciées et inter-agissantes : interactions non linéaires, boucles de rétroaction, mémoire des interactions passées, etc. ;
- émergence au niveau global de propriétés nouvelles non observables au niveau des entités constitutives ;

- en SHS les agents modélisent eux-mêmes le système dans lequel ils sont inclus : une épistémologie à trois dimensions (le vrai, le faux, le possible) ;
- la notion de problème difficile « inverse » (Bourgine, 2005) : étant donné un corpus phénoménologique, quelles modélisations des entités et des interactions sont compatibles avec ce corpus ? Parmi les modélisations compatibles, quelles sont les plus « simples » ?

Les approches théoriques récentes sont :

- automates reproducteurs de Von Neumann ;
- réseaux de neurones formels (McCullochs & Pitt) ;
- mathématiques de la morphogenèse (R. Thom) ;
- thermodynamique des systèmes hors équilibre (I. Prigogine) ;
- synergie (Haken) ;
- mécanique statistique (Anderson & Wilson) ;
- théorie de la viabilité (Aubin) ;
- réseaux macromoléculaires de la cellule (F. Jacob) ;
- paysages épigénétiques (Waddington) ;
- économie évolutionniste (Schumpeter) ;
- économie cognitive et sciences de la conception (Hayek, H. Simon).

Les catégories des modèles sont :

- les modèles dialectiques ou analogiques : ils représentent un sujet par la description de sa structure ou de son comportement dans un langage mathématique (équations différentielles, modèles logistiques, matriciels, à compartiments avec flux et échanges, probabilistes, etc.), informatique (orientés objets, centrés objets, à agents, multi-agents, etc.) ;
- les modèles physiques ou à opérateurs : ils représentent un sujet par un système structuré d'êtres et de phénomènes physiques (pendule, souris, rat, mini-cochon, drosophile, *Arabidopsis*, *E. coli*, etc.).

La notion d'indicateur est importante pour la représentation des systèmes complexes et peut par exemple se définir comme suit :

- « un paramètre ou une valeur dérivée de plusieurs paramètres donnant des informations sur un phénomène. Sa signification va au-delà de celle directement liée à la valeur du paramètre » (OCDE) ;
- « une information finalisée ou instrumentale servant à caractériser une situation évolutive, une action, les conséquences et résultats d'une action, pour les évaluer et les comparer à leur état, à d'autres dates,

passées ou projetées, ou aux états à la même date d'autres sujets similaires » (Plan Bleu en Méditerranée).

Un indicateur se caractérise donc comme :

- outil de communication : quantifier et simplifier l'information à l'intention d'un auditoire ciblé ;
- outil de suivi, évaluation, prévision, aide à la décision ;
- outil de comparaison ;
- nécessité de référence à un (des) objectif(s) préalablement fixé(s) ;
- instrument de mesure d'un critère.

Un système d'indicateur peut se définir comme une grille :

- suffisamment large pour pouvoir être utilisée par des utilisateurs différents ;
- séparant les données et leur interprétation en ne préjugant pas des différentes conceptions du développement durable ;
- pragmatique, orientée vers l'action et l'aide à la décision : des normes et des principes d'action ;
- aidant à rassembler des présomptions multiples en laissant la place à la diversité des interprétations et à la controverse.

Ainsi, la recherche est engagée dans une position normative pour modéliser les relations entre les processus économiques et les transformations de l'environnement planétaire et des ressources qu'il abrite. Ces relations sont médiatisées d'un côté par la technologie, qui fait le passage entre le monde social et le monde physique et de l'autre côté par la préoccupation pour l'équité sociale, dont la donne est en partie modifiée par l'émergence de la question environnementale et des nouvelles raretés qu'elle exprime ou qu'elle demande d'instituer.

Les modèles mis en jeu étant de natures différentes tant du point de vue de leur conception que des données qu'ils manipulent, leur couplage reste une question ouverte. Les approches de couplage existantes se situent le plus souvent entre une juxtaposition (la sortie d'un modèle étant l'entrée d'un autre modèle) et une co-construction (intégration de modèles de nature différente). Le deuxième type d'approche est bien entendu le plus délicat.

Les données constituent aussi un point difficile car souvent incomplètes pour mettre en œuvre les modèles. Se pose alors le délicat problème de l'assimilation des données, c'est-à-dire la définition de la meilleure correspondance entre un ensemble de données incomplètes et un (des) modèle(s). Cette question commence à être résolue pour

certains cas particuliers, par exemple en météorologie (voir les travaux de F.X. Le Dimet) et en océanographie. Ainsi, dans le cas du développement durable, la question des données est plus complexe que dans d'autres domaines, car elle peut difficilement être abordée (comme dans les sciences physiques par exemple) sans prendre en compte les modèles qui les utiliseront.

Ainsi, les formes de représentation des systèmes complexes doivent intégrer des phénomènes physiques et biologiques, des données sociales et économiques, une échelle de temps longue. Les aspects d'introspection des organisations sociales et des comportements humains et de réponse de structures humaines organisées à des phénomènes naturels de ces systèmes font que ces formes de représentation sont par nature plus complexes que celles utilisées dans les disciplines plus classiques. En particulier, on ressent bien la nécessité de mettre ensemble des outils mathématiques, algorithmiques et informatiques afin d'obtenir des formes de représentations suffisamment complètes. En effet, le développement durable ne peut malheureusement pas se mettre simplement en équations et ce n'est pas uniquement un problème de « variables cachées » !

I Des échelles et des interactions

Le choix d'un des types de représentation évoqués ci-dessus s'accompagne de celui de l'échelle à laquelle cette représentation doit être mise en œuvre. En réalité, ce sont quatre types d'échelles qu'il s'agit de déterminer.

Les deux premières, relativement naturelles et spontanément citées, permettent de circonscrire le système représenté, d'en définir les limites :

- l'**échelle géographique** tout d'abord : articulant déterminisme naturel et projet social comme on l'a rappelé en introduction, les enjeux du développement durable s'inscrivent à chacun des différents échelons de gouvernance humaine, du local au global ;
- l'**échelle temporelle** ensuite : implicite dans les termes mêmes de « développement » et de « durabilité », le temps intervient à la fois par le caractère dynamique des processus en jeu et dans la référence aux générations futures dont on cherche à préserver les capacités, avec, là aussi, plusieurs niveaux possibles, du court aux moyen et long termes.

Les deux autres, moins souvent mentionnées ou énoncées de façon explicite, sont pourtant d'une importance capitale pour définir les propres limites de la représentation, c'est-à-dire la qualité et la performance de celle-ci :

- l'**échelle des grandeurs caractéristiques** : quel que soit le binôme (échelle spatiale x échelle temporelle) retenu pour définir le système étudié, les processus que l'on cherche à représenter possèdent leurs propres extensions dans l'espace et dans le temps, qui ne s'accordent ni forcément ni totalement avec celles du système ;
- l'**échelle de la résolution de la représentation** enfin : le processus de simplification de la réalité que constitue la représentation conduit à choisir des mailles d'approximation non seulement, là aussi, dans l'espace et dans le temps (unité géographique, pas de temps) mais également dans les « objets élémentaires » représentés (que ceux-ci soient des ruisseaux, des exploitations agricoles, les individus d'une espèce, etc.).

Si la cohérence de ces quatre dimensions est bien entendu primordiale et devrait être systématiquement recherchée dans toute représentation, se pose plus fondamentalement le problème de l'articulation des différents niveaux de chaque échelle, du passage de l'un à l'autre. Toute la problématique du *changement d'échelle* devrait en effet permettre de faire émerger, à un niveau d'agrégation donné, une échelle donnée, les propriétés d'un système à partir de la représentation des « sous-systèmes » et « sous-processus » qui le constituent au niveau immédiatement inférieur, propriétés du système justement non observables à ce niveau inférieur. Plus que la représentation du temps court, du temps long, du local ou du global, se pose donc le problème du *passage* du temps court au temps long, du local au global.

Or, en raison même des interdépendances en présence (entre processus naturels et/ou acteurs des projets socio-politiques sous-jacents), les systèmes complexes que l'on cherche en effet à « mettre sous contrôle » (au sens de la recherche opérationnelle, du contrôle optimal) dans une perspective de développement durable, ne sont pas des objets fractals, dont les propriétés seraient homothétiques les unes par rapport aux autres entre les différents niveaux d'observation possibles. Comme on le sait bien en approche systémique, « le tout a plus de propriétés que la somme de ses parties », et, en présence d'acteurs aux projets sociopolitiques différents, « les variables à expliquer des uns sont les variables explicatives des autres ».

C'est donc à la représentation des interactions entre unités (actions et rétroactions, linéarités et non-linéarités, interactions immédiates et différées, plus ou moins grande dépendance des décisions individuelles entre elles, etc.) que doit avant tout s'attacher l'approche par les systèmes complexes. Alors que la mobilisation du récit pour la représentation de tels systèmes, notamment dans la démarche prospective, exploite la vertu « naturelle » du langage pour explorer la complexité, nos modèles (mathématiques, informatiques), aussi compliqués et performants soient-ils aujourd'hui, sont-ils en mesure de générer, si ce n'est de reproduire, la complexité des systèmes qu'ils tentent de représenter ?

Événements rares, extrêmes et ruptures

Si le souci d'un développement durable vise à ne pas compromettre les capacités des générations futures à réaliser leurs besoins, alors l'enjeu de la décision publique consiste en un pilotage du système au sein du cylindre (ou est-ce un cône ?) des trajectoires viables, c'est-à-dire celles qui n'hypothèquent pas ces potentialités.

Au-delà du fonctionnement « normal » du système, ce sont donc les événements rares, extrêmes, ceux susceptibles d'engendrer des ruptures et donc des irréversibilités, qu'il s'agit de prévoir ou plutôt dont il s'agit de comprendre les conditions de survenance afin de les prévenir. Mais pas forcément pour systématiquement les éviter car certaines bifurcations peuvent s'avérer nécessaires et doivent donc être acceptées en connaissance de cause.

Mais alors, comment représenter ces événements extrêmes dans nos modèles ? Le modélisateur doit-il explicitement s'attaquer à leur représentation propre, au risque de moins bien représenter le fonctionnement « normal » du système ? Sont-ils le fruit de processus chaotiques ou bien de combinaisons aléatoires et/ou cumulatives particulièrement défavorables ? Autrement dit, doivent-ils naître « spontanément » de combinaisons particulières des processus et interactions modélisés, ou bien survenir à la faveur d'une analyse stochastique de sensibilité vis-à-vis des paramètres utilisés ?

On peut alors s'interroger si la modélisation est encore l'outil adapté quand ces événements rares et ces ruptures lui font frôler les limites du domaine de validité des modèles qu'elle vise à mettre au point. Les autres formes de représentation, et en particulier les approches discursives et prospectives, permettent sans doute d'explorer plus systématiquement, même si c'est de façon certes plus qualitative, l'ensemble du

champ des possibles. À cet égard, une évolution, si ce n'est un renouvellement, des méthodes et de l'enseignement de la prospective, déjà en cours dans le monde anglo-saxon mais encore peu en France, semble souhaitable.

Face à cette problématique de la gestion des risques et du principe de précaution, les gestionnaires sont bien souvent démunis et manquent d'outils opérationnels de pilotage. Une meilleure articulation entre évaluateurs et gestionnaires du risque apparaît nécessaire, et la recherche semble l'un des médiateurs possibles.

Nouveau paradigme ou évolution naturelle de la recherche ?

Les systèmes complexes le sont... « depuis toujours » ! Dès lors, pourquoi l'émergence de leur analyse en tant que tels, par une approche systémique et non plus seulement analytique, est-elle finalement relativement récente ? S'agit-il d'un nouveau paradigme de la pensée scientifique ou seulement d'une étape « naturelle » de son évolution ?

D'un certain point de vue, la simplification inhérente à la démarche analytique ne peut être réduite à une idéologie : on ne peut douter que les scientifiques des siècles passés avaient conscience de la complexité des systèmes auxquels ils faisaient face mais pas toujours les « moyens » de l'aborder en tant que telle ; en outre, il leur fallait comprendre les « propriétés des parties du tout » elles-mêmes avant de s'attaquer à celles du système lui-même. Les moyens dont on dispose aujourd'hui, à la fois en termes de connaissances accumulées sur les processus élémentaires et d'outils de formalisation et de modélisation (mathématiques, informatique...) permettent (enfin, serait-on tenté de dire) d'aborder l'étude des systèmes sous l'angle de la complexité. En ce sens, on n'assisterait qu'à une étape dénotant une plus grande maturité de la recherche (à ceci près que les chercheurs contemporains doivent garder à l'esprit le caractère hautement simplificateur de leurs outils, aussi sophistiqués soient-ils devenus, en regard de l'étendue de la complexité des systèmes réels), processus retracé par l'évolution de l'enseignement des sciences de l'ingénieur lui-même : loin de la vision mécaniste dominante d'il y a 25 ans, la prise en compte croissante de l'incertain et de l'aléatoire, puis de la multiplicité des points de vue et du fait sociologique, a naturellement conduit à l'intégration de la complexité dans le contenu des enseignements, l'innovation pédagogique nécessaire à l'adaptation de

ceux-ci posant d'ailleurs aujourd'hui encore des problèmes non totalement résolus.

D'un autre côté, on peut penser que c'est bien sous la pression croissante des questions qui leur sont posées par la décision publique, complexe par essence, que les scientifiques ont été amenés à faire entrer à part entière la complexité dans le champ de leurs travaux. Alors que certains acteurs restent très « unidimensionnels » dans les intérêts qu'ils représentent ou défendent, l'action publique se trouve, elle, au cœur de l'articulation des points de vue et doit en faire la synthèse afin de faire émerger un projet politique négocié ; face à la difficulté de cette médiation lorsque l'enjeu en est le développement durable, les décideurs se tournent ainsi de plus en plus vers la communauté scientifique, espérant que celle-ci leur apportera les éléments « objectifs » permettant d'asseoir des décisions partagées. Il est en ce sens symptomatique que la modélisation des systèmes complexes soit surtout prise en main par la recherche finalisée et finalement peu par la recherche académique (qui excelle dans le domaine de la compréhension des processus).

Le développement durable pose ainsi des questions importantes pour la société mais difficiles pour la science. En effet, la diversité des données et aussi la spécification, souvent définie par le discours et donc imprécise au sens scientifique, du type de réponses attendues (en ce sens que la décision publique pose le plus souvent des questions *à la* recherche et non des questions *de* recherche), en font pour le moment un concept oscillant entre science et paradigme. Néanmoins, il est clair que la mise au point de systèmes de formalisation qui permettront une approche plus normative et formalisée, et donc plus scientifique, du développement durable est un enjeu important pour la société. Sa prise en compte appelant à « suspendre les discontinuités entre disciplines », permettra-t-elle de faire émerger une « vraie » *interdisciplinarité* (en lieu et place de la seule *pluridisciplinarité*) ou conduira-t-elle jusqu'à ériger la modélisation des systèmes complexes, à l'image de la médecine pour la biologie humaine, en une nouvelle « méta-discipline » à part entière ?

Recommandations à la recherche

À la lumière des exposés et des débats, il semble que la recherche devrait en priorité travailler sur les questions suivantes :

- la détermination de la ou des échelles pertinentes, qu'elles soient spatiales ou temporelles, pour traiter de telle ou telle question de

- développement durable, ainsi que l'articulation entre ces échelles (en particulier entre local et global, entre dynamiques lentes et rapides) ;
- le couplage des modèles entre eux et des modèles avec les autres formes de représentations (indicateurs, récit, prospective) ; c'est sans doute de ces « assemblages » que naîtra une meilleure représentation (explicite ou implicite ?) des interactions entre processus, acteurs et projets ;
 - la nécessité d'approfondir et d'encourager le rapprochement entre modèles « physiques » (des processus : économiques, hydrologiques...) et « individus centrés » (de comportement des agents), dans une démarche de construction de véritables plans d'expérience ;
 - l'exploration de l'ensemble du « champ des possibles », en particulier des événements rares et extrêmes, et non seulement du fonctionnement « normal » du système représenté, afin de fournir aux acteurs de l'action publique les clefs des alternatives possibles, des bifurcations nécessaires à la réalisation de certaines trajectoires ;
 - les données empiriques nécessaires à la représentation des enjeux du développement durable : quelles sont-elles, comment les recueillir, quel statut doivent-elles avoir (public/privé ?), quelles coopérations mettre en place, comment mieux les coordonner avec les modèles, comment les valoriser plus efficacement (inférence, « assimilation ») ?

Mais plus largement, il apparaît aux rapporteurs que l'objectif de la recherche pourrait être de définir des questions scientifiques précises liées au développement durable et d'essayer d'y répondre par une démarche scientifique alliant les modèles mathématiques et les modèles algorithmiques/informatiques. En effet, au risque d'un retour vers un certain naturalisme, une « théorie du développement durable », encore en fabrication, semble nécessaire, qui permettrait une segmentation des questions du développement durable pour obtenir au moins un début d'approche réellement scientifique de ces questions. Or, toute méthodologie scientifique commence par la définition de questions scientifiques précises sans doute moins enthousiasmantes et plus réductrices que les envolées du discours. Beaucoup de domaines scientifiques liés à l'introspection humaine (vision par ordinateur, reconnaissance de la parole, traduction automatique, robotique...) se sont développés de cette manière là, en partant d'une problématique anthropomorphique à base de discours pour aboutir à la formulation de questions scientifiques précises.



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DES AFFAIRES
ÉTRANGÈRES

MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE
ET DE LA PÊCHE

MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE
ET DU DÉVELOPPEMENT
DURABLE

MINISTÈRE DÉLÉGUÉ À
L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET À LA RECHERCHE

Cemagref
Cirad
Ifremer
Inra
IRD
MNHN

Écosystèmes et sociétés

*Concevoir une recherche pour
un développement durable*

sous la direction de
Jacques LOYAT

Écosystèmes et sociétés

Concevoir une recherche pour un développement durable

sous la direction de
Jacques LOYAT

MAE MAP MEDD MESR
Cemagref Cirad Ifremer Inra IRD MNHN

Je voudrais remercier tous ceux, très nombreux, qui ont contribué aux travaux des séminaires, notamment les membres du comité de rédaction qui ont apporté, durablement, un appui scientifique de haut niveau.

J'adresse un remerciement tout particulier à Michel Thibier, alors directeur général de l'Enseignement et de la Recherche, pour avoir soutenu et suivi de près, du début à la fin, cette initiative.

Jacques LOYAT

Comité de rédaction

Catherine AUBERTIN, IRD

Jacques DENIS, Ifremer

Denis DESPREAUX, MESR/DRIC

Vincent GRAFFIN, MNHN

Michel GRIFFON, Cirad

Bernard HUBERT, Inra

Jacques LOYAT, MAP/DGER

Daniel ROCCHI, MAP/DGER

Danielle SCHIRMANN-DUCLOS, MESR/HFDD

Daniel TERRASSON, Cemagref

ISBN : 978-2-7099-1627-1

© Cemagref, Cirad, Ifremer, Inra, IRD, MNHN, Paris, 2007