



Ce document contient la transcription textuelle d'une vidéo du MOOC UVED « Ingénierie écologique ». Ce n'est donc pas un cours écrit au sens propre du terme ; le choix des mots, l'articulation des idées et l'absence de chapitrage sont propres aux interventions orales des auteurs.

La modélisation comme outil d'intégration des processus écologiques

Jacques Gignoux

Directeur de recherche, CNRS

Quand on travaille sur des systèmes complexes, comme par exemple les écosystèmes, ici vous avez une photo d'une savane avec de nombreuses plantes et des animaux en interaction, on est souvent amenés à coupler des processus physiques et biologiques différents.

Par exemple, ici on va s'intéresser à la dynamique des populations, on va s'intéresser à la photosynthèse des plantes, on peut aussi s'intéresser à la fertilité du sol et donc à la décomposition de la matière organique du sol par les microbes ou à l'érosion du sol par les pluies. Pour coupler tous ces processus, on utilise la modélisation intégrée dont je vais vous décrire un petit peu le fonctionnement par la suite.

Alors qu'est-ce qu'un modèle pour commencer ? Ici, vous avez un exemple d'un système complexe qui est la ville de Grenoble prise en photo. Comment réaliser un modèle de cette ville ? On va commencer par exemple par faire une maquette. Là, c'est le modèle utilisé dans son sens premier, dans le sens du modélisme. On construit un modèle réduit de la ville sur lequel on va pouvoir conduire des expériences, par exemple ici on peut mettre des armées autour de la ville pour voir comment l'attaquer ou comment la défendre, et puis on peut aussi faire couler de l'eau sur la maquette pour voir comment se font les écoulements d'eau. On

peut encore simplifier le modèle en en faisant un plan. Là, on a un plan de la ville de Grenoble qui est pratique pour se retrouver dans la ville alors qu'on ne la connaît pas dans le détail.

Pour aller un peu plus loin, à quoi ça va servir de faire des modèles de ce type-là ? Qu'est-ce qu'on peut faire avec un plan de la ville ? On peut par exemple essayer de comprendre des phénomènes dynamiques qui sont assez compliqués. Par exemple, vous savez que Grenoble est coincée entre différentes montagnes avec seulement trois vallées comme voies d'accès, donc c'est une ville qui est soumise à des embouteillages fréquents. Des gens se sont posé la question d'essayer de comprendre comment se formaient ces embouteillages et si on pouvait les éviter ou améliorer la circulation dans la ville. Pour faire ça, ils ont construit un modèle mathématique basé sur une analogie avec la mécanique des fluides, ça permet de prédire le moment où il va y avoir congestion du trafic routier.

Une autre utilisation possible des modèles, c'est quand on doit travailler sur des phénomènes naturels qui sont trop grands pour qu'on puisse faire des expériences. Par exemple ici, vous avez un modèle de déformation tectonique. La déformation tectonique, c'est ce qui explique la formation des montagnes. Évidemment, on ne peut pas fabriquer des montagnes dans la réalité, donc on va travailler sur, à nouveau, des modèles réduits, on va fabriquer des couches de sol avec des petites billes aux propriétés bien choisies et on va appliquer une pression qui va les déformer. On va ensuite en déduire des choses sur la façon dont se forment les montagnes.

Une troisième utilisation possible des modèles, c'est quand on doit reproduire des dynamiques naturelles qui sont trop longues pour pouvoir à nouveau expérimenter dessus. Par exemple, si on travaille sur la dynamique d'une forêt, la dynamique d'une forêt ça va être ce qui se passe sur le long terme, quand on suit une forêt, on ne peut pas le faire de façon expérimentale puisque vous savez très bien que la durée de vie d'un arbre en moyenne, c'est beaucoup plus long que la durée de vie d'un chercheur ou d'un ingénieur forestier. Pour travailler sur une forêt, on va construire un modèle de la forêt sur ordinateur qui va permettre d'accélérer considérablement la façon dont se passent les choses dans la nature, donc d'expérimenter sur le long terme sur la forêt.

Enfin, le dernier cas d'utilisation des modèles, c'est quand on a affaire à un objet qui est unique, donc sur lequel on ne peut pas faire d'expérience puisque les expériences quelquefois, ça rate, ça ne fonctionne pas comme prévu et à ce moment-là, quand on a un objet unique, on ne peut pas forcément se permettre de risquer de le perdre à cause d'une expérience ratée. L'exemple type, c'est la modélisation du climat. On a qu'un seul globe terrestre, on ne peut pas se permettre de faire des expériences dessus qui mettraient en danger la survie tout le monde, donc on va faire des expériences par modélisation sur ordinateur. On va reproduire le globe, on va reproduire le fonctionnement de l'atmosphère et on va essayer d'en déduire des choses sur notre action sur l'environnement.

Alors en pratique, comment on fait pour construire ces différents modèles pour ces différents usages ? Alors, la démarche expérimentale classique, ça consiste à délimiter un système approprié pour répondre à une question. Ça, c'est toujours le point de départ, on a toujours une question scientifique initiale qui permet ensuite de délimiter un système. Ensuite, ce système une fois délimité, on va faire une expérience, c'est-à-dire on va agir dessus et on va observer les effets de cette action et de ce lien causal entre action et effet, on va en déduire des choses sur le fonctionnement du système, sur sa mécanique interne, etc. Alors là, nous avons vu différents cas où on ne pouvait pas expérimenter directement sur le système, donc ce sont les cas pour lesquels la modélisation s'applique.

En modélisation, qu'est-ce qu'on fait ? On va travailler dans un monde virtuel, on va construire un système virtuel qui va jouer le même rôle que le système réel dans l'expérimentation et on va avoir des actions virtuelles sur le système, on va observer les effets et on va en déduire des choses sur la façon dont se comporte le système réel. Évidemment, vous voyez bien que le point faible de cette démarche, c'est que tout repose sur l'analogie entre le système réel et le système virtuel. C'est pour ça qu'elle est mise entre guillemets, cette analogie, c'est que, c'est le point faible. Pourquoi c'est le point faible ? Notamment parce que ça veut dire qu'il n'y a pas de méthode. L'analogie, c'est quelque chose de très flou. Il n'y a pas de méthode bien définie pour construire un système virtuel à partir d'un système réel. Très souvent, en fait, on s'aperçoit que ça dépend de la question initialement posée.

S'il n'y a pas de méthode, il y a quand même différents outils, donc on peut classer les modèles de différentes façons. Là, j'ai choisi une classification qui se base sur une mathématisation de plus en plus poussée des choses. Le modèle le plus simple, c'est ce qu'on appelle modèle analogique, donc c'est la maquette, c'est la maquette de Grenoble, c'est le modèle de déformation tectonique où on remplace les roches par des couches de sable ou de petites billes. Ensuite, on a le modèle graphique qui va être un modèle qui décrit graphiquement à l'aide de boîtes et de flèches les interactions qu'on suppose à l'œuvre dans le système qu'on étudie. Ensuite, on a des modèles mathématiques qui vont traduire souvent un modèle graphique en équation qu'on va essayer de résoudre. Enfin, on a le modèle numérique qui est un sous-produit du modèle mathématique, c'est-à-dire que quand le modèle mathématique devient trop gros, on n'arrive plus à le traiter avec des outils mathématiques, donc on doit passer au calcul numérique sur ordinateur.

En écologie, on fabrique énormément de modèles, c'est une des disciplines qui en fabriquent le plus pour une raison simple qui est que l'écologie couple différentes approches venant de différentes autres disciplines. Typiquement, par exemple, en écologie on va s'intéresser à la physique des écosystèmes, mais aussi à la chimie et aussi à la biologie des êtres vivants qui le constituent. Déjà, rien que faire ce couplage entre physique, chimie et biologie, ça signifie faire appel à des approches qui sont très différentes, qui ne sont pas du tout les mêmes dans ces différentes disciplines. Le deuxième point pour lequel on va utiliser des modèles en écologie, c'est qu'on travaille sur des échelles de taille très différente, on va du gène jusqu'au globe. On

travaille aussi sur des échelles de temps très différentes, de la minute par exemple pour les processus de photosynthèse, jusqu'au millénaire pour les processus d'évolution sur des dynamiques de populations un peu lentes. Enfin, on est très souvent sur des systèmes uniques, c'est-à-dire que dès qu'on s'intéresse à un écosystème particulier pour résoudre une question d'environnement, par exemple on veut savoir quelle va être l'évolution de tel massif forestier ou alors comment faire pour revégétaliser telle friche industrielle, là, on est face à un système qui va être toujours unique, on n'aura jamais deux fois la même friche industrielle. Dans ces cas-là, on a besoin d'une réponse qui est adaptée localement au problème posé.

Un des outils qui permet de réaliser le couplage entre toutes ces différentes approches, c'est ce qu'on appelle les simulateurs d'écosystèmes. Un simulateur, c'est un gros logiciel informatique qui va permettre de coupler différentes approches, donc des approches spatialisées, des approches en réseaux, par exemple les réseaux trophiques pour les écosystèmes, c'est-à-dire les réseaux alimentaires; les modèles qu'on appelle à compartiments ou à flux où on va s'intéresser par exemple aux flux de carbone ou aux flux d'azote à l'intérieur d'un écosystème; et des modèles de dynamiques de population où on va voir ce qu'il se passe quand des populations grandissent, diminuent, sont en compétition ou en interaction. Un exemple de telle plate-forme, c'est la plate-forme de simulation GAMA qui est disponible librement sur internet et qui permet de simuler dans un cadre de systèmes d'informations géographiques des dynamiques complexes, faisant interagir des agents ou des individus.

Alors, il existe des outils qui sont très intéressants, qui sont très puissants pour faire de la modélisation, mais ce qu'il ne faut pas perdre de vue, c'est que ça ne dispense pas de réfléchir avant de se lancer. La modélisation a réponse à tout, à condition que la question soit bien posée, donc le point de départ initial de toute modélisation, c'est toujours à quelle question on veut répondre.