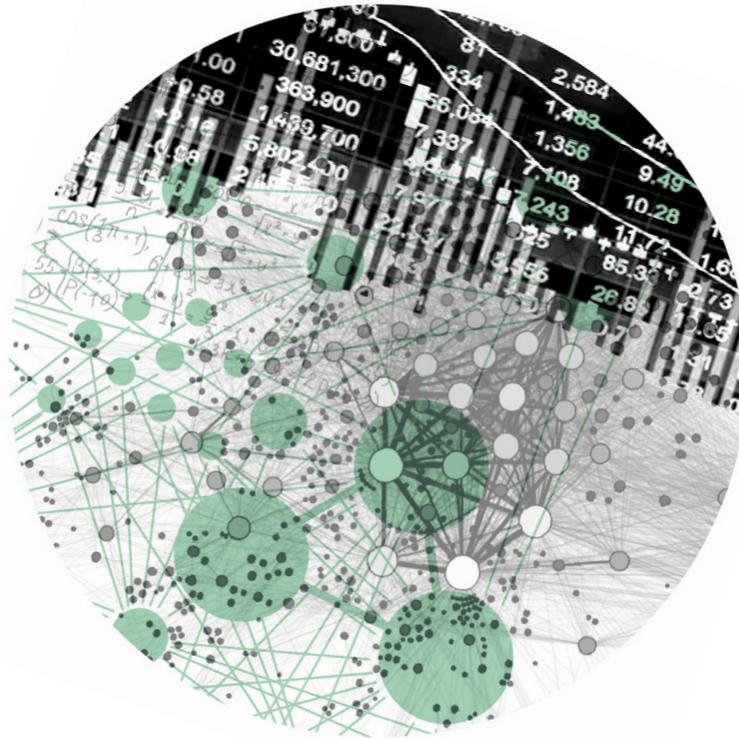


Mémoire

MSc Nature Inspired Design

ENSCI - les Ateliers_ 2022

Eliska Stepankova



Modèle / Nature : Quels possibles ?

Sous la direction de Benjamin Thiria
enseignant chercheur au laboratoire de physique
et mécanique des milieux hétérogènes.

« Nous ne raisonnons que sur des modèles. »

« Nous ne communiquons que par des modèles.»

Paul Valéry

REMERCIEMENTS

Ce dernier projet du Master n'aurait jamais vu le jour sans l'élan et la confiance que m'ont offert Simon et de Guilian, sans l'orientation initiale d'Adrien, ni le soutien de l'équipe pédagogique.

Il aura fallu les conseils de Benjamin pour maintenir le cap tout en aiguisant la controverse, la remise en doute des convictions.

Je tiens à remercier particulièrement toutes les fantastiques personnes rencontrées lors des interviews pour leur générosité, leur temps et la transmission de leurs connaissances et de leur passion. A leur côté dans leur laboratoire, lors d'échanges vidéo ou par téléphone, vous avez nourri ma recherche et apporté la joie de nouvelles perspectives.

Merci à Michelin de m'avoir accompagné dans cette aventure pendant ces 18 mois. Les encouragements de Cédric, Mickael et Matthieu ainsi que leur compréhension du rythme de l'alternance auront été une aide sans faille. Lise, Antoine, merci pour vos riches échanges autour des modèles.

Je ne peux pas oublier, mes compagnons de route, qui à coup de bons mots et d'apéros, auront su cristalliser nos forces pour nous permettre d'avancer ensemble.

En dernier les plus proches, la famille et les amis, Camille et Jérémie, qui m'ont offert leur patience, leur écoute, leur relecture et leur bonheur humeur pour m'épauler lors de mes terribles remises en question.

SOMMAIRE

INTRODUCTION

PARTIE 1

DÉFINITION ET HISTOIRE DU MODÈLE

A - Une notion polysémique

B - Une évolution constante pour répondre aux nouvelles réalités

C - Un outil devenu complexe et déconnecté

PARTIE 2

ÉTUDE DE MODÈLES DE LA PARTICULE AU SYSTÈME – DE L'INTERACTION À UNE VISION HOLISTIQUE

A - Une simplification extrême

B - L'interaction des particules et l'imprévisibilité du vivant

C - Ajuster les différentes interactions des paramètres aux ressources disponibles

D - Recherche d'un système global harmonieux et responsable

PARTIE 3

ESSENTIELS ET POURTANT SI IMPARFAITS

A - L'Abstraction par la simplification ou le risque d'isolement du principe

B - Les obstacles de la modélisation et de l'interprétation du vivant

C - Vers une nouvelle donnée référente : la ressource disponible

D - Les limites de l'universalité de la projection

PARTIE 4

UN MODÈLE DANS LA NATURE

A - Le vivant : un système ouvert, résilient, en constante réajustement

B - Imiter les systèmes de la nature

CONCLUSION

BIOGRAPHIE

INTRODUCTION

À chaque époque sa vision du monde, son paradigme et ses particularités. Notre époque nous fait évoluer dans un monde qui se complexifie, de plus en plus technologique et rapide. Le prix Nobel de Chimie, Paul Josef Crutzen (1933-2021) l'a qualifié en 2000 d'«anthropocène». Cette nouvelle ère de l'histoire de la Terre, comme le confirme le 6^e rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat), voit les activités humaines modifier les grands équilibres de la planète : climatique, biologique et même géologique. L'accélération des innovations démultipliée par les industries, modifie nos vies et nos sociétés. Elle nous promet des possibilités de progrès infinies tout en se reposant sur des services écosystémiques naturels en faillite et des ressources limitées. Jamais l'humanité n'a été aussi puissante, savante et en même temps aussi vulnérable à ses propres productions.

Selon le GIEC, nous ne considérons pas assez la nature et devons trouver des solutions inspirées de ses mécanismes et adopter une vision systémique reliant la nature, le climat et les sociétés humaines. Marc-André Selosse (né en 1968), biologiste, insiste pour dire qu'il ne s'agit pas simplement de trouver une meilleure harmonie avec la nature mais aussi de s'adapter comme la nature¹.

L'homme serait donc à l'origine des dysfonctionnements des équilibres terrestres car il ne considère pas suffisamment la nature et agit de manière déconnectée de son environnement.

Face à la pluralité des «insoutenabilités» collectives qui apparaissent dans les domaines environnementaux, sociaux, démocratiques, économiques et territoriaux, il est plus que jamais indispensable de comprendre le monde pour agir positivement sur notre destin. Pour relever ces défis, le biomimétisme, philosophie et approche conceptuelle interdisciplinaire, nous propose, pour être durable, de repenser la nature et de la prendre pour modèle.

Les modèles sont des outils construits pour refléter notre compréhension de la complexité du monde et nous aident dans nos prises de décision. Considérés comme relevant d'une expertise, ils sont omniprésents pour appréhender les différents enjeux de soutenabilité. Ils simulent, préviennent et évaluent, comme les modèles du Club de Rome, du GIEC ou de la finance pour ne citer que ces exemples. Ils s'appuient eux-mêmes sur des modèles climatiques et macroéconomiques pour démontrer la non-soutenabilité du rythme d'épuisement des ressources ou évaluer et anticiper des risques, des fluctuations économiques ou épidémiques. Pourtant, alors même qu'ils n'ont jamais été aussi sophistiqués, les modèles sont néanmoins fréquemment controversés et questionnés.

« Stop aux illusions du modèle croissantiste ! », « Quel modèle pour un monde durable ? »

Le débat public expose nos sentiments complexes envers ces modèles : une remise en question de ceux nous structurant et une forte attente vers de nouvelles propositions.

Il est donc communément acquis que les modèles sont le socle de nos fonctionnements actuels et futurs. Mais leur apparition dans l'histoire de l'humanité est ancienne et porte en elle tout le développement de nos vérités, bases de nos sociétés. Ils ont permis de définir le monde, à notre image, selon nos principes. Mais quelles sont aujourd'hui leurs places et leurs limites ? Peuvent-ils intégrer nos problématiques nouvelles ?

Face à la complexité du monde, aux incertitudes et aux interdépendances, comment nos modèles, qui paradoxalement ont un rôle simplificateur essentiel à leur compréhension, pourraient-ils nous mener à devenir résilients, nous aider à nous adapter à la nature ou alors nous adapter comme elle ?

¹ Marc-André Selosse, «Parole aux chercheurs : *La transition écologique ne suffit pas, il faut évoluer.*», *Science et vie*, 13 novembre 2021.

<https://www.science-et-vie.com/article-magazine/parole-aux-chercheurs-la-transition-ecologique-ne-suffit-pas-il-faut-evoluer>

PARTIE 1

**DÉFINITION ET
HISTOIRE DU MODÈLE**

A - UNE NOTION POLYSÉMIQUE

Extrêmement vaste, le terme de modèle reste employé dans de nombreux domaines et fait référence à diverses pratiques. Nous nous attacherons ici essentiellement aux modèles scientifiques et technologiques laissant à part les modèles culturels.

Commençons par l'histoire du terme puis par l'évolution de du concept. Franck Varenne (né en 1970), épistémologue, nous éclaire sur la complexité de ce terme. Alors que les modèles existent depuis toujours, le mot est inventé seulement au XVII^e siècle. D'un point de vue épistémologique, «modèle» signifie «petite mesure», du latin «modulus» également à l'origine des mots «module» et «moule». Le terme est ambigu car il est à la fois ce qui est modélisé et le processus. Le sujet, pouvant-être nommé « top modèle » et le processus même de modélisation, le modélisant. Appelé «prototype» pour les designers ou les industriels, le modèle est « processus » pour les scientifiques.

Pour en donner une définition au sens large, il est un objet substitutif qui sert de médiateur dans le cas d'une interrogation spécifique concernant un système cible.

Appliqué au climat, un modèle numérique est produit. Il sera possible de lui poser des questions concernant le futur ou le passé. Il permettra de proposer des prédictions.

Le modèle est bien un objet médiateur facilitant un questionnement sur la compréhension du monde ou du domaine qui nous intéresse. De toutes formes, le modèle s'adapte au courant de l'histoire : matériel inerte (une maquette), matériel vivant (organisme modèle), mental (expérience de pensée, schéma mental), symboles (images, cartes, diagrammes) ou bien formules mathématiques, équations, programmes informatique et codes...

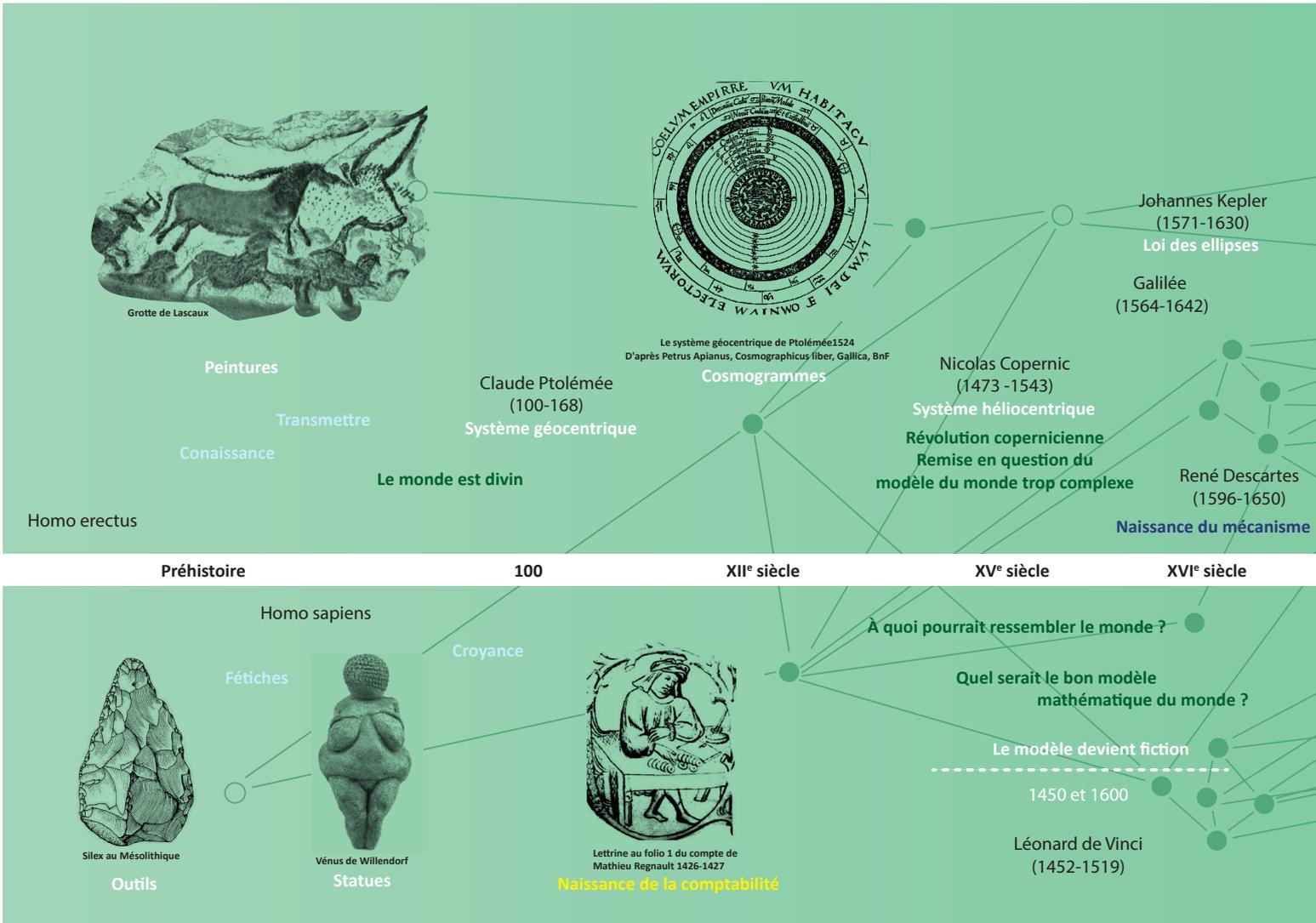
Le choix de la forme dépend des ressources de la personne le développant mais aussi à l'objectif pour lequel il est mis en place. Il s'ajuste à sa destination pour répondre au mieux à la question posée. Ce médiateur devient un outil descriptif, prescriptif, explicatif, persuasif ou correspond à des simplifications de modèles pour aider à la compréhension des larges groupes non-scientifiques. Franck Varenne répertorie jusqu'à 21 fonctions² pouvant être classées en deux grands groupes faisant du modèle soit un outil de compréhension soit un outil d'action³.

La nature et la structure des modèles sont donc vastes pour questionner avec une grande précision chaque sujet au plus proche de sa nature et de nos attentes.

Ce n'est pas un outil figé. Il s'adapte à nos besoins et est systématiquement discuté par l'avancée des connaissances qui l'affinent, l'ajustent ou le remettent en cause.

² Franck Varenne, «Comparer les modèles à l'aide du vecteur caractéristique : fonction, nature, principe et usage des modèles», *Natures Sciences Sociétés* ; à paraître.

³ Amy Dahan, «Les Modèles, ce qu'ils sont, d'où ils viennent et ce qu'ils font», *Modélisation et soutenabilités*, Séminaire Soutenabilités, France stratégie, 2020-2021. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/les_modeles_ce_quils_sont_dou_ils_viennent_et_ce_quils_font.pdf



Évolution di modèle à travers le temps.

B - UNE ÉVOLUTION CONSTANTE POUR RÉPONDRE AUX NOUVELLES RÉALITÉS

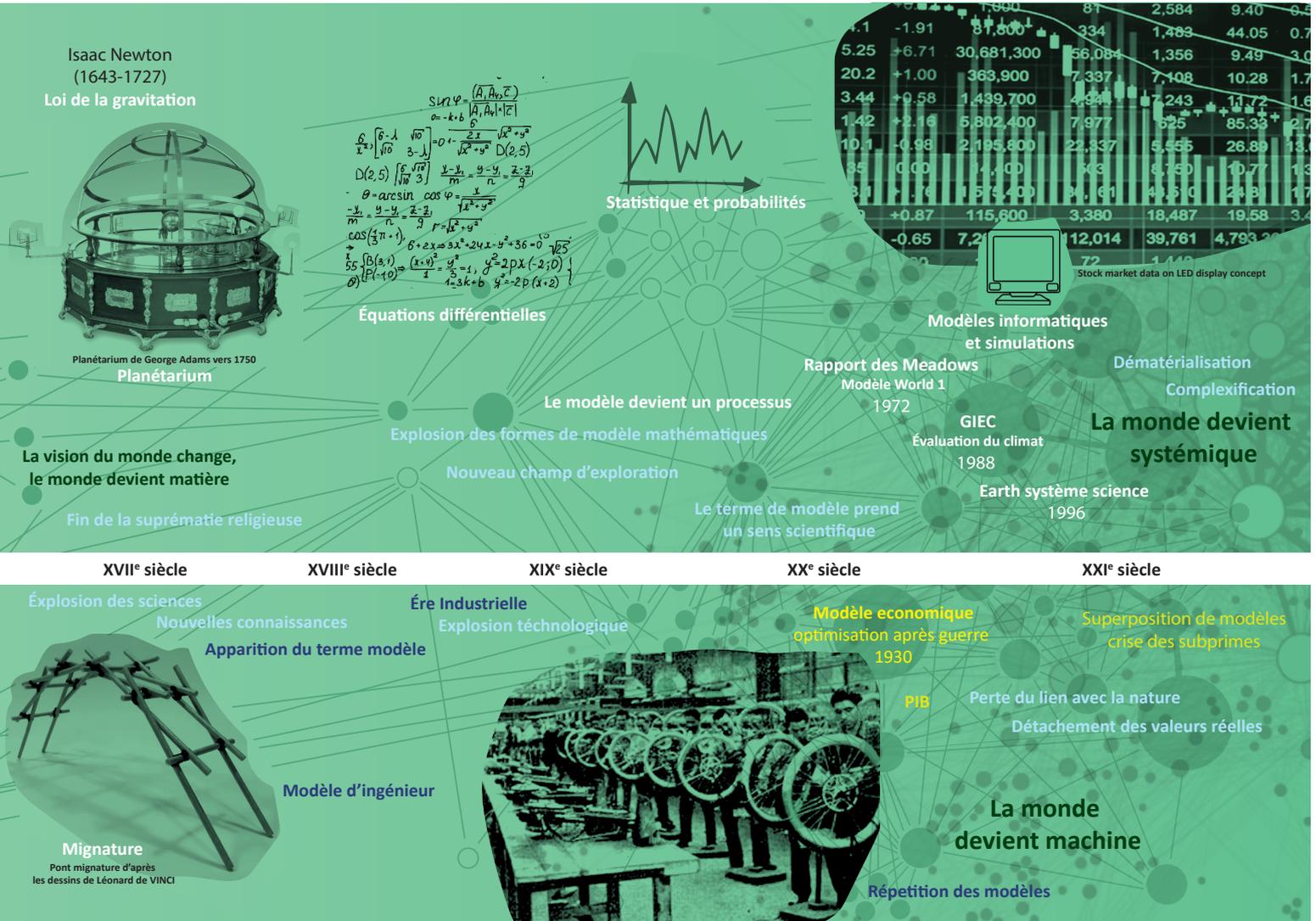
Historiquement, on sait que l'usage a précédé de loin la terminologie.

Qu'ils servent à transmettre une connaissance ou permettent de mettre en œuvre une idée, les modèles trouvent leurs premières sources dans l'étude de leur environnement.

Dès la Préhistoire, l'Homo erectus puis l'Homo sapiens regarde le monde qui l'entoure et en tire des enseignements, des connaissances qu'il utilise et souhaite transmettre. Ses modèles sont des représentations, des images reproduites dans les grottes. Les peintures pariétales indiquent les rites à suivre ou les connaissances acquises comme les techniques de chasse. L'homme fait des analogies avec la nature pour fabriquer et créer des outils de référence et transmettre son savoir-faire.

Associés aux pratiques religieuses principalement, ses modèles, objets substitutifs, prennent la forme de statue ou de fétiche. Aux formes animales ou anthropomorphes, ces icônes s'inspirent du vivant pour devenir des guides spirituels.

Un lien est encore nettement visible entre les découvertes mécaniques de l'homme et la biologie. Le fonctionnement du corps est comparé à ces nouveaux fonctionnements. La clavicle tire son nom de sa forme, un os semblable à une petite clef de serrage. De tels glissements existent dès l'Antiquité, passant d'un espace à un autre, par métaphore ou réalisation matérielle pour expliquer soit de manière mécanique la biologie soit de façon biologique un mécanisme.

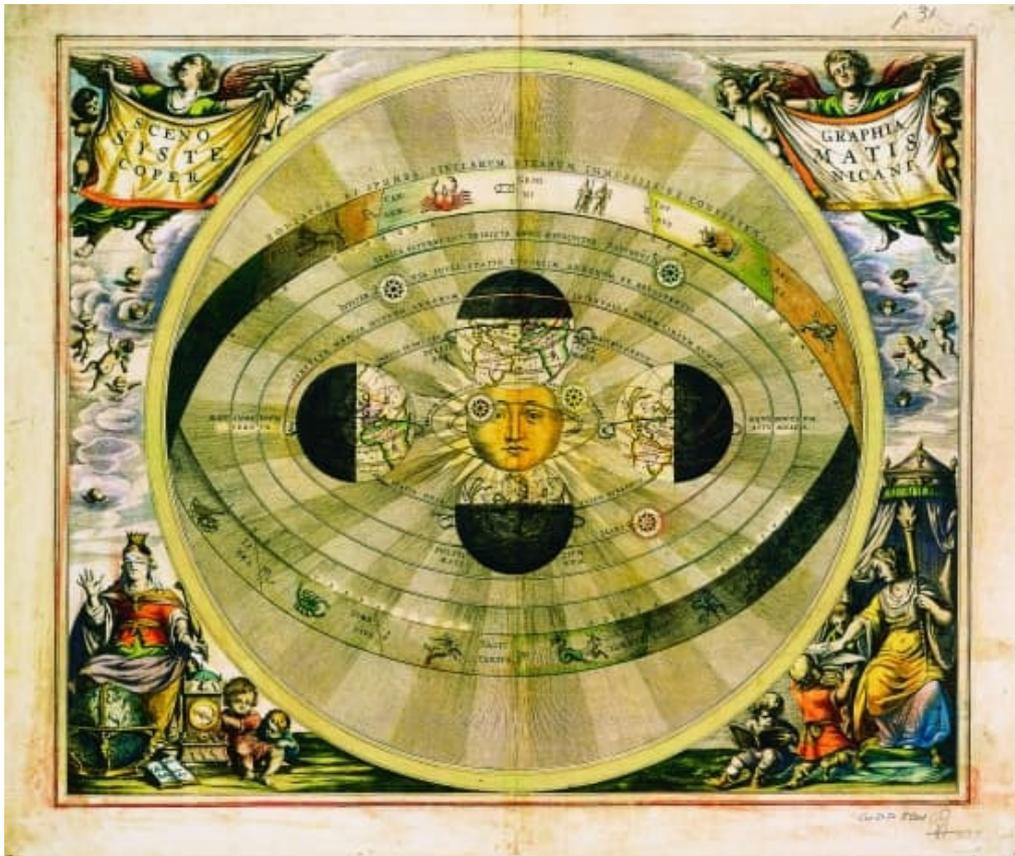


A l'apparition du terme de modèle au XVII^e siècle, il s'applique à une réduction d'un matériel, une miniature. Il permet à l'ingénieur de se projeter dans le cadre de l'étude d'une future construction et de valider sa technique comme dans le cas de la réalisation d'un pont.

L'explosion des sciences à cette époque fait naître un grand nombre de nouvelles connaissances. La vision du monde change. Les lois fondamentales immuables sont remises en cause. Le mot de « modèle » va peu à peu changer d'usage jusqu'à remplacer le terme de « loi » pour définir ces grands systèmes de pensées évolutifs, comme les lois physiques dont la loi des chutes des corps de Galilée (1564-1642)⁴.

À cette époque la notion de modèle n'est pas encore si large. Les modèles sont des représentations matérielles comme des planétariums illustrant l'organisation des planètes.

Les « cosmogrammes », très en vogue, sont des images qui permettent de visualiser le cosmos et offrent une certaine compréhension de la Terre, passant du système géocentrique vers le système héliocentrique. Comme l'expose clairement l'historienne de la littérature et des sciences modernes et metteure en scène Frédérique Aït-Touati (née en 1977), la révolution copernicienne remet en question l'ancien modèle du monde. Le système avec la Terre en son centre ne fonctionne pas. Il faut changer de modèle car celui de Claude Ptolémée (100-168) est trop complexe.



Cosmogramme. Le système du monde selon Copernic, planche extraite d'un atlas de Andrea Cellarius, édition de 1661. Ph. Coll. Archives Larbor

Se pose la question de quel serait le bon modèle mathématique du monde. La démonstration ferme de la réalité n'est pas encore possible. Il existe alors très peu de moyens de calcul, ni algèbre ni instrument de mesure précis pour les recherches. Les démonstrations ne viendront qu'avec les découvertes de Galilée (1564-1642) et d'Isaac Newton (1643-1727).

Ces recherches innovantes doivent néanmoins rester humbles et prudentes face au diktat religieux qui accepte une partie de ces exposés sur le réel mais impose une limite, celle de l'espace spirituel, infranchissable et réservé à Dieu. Galilée, trop précoce dans ses découvertes, finira sa vie en résidence surveillée.

Pendant plus d'un siècle, entre 1450 et 1600, se développe un imaginaire utilisant des fictions scientifiques et créant des projections. Les modèles sont devenus des fictions, des hypothèses aidant à comprendre à quoi pourrait ressembler le monde. Les scientifiques s'emparent étrangement de cet outil imaginaire, loin des règles et des normes habituelles de leur domaine. Ils incorporent à ces fables leurs connaissances et tentent de nouvelles pistes supposées qui s'imposeront par leur logique.

Johannes Kepler (1571-1630), astronome, utilisera ce principe pour ses lois, comme des fables du cosmos. Il imagine des fictions lunaires pour regarder la Terre de loin ou pour changer de cosmos et évoquer les possibles « Que se passerait-il si ... (le voyage dans l'espace était possible)? » En 1609, Kepler

précise ses recherches et formule de nouvelles lois révolutionnaires basées sur un mouvement elliptique des planètes et élimine les cercles figés de Ptolémée⁵. Le modèle est alors une traduction mathématique de données d'observations précises. Il calcule le temps de parcours de l'ellipse par le corps céleste. Son invention rend caduque toute la tradition grecque datant de Pythagore et de Platon. Ces fictions se répandent dans les travaux scientifiques et réduisent l'interdit religieux.

René Descartes (1596-1650) sera, lui, libre de développer dans son *Traité du monde et de la lumière* (1633), consacré à la physique, des réflexions basées sur une fiction, «la fable de mon monde» (Descartes - *La Fable du monde*, J.-P. Cavaillé). Il décrit le monde depuis son origine par la matière. Progressivement un courant global émerge un peu partout en Europe et le mécanisme apparaît aux savants comme une évidence pour comprendre le monde, qui devient matière et particules. L'universitaire Alain Supiot (né en 1949) définit cette période comme la fin des sciences de contemplation du monde. La nature qui n'était auparavant qu'un décor devient un objet d'étude pour ces sciences renouvelées⁶.

Les lois de Kepler seront globalisées et généralisées par Isaac Newton et ses lois fondamentales sur la dynamique des particules en mouvement et la gravitation universelle, dans laquelle toute particule exerce sur une autre une force d'attraction. Avec ces deux lois mathématiques, Newton interroge de nombreux domaines. Avant lui la gravité, la chute d'un élément et le mouvement des planètes dans le ciel étaient des phénomènes séparés. Il unifie les mécaniques céleste et terrestre non pas par l'observation mais par une réflexion analogique.

Il explique la trajectoire des comètes, calcule la forme de la Terre, explique le phénomène des marées. Newton explique que le corps A influence le corps B instantanément par une force et que cette transmission se fait dans le vide. Simple supposition alors car techniquement impossible à prouver à l'époque. Il parvient à convaincre et invente un modèle mathématique remportant un grand succès. La fiction sera au fil des inventions mathématiques densifiée de données complexes.

Du point de vue mathématique Newton inspire le développement de la physique au XVIII^e siècle et début du XIX^e siècle. De nouvelles lois émergent comme les lois d'attraction électrique et magnétique. Quelques infimes écarts entre les observations et les prévisions seront corrigés par Albert Einstein (1879-1955). Ainsi le modèle de Newton aura une influence immense. Il permettra de découvrir de nouvelles planètes dans le système solaire et, au-delà, de modéliser l'expansion de l'univers... jusqu'à l'invention actuelle du système GPS.

Les modèles sont en constante évolution. Les nouvelles connaissances acquises permettent de remettre en question les modèles précédents et donnent naissance à de nouveaux outils.

⁴ Franck Varenne & Frédérique Aït-Touati, «Les Modèles, ce qu'ils sont, d'où ils viennent et ce qu'ils font», *Modélisation et soutenabilités*, Séminaire Soutenabilités, France stratégie, 2020-2021.

<https://www.strategie.gouv.fr/debats/seminaire-soutenabilites-cycle-1-seance-3-modelisation-soutenabilites>.

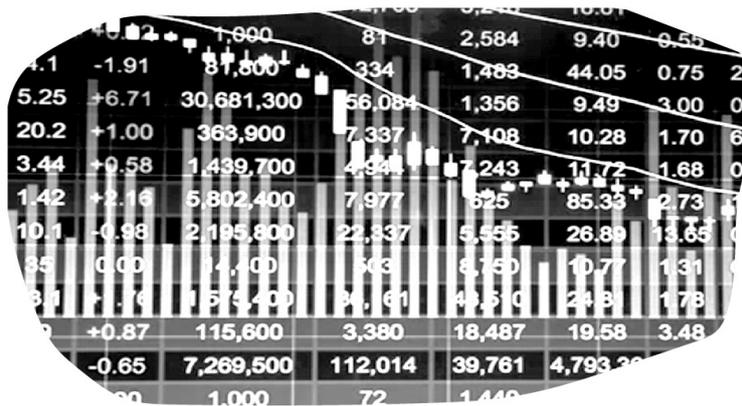
⁵ Jean Mawhin, «Les Modèles mathématiques sont-ils des modèles à suivre ?» *Collègue de Belgique*, conférence à l'Académie royale de Belgique, 9 mars 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=Nq0fyqs5Kac>

⁶ Alain Supiot, *La Gouvernance par les nombres*, Fayard, 2015.

C - UN OUTIL DEVENU COMPLEXE ET DÉCONNECTÉ

A la fin du Moyen Âge, les chiffres émergent dans les modèles. Alain Supiot développe ce virage important dans son ouvrage *La gouvernance par les nombres*, publié en 2015. Pour assurer l'équité des échanges et garantir la sécurité des commerces, les marchands italiens souhaitent rendre la situation financière des entreprises plus lisible. Ils ont formalisé une étude poste par poste, regroupé sur une table liquidités, stocks... Les finances de chaque marchand étaient visibles en une seule page. Alors une confiance entre les parties devenait possible. Ce modèle est simple, clair et transposable à tous. Il garde l'historique de l'évolution de l'entreprise et lui assure des bases solides. La comptabilité est née et reste encore aujourd'hui un des piliers de nos sociétés. Pour son bon fonctionnement, il est impératif de conserver une valeur réelle à chaque élément.

Ce rapport au réel est indispensable car tout détachement mènerait inévitablement à la perte de la fonction sécuritaire du modèle. Cela se vérifiera de manière planétaire avec l'explosion de la crise des Subprimes en 2007 aux États-Unis d'Amérique. Alain Supiot expose l'emballlement du système provenant du détachement des produits financiers des valeurs réelles⁶. Pour assurer sa sécurité, le marché a produit de nouveaux modèles, ajoutés aux modèles. Arrivés à une telle superposition que les cours financiers, les ventes et les investissements n'avaient plus de référence quantifiable, plus de rapport de valeur⁷.



Stock market data on LED display concept

La bulle spéculative explose. L'ensemble du marché financier planétaire est impacté. En France, ce sera le cas de Jérôme Kerviel qui illustrera cette perte financière et cette perte de sens. Le jeune trader créait de fructueux montages financiers sans aucune sécurité ni respect des règles habituelles. L'appât du gain et de la réussite a conforté son employeur, une banque, dans son action. Lorsque la crise américaine explose, ses montages de chiffres complexes, son univers de symboles sans plus de lien avec le réel, s'effondre. Le réel, cinq milliards d'euros de perte, apparaît, et l'enfermement des traders dans des systèmes de symboles coupés de toute réalité perce en plein jour. Sans lien avec le réel, le symbole perd son essence et enferme l'homme dans des systèmes de représentation sans signification.

Malgré ses travers, le développement de systèmes chiffrés renouvelle les outils et permet aux modèles d'atteindre au fil des décennies de plus larges domaines d'exploration.

Une réelle explosion des formes de modèle se produit au XIX^e siècle et engendre une large diversification de ses usages. Le XVIII^e siècle n'avait à sa portée que les équations différentielles comme outil

mathématique pour établir des systèmes de réflexion. L'apparition au siècle suivant de la statistique et des probabilités ouvre un nouveau domaine immense pour les mathématiques.⁴

Alors que les sciences étaient traditionnellement réductionnistes ou mécanistes, les nouveaux modes de calcul ouvrent un tout nouveau champ d'exploration : prédire sans même expliquer. Les champs d'étude et de questionnement approchent l'infini, basés sur une abondance d'axiomes qui permettent de formuler de nouvelles hypothèses. Le modèle s'enrichit de formes mathématiques complexes et investit le champ de la recherche.

Dès lors, progressivement le modèle se dématérialise et devient un processus, une modélisation centrée sur les mathématiques. Au XX^e siècle, le terme de modèle prend un sens scientifique. Les modèles deviennent omniprésents du fait du raffinement des mathématiques et de la pluralité des axiomatiques. Avec l'essor de l'informatique et des simulations, les modèles finissent par signifier des choses très abstraites. Ils peuvent traiter de plus en plus de données simultanément et les faire interagir. Nous pouvons ainsi simuler, comparer, évaluer de manière de plus en plus précise et prévoir, tels les modèles utilisés en météorologie ou en géologie.

L'Après-guerre est une période faste de reconstruction. La société est nourrie d'une forte volonté de rentabilité. Le modèle économique fondé sur la croissance avec le PIB comme emblème, s'impose comme la valeur fondamentale. Ce modèle prend le dessus sur tous les autres.

Les sciences humaines, les philosophes n'ont plus l'impact du passé ni l'accès aux élites.

Le règne de l'ingénieur et des économistes est né comme l'explique l'économiste Gaël Giraud (né en 1970)⁷. Capables de produire des modèles mathématiques, de les comprendre et de les utiliser, ils imposent leurs règles et leurs objectifs à l'ensemble des disciplines. Les termes de productivité et rentabilité effacent toute notion d'équilibre, de bien-être, d'équité, de lien avec les ressources.

Peu à peu le modèle économique se complexifie et les modèles financiers évaluent et anticipent les risques et fluctuations. Parallèlement la productivité de nos industries s'améliore grâce aux technologies et les innovations se démultiplient et inondent le marché.

Le modèle se dématérialise tout en devenant omniprésent et incontournable.

Prenant conscience de cet emballement, plusieurs modèles sont étudiés pour tenter d'équilibrer le rapport entre nos attentes et le réel.

Le modèle de simulation World 3 du rapport des Meadows de 1972 se fonde sur des interactions entre population, croissance industrielle, production de nourriture et limites des écosystèmes terrestres pour démontrer la non-soutenabilité du rythme de l'épuisement des ressources. Le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), fondé en 1988, capable de modéliser le climat mondial futur en s'appuyant sur une multitude de modèles, démontre la complexité du monde et des diverses interactions systémiques.

Ces nouvelles caractéristiques, ces ordres de grandeurs gigantesques sont difficiles à comprendre et dépassent la perception humaine. De nouveaux modèles sont nécessaires pour appréhender ce monde. Des disciplines scientifiques nouvelles émergent comme Earth system science en 1996, une approche multidisciplinaire qui vise à comprendre les interactions physiques, chimiques, biologiques et

humaines qui déterminent le passé, le présent et le futur de la planète. Earth system science fournit une compréhension sur une base physique du monde dans lequel l'humanité tente de se maintenir. Ces nouveaux modèles de simulation ont la capacité comme jamais à nous projeter dans le futur. Ils nous apportent un nouveau regard sur notre système terre, nous montrent une évolution, nous préviennent des changements futurs et pointent un dérèglement dû à nos activités, nos agissements et questionnent notre compatibilité avec la Nature. Avant d'interroger cette compatibilité, intéressons-nous à quelques modèles types actuellement en cours de création, depuis une étude centrée autour d'une seule particule, jusqu'à l'interaction de plusieurs particules pour finir avec l'étude de modèles systémiques.

⁴ Franck Varenne & Frédérique Aït-Touati, «Les Modèles, ce qu'ils sont, d'où ils viennent et ce qu'ils font», *Modélisation et soutenabilités*, Séminaire Soutenabilités, France stratégie, 2020-2021. ⁷ Gaël Giraud, *Un Système économique à bout de souffle ?*, Podcast Sismique, 29 mars 2022.

<https://www.sismique.fr/post/87-gael-giraud-1-le-systeme-economique-mondial-et-ses-limites>

⁶ Alain Supiot, *La Gouvernance par les nombres*, Fayard, 2015.

⁷ Gaël Giraud, *Un Système économique à bout de souffle ?*, Podcast Sismique, 29 mars 2022.

<https://www.sismique.fr/post/87-gael-giraud-1-le-systeme-economique-mondial-et-ses-limites>

PARTIE 2

**ÉTUDE DE MODÈLES
DE LA PARTICULE AU
SYTÈME**

—

**DE L'INTERACTION
À UNE VISION
HOLISTIQUE**

Cette partie présente le résultat d'entretiens avec quatre chercheurs travaillant actuellement sur différents modèles, interrogés sur la base de mon questionnaire (cf annexe). Le résultat est présenté ci-après, selon la même méthodologie : intitulé de la recherche, présentation de l'équipe de recherche, de la démarche et des résultats obtenus, premiers constats/remarques. Ces modèles seront questionnés en partie 3.

A - UNE SIMPLIFICATION EXTRÊME

Intitulé de la recherche : Le rôle des structures de libellule dans l'aérodynamisme au cours de leur évolution.

Camille Aracheloff, doctorante en physique/biologie - PMMH & MNHN.

André Nel, paléo-entomologiste, professeur au MNHN.

Romain Garrouste, spécialisé en biologie évolutive et écologie des insectes, maître de conférences, chercheur au MNHN.

Camille Aracheloff travaille au Laboratoire physique et mécanique des milieux hétérogènes sur le rôle des structures des ailes des libellules dans leur aérodynamisme au cours de leur évolution. Il s'agit d'une étude physique et mathématique menée sur un objet biologique pour tenter d'expliquer leur évolution en plus des variations atmosphériques propres à chaque époque.

Sont analysées quatre libellules de notre époque, une libellule de la période du Mésozoïque (-251 millions à -60 millions d'années avant J.-C.) et une libellule du Permien (- 299 millions à -251 millions d'années avant J.-C.) sur fossile.

Les deux espèces actuelles sélectionnées sont deux patrouilleuses et deux demoiselles, espèces dont les ailes ont des formes différentes et qui les referment ou non au repos. Pour les époques antérieures, il s'agit d'une meganeuridae.

Comparativement, les espèces actuelles sont de taille nettement plus petite que les libellules du Mésozoïque ou du Permien qui pouvaient mesurer jusqu'à 70 centimètres.



Libellule géante- Muséum national d'Histoire naturelle © MNHN- D. Serrette
Meganeura monyi : une libellule géante de 70 cm d'envergure !

Le choix d'animaux si contrastés permet à l'équipe de chercheurs de riches comparaisons pour répondre à leurs diverses interrogations.

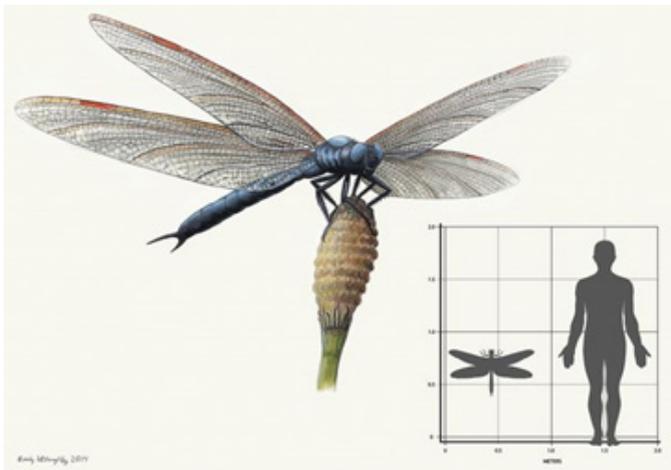
Pourquoi les libellules avaient-elles de si grandes ailes à l'origine ? Pour quelles raisons les réseaux de veines ont-ils si fortement évolués ? Ces ailes sont-elles le résultat le plus optimal dans cette situation ou une suite d'adaptations pas nécessairement optimales ? Pourquoi les ailes de la libellule ont-elles besoin d'autant de structures ? La morphologie a-t-elle une incidence sur sa technique de vol ? À quel besoin peut-on relier cette évolution ? Leur taille si imposante est-elle due à l'absence de prédateurs vertébrés volateurs ? Les insectes étaient-ils à la fois proie et prédateur et ainsi s'inscrivaient-ils dans une course à l'évolution pour survivre ?

Les variables étudiées sont la taille, la forme, le nombre de structures, l'énergie nécessaire pour les activer, la souplesse de la matière.

Les résultats obtenus permettront de faire des déductions et généreront de nouvelles questions. Puis l'ensemble sera remis dans le contexte d'origine, en rapport avec le milieu, les proies et prédateurs, et de possibles scénarii de développement seront évalués.

À chaque étape de nouvelles questions émergent.

Les premières étapes consistent à répertorier les études existantes autour du sujet puis à sélectionner les espèces qui offrent le plus d'intérêt et de différence ou de convergence autour d'un questionnement. Par exemple à quoi sert le nodus, systématiquement présent chez toutes les espèces ?



Meganeura, la période du mésozoïque et du permien



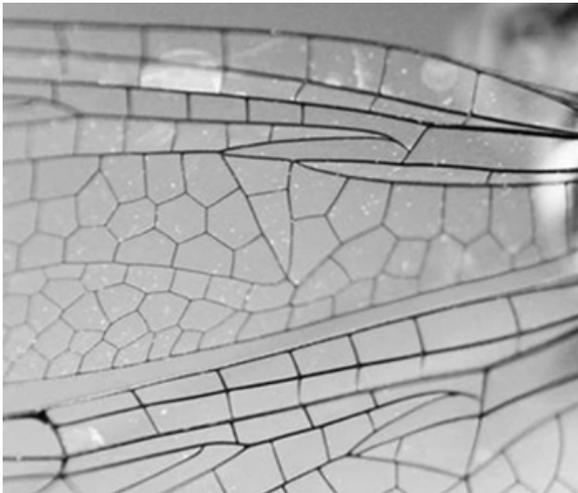
Libellules demoiselles et patrouilleuses

Processus de l'étude

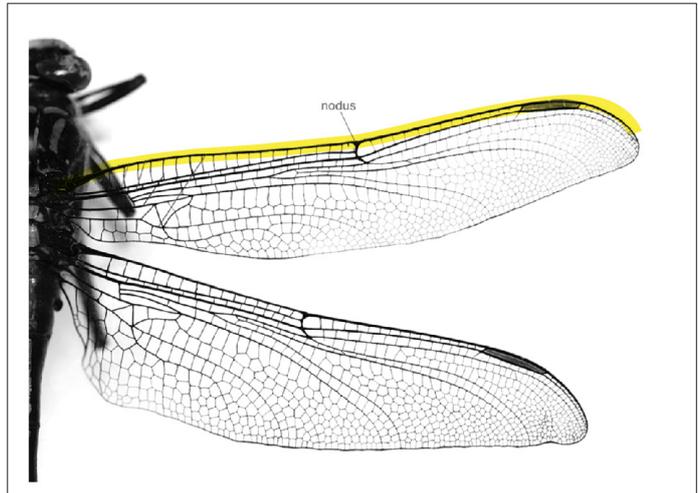
Une aile de libellule est une géométrie très complexe, formée de deux membranes l'une au-dessus de l'autre. Chacune est parcourue de nombreuses veines donnant naissance à des facettes inclinées dans différentes directions.

Ainsi pour étudier l'aérodynamisme et le rôle des veines il faut simplifier au maximum la représentation de l'aile et étudier chaque élément indépendamment pour bien comprendre son rôle. D'abord sera étudiée la plus grosse veine puis progressivement les suivantes.

Des maquettes seront réalisées dans un plastique rigide pour la veine principale et la membrane dans un plastique plus souple. L'étude est d'abord menée sur une maquette de forme rectangulaire. Ce modèle simplifié au maximum est appelé un rapport d'aspect. Il décrit la relation entre la largeur et la hauteur d'un objet. La forme de la maquette évoluera vers une forme plus réaliste au fil de l'étude et de la compréhension.



Veines et facettes d'ailes



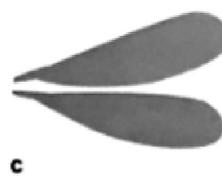
Libellule demoiselle



Rapport d'aspect



Exemple de maquette



c



m



h

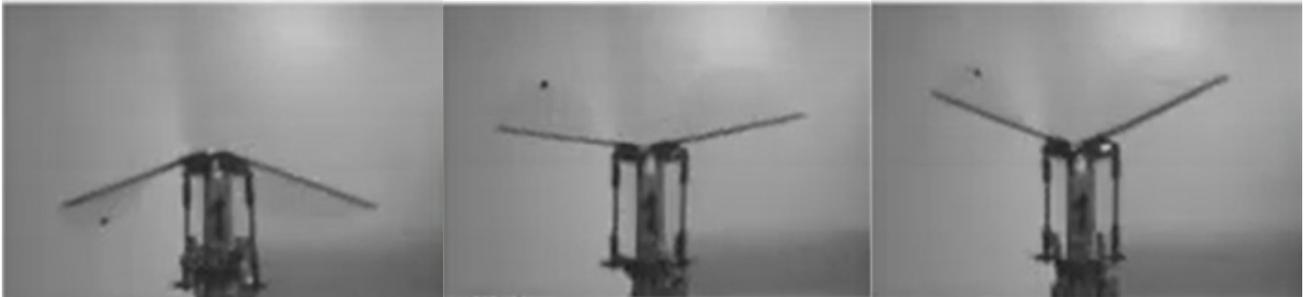


r

Formes d'ailes

Sont ensuite comparés les mouvements d'une aile de libellule et la maquette. Chacune sera placée à son tour sur une machine à moteur les agitant verticalement. Leurs déformations seront filmées, les images mathématisées et l'écart entre elles calculé. Pour la formulation mathématique, Camille Aracheloff part d'une équation existante, comme le calcul de la résistance d'un tube, qu'elle transforme, adapte à la situation.

La différence avec la réalité possiblement à relever est que la machine à moteur crée des battements verticaux tandis les libellules volent en faisant des mouvements en huit. Quelle incidence cet écart peut-il avoir dans l'étude ?



Vidéo de modèles réduits. Étude vol battut

J'ai personnellement été surprise par la simplification des maquettes mettant en lumière le besoin de simplifier la particule, de l'optimiser, pour en généraliser les caractéristiques. Isoler, simplifier pour modéliser. Au dire du mathématicien belge Jean Mawhin (né en 1942), un bon modèle dépend des facultés d'une personne et de sa capacité à choisir les bons outils et sélectionner les bonnes données.⁵

Au plus près du modèle, on comprend aisément qu'il n'est qu'un assemblage de choix (espèce, forme de calcul, mouvement du moteur non conforme à la réalité du vol) qui rend l'étude unique, qui l'oriente vers sa question première. Il est dès lors évident que l'usage d'un modèle doit être fait en toute connaissance de la question qui l'initie et des choix retenus biaisant la réalité de la particule étudiée.

⁵Jean Mawhin, «Les Modèles mathématiques sont-ils des modèles à suivre ?» *Collègue de Belgique*, conférence à l'Académie royale de Belgique, 9 mars 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=Nq0fyqs5Kac>

B - L'INTERACTION DES PARTICULES ET L'IMPRÉVISIBILITÉ DU VIVANT

Intitulé de la recherche : Banc de poissons - Étude de modèles physiques et statistiques pour expliquer la nage collective en milieu altéré.

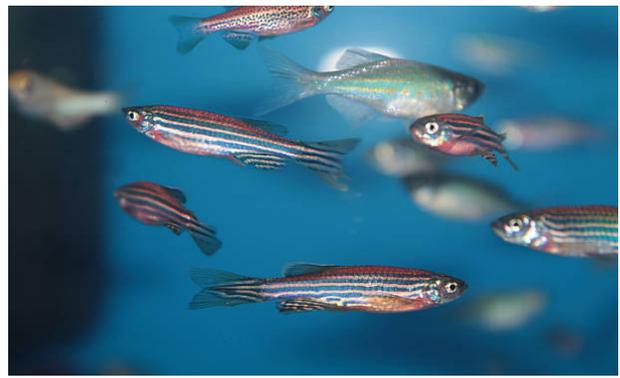
Baptiste Lafoux, doctorant en physique - PMMH

Baptiste Lafoux cherche à comprendre comment les poissons en banc vont collectivement prendre une décision et changer leur comportement. Il s'agit d'une étude d'un groupe de particules et de leurs interactions.

L'étude est menée sur deux types de poissons de deux à trois centimètres. Les poissons Hemigrammus Rhodostomus nagent groupés, tandis que les Zebrafish nagent de manière dégroupée. Comparer deux espèces très différentes permet de se rendre compte des différences et de mieux saisir ce qui est important à regarder et à analyser.



Les Hemigrammus Rhodostomus nagent groupés

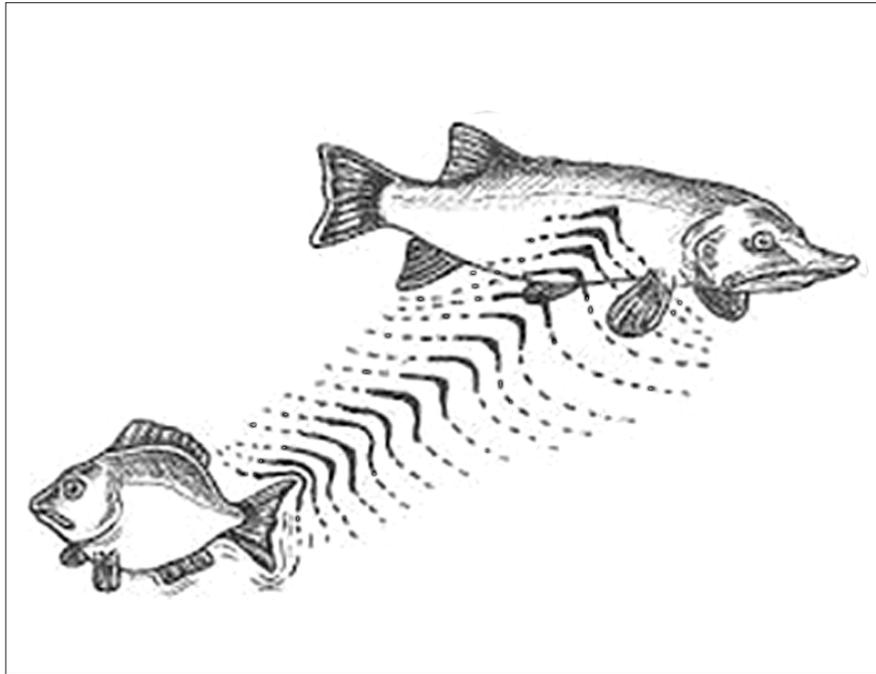


Les Zebrafish nagent dégroupés

Travailler avec le vivant correspond à s'exposer à des résultats toujours différents pour une même situation. Dans le vivant, les variables pouvant influencer sur l'expérience sont multiples : le sexe (mâle-femelle), la condition (fatigue, faim, âge)... Ayant connaissance de ces facteurs biologiques, il est nécessaire de faire plusieurs essais, de collecter ces données et d'en extraire une étude statistique dont l'interprétation sera délicate.

L'objet de cette étude n'est pas de savoir pour quelle raison biologique les poissons se regroupent ou s'alignent mais davantage de comprendre les conditions sous lesquelles ils se regroupent et de quelle façon.

Le biomécanisme d'interaction entre les poissons se fait soit par la vision, soit par leur ligne latérale, organe mécanosensoriel qui permet une perception des variations de pression. Cette ligne de petits trous parcourt les flancs de l'animal et détecte les forces d'écoulement. Ainsi le poisson adapte en permanence sa direction et sa vitesse. Cette détection fonctionne comme une boucle de rétroaction sensorielle en rapport avec l'hydrodynamisme du milieu. L'étude permettra de montrer lequel de ces deux mécanismes est prépondérant pour faire fonctionner un banc.



La ligne latérale permet au poisson de détecter les ondes d'un autre poisson

Avec cette recherche, Baptiste Lafoux souhaite répondre à plusieurs interrogations.

Que se passe-t-il lorsque le milieu dans lequel nagent les poissons est altéré ? À partir de quel moment vont-ils changer de comportement et s'organiser collectivement, spatialement ? Des motifs vont-ils émerger, se répéter ? Sont-ils mesurables ?

D'un essai à l'autre les résultats sont-ils les mêmes ? Vont-ils tous tourner en même temps ? Quelles perturbations provoquent les turbulences de l'écoulement sur leur ligne latérale ?

Quel est le comportement global du groupe ? Quelle est l'incidence de l'espace reproduit pour l'étude sur le comportement des poissons ?

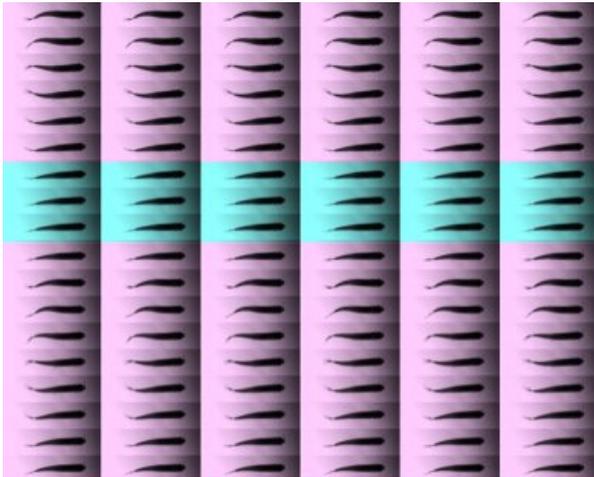
Les variables étudiées sont le nombre de poissons (quel comportement a un individu, puis deux, puis six, mille poissons), la vitesse de l'écoulement, l'intensité de la lumière, la fréquence du cycle de nage (l'amplitude du battement de la queue et le temps de propulsion).

Les dispositifs sont un bassin de 1 x 1,40 mètres de côté pour les essais de lumière et un tunnel de nage pour l'écoulement.

Le mécanisme de nage d'un poisson

Pour simplifier l'étude de la nage collective l'attention est portée d'abord sur un seul poisson, il devient la particule. Plongé dans le bassin, ses interactions avec les éléments du milieu sont observées. Ensuite, le chercheur s'attache au mécanisme de sa nage. Quelle est la fréquence du cycle de sa nage ? Quelle est l'amplitude du battement de sa queue et quelle est la durée du temps de propulsion ?

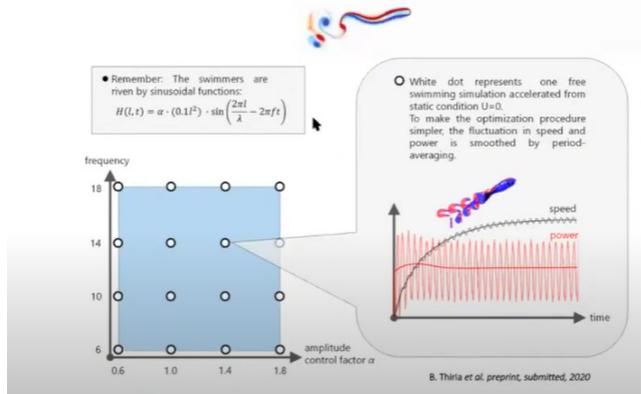
Filmés les mouvements sont extraits et intégrés dans un code numérique. La formule obtenue est comparée avec la réalité et affinée pour être la plus proche possible. Une fois les caractéristiques de la nage d'un seul poisson maîtrisées, l'étude peut se poursuivre en augmentant le nombre de poissons et le nombre de paramètres



Les nageurs Burst-and-Coast alternent des phases où ils bougent leur corps qui leur permet de se propulser et une phase où il se laissent glisser.

Optimization procedure DNS 3D Simulation

S.V

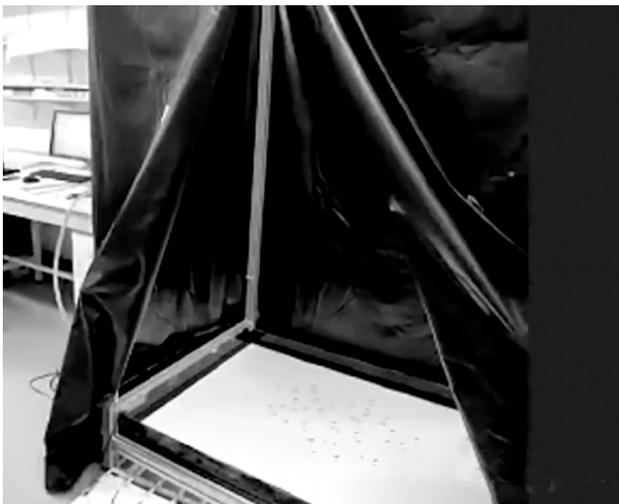


La nage du poisson est numérisée.

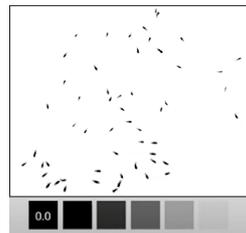
Nage libre sous contrainte d'un éclairage dans un bassin

Sera-t-il possible d'analyser la distance entre les poissons, d'observer à partir de quel moment un poisson sent la présence de l'autre ? Comment optimisent-ils leur banc ?

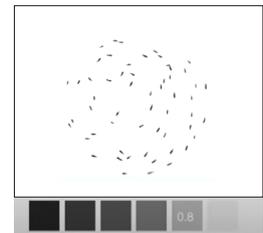
Immergés dans un bassin, les poissons sont exposés à une variation lente d'éclairage pendant une heure. Ils adoptent une nage différente selon la luminosité. Le regroupement passe par des phases successives. Lorsque l'éclairage est faible, ils nagent séparément. À mesure que la lumière est intense, les poissons s'alignent puis se regroupent pour former un vortex. Mais ce vortex aura-t-il toujours la même configuration ? Va-t-il tourner dans le même sens ? Les essais sont filmés, étudiés et calculés. Les résultats seront comparés statistiquement pour être au plus proche d'une réalité.



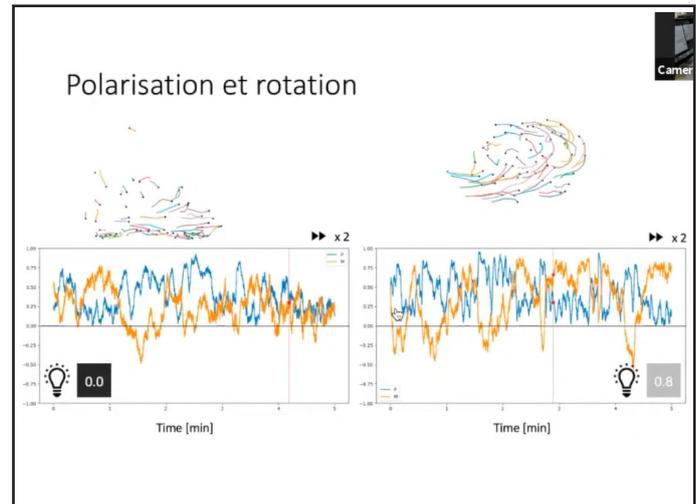
Bassin 1 x 1,40m avec des Zebrafish



Observation avec peu d'éclairage: les poissons utilisent l'ensemble de la surface, ont des comportements désordonnés et sont peu en groupe.



Observation avec plus d'éclairage: les poissons sont regroupés. Cela voudrait dire que la vision est importante pour la constitution d'un banc de poissons.

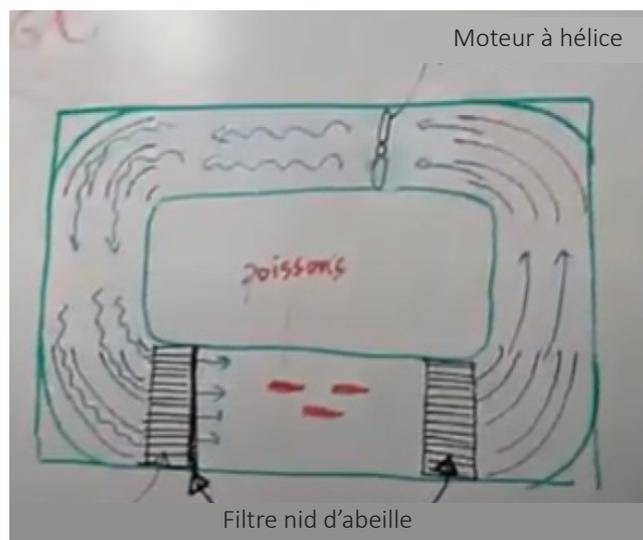


Les poissons sont filmés et un logiciel de tracking ressort toutes les coordonnées en deux dimensions. Comment cette multitude de données nous renseigne sur le comportement ? Deux films avec un éclairage différents sont comparés.

Avec les données du tracking, il est possible de regarder mathématiquement si les poissons nagent dans la même direction ou non et leur taux de rotation.

Nage libre sous contrainte de l'écoulement dans un tunnel

Cette expérience permet d'étudier le rôle de la vitesse de l'eau qui circule et des turbulences sur les interactions entre les poissons. De l'eau est introduite dans le tunnel et mise en circulation. Les poissons nagent spontanément à contre-courant et gardent naturellement une position. L'écoulement traverse une grille avant d'arriver au niveau des poissons, grille qui permet de lisser et de contrôler les turbulences. Une caméra filme la nage vue de dessus et de côté.



Tunnel d'écoulement

Une première observation de la nage des poissons en fonction de différentes vitesses d'écoulement et de leur effort à fournir est mise en avant. Les images sont analysées et comparées selon si les poissons sont dans une phase active (battent de la queue) ou passive (se laissent glisser) de leur nage.

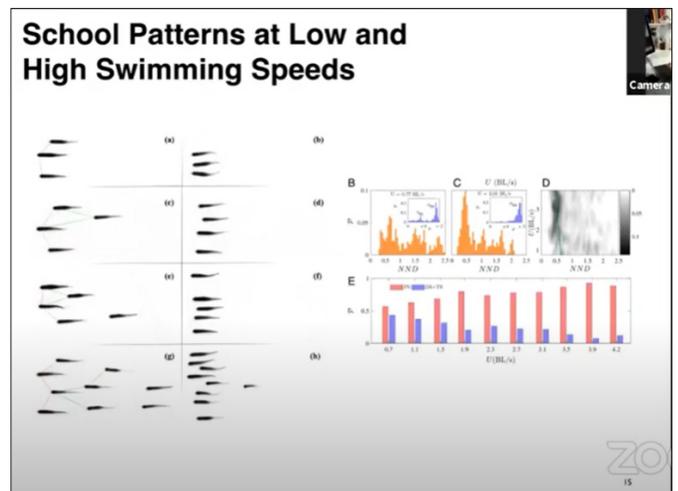
Des calculs sont générés pour caractériser cette nage expérimentale. La même simulation est ensuite réalisée pour vérifier l'exactitude des calculs.

De ces premières constatations naissent plusieurs questionnements au sein de l'équipe, dont l'éventuelle optimisation de la nage selon la vitesse d'écoulement. Pour étudier cette possibilité, l'une des solutions serait de mesurer le taux d'oxygène consommé par le poisson en fonction de sa vitesse. Cela implique de réaliser des mesures fines des mouvements ce qui est très difficile à faire expérimentalement. Il est plus simple de mener cette analyse par la physique.

Les résultats de cette étude permettront plusieurs interprétations sur les interactions entre individus mais au chercheur de garder la bonne distance dans son interprétation car l'un des travers fréquemment observé dans ces études, est la tendance à l'optimisation des résultats alors que dans le réel la nature n'est pas parfaite ni optimale car répondant à plusieurs fonctions.



Tunnel d'écoulement



Pour comprendre le vivant et mesurer la distance entre les poissons plusieurs expériences sont nécessaires pour faire des statistiques et conclure.

C – AJUSTER LES DIFFÉRENTES INTERACTIONS DE PARAMÈTRES AUX RESSOURCES DISPONIBLES.

Intitulé de la recherche : Modèle systémique de la production agricole

Pétros Chatzimpiros, chercheur au Laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (LIED) et maître de conférences en géographie à l'Université Paris-Diderot.

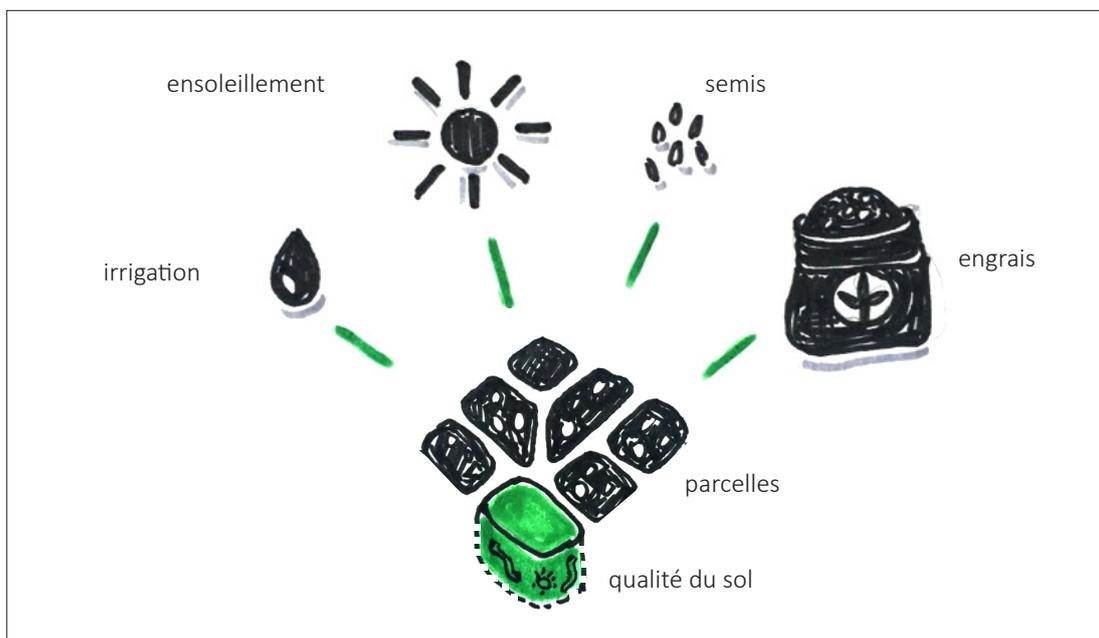
Le laboratoire LIED (laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain) regroupe entre cinq à six disciplines autour de physiciens, biologistes, historiens, sociologues et géographes. C'est un espace privilégié de mise en parallèle de leurs recherches pour faire émerger de nouvelles idées et créer des analogies.

Le but des modèles de Pétros Chatzimpiros est de quantifier la production possible, sous quelles conditions, avec quel apport de pollution pour l'environnement et de combien de ressources fossiles cela dépend. Il met en place des outils mathématiques dynamiques permettant de quantifier et de voir l'évolution au cours du temps du point vu quantitatif et qualitatif. En plus de cela, il intègre à ses calculs des bilans de biomasse, des bilans de ressources mobilisées et transformées par l'agriculture.

Malgré tous ces éléments, il cherche à rendre ses modèles simples. Pour les rendre fonctionnels et lisibles par tous, il simplifie au maximum les modèles mathématiques et minimise le nombre de variables en intégrant plusieurs sous-variables.

Si l'on prend le cas de l'agriculture, la culture d'un champ de blé a par exemple une productivité à l'hectare d'une à dix tonnes selon ce qui est produit et la manière de produire. La variable productivité de l'agriculture inclut une multitude de paramètres tels que l'irrigation, la nature du semis, la spécificité du sol et sa qualité, la quantité d'engrais, l'ensoleillement de la parcelle.

Cet ensemble de données se combine, au sein de la variable «productivité» . Le résultat dépend des sous-variables définies au préalable.



Exemple d'une variable productivité avec ses sous-variables.

Ces variables interconnectées les unes aux autres font émerger les grandes lignes du système. Réduire la complexité à quelques variables majeures facilite la compréhension du modèle et son pilotage. Il devient alors possible de l'analyser, de déterminer et d'agir aisément sur les différents éléments.

Modélisant des systèmes agroalimentaires, Pétros Chatzimpiros intègre dans ses recherches l'analyse des flux de nutriments et d'énergie dans une perspective de transition biogéochimique et écologique. Sa différence fondamentale avec le reste de la profession est de définir en tout premier lieu les limites de production avant de se projeter dans le futur. Si l'on s'interroge à quantifier la capacité nourricière de la planète, il détermine avant tout la limite biophysique qu'il est impossible de dépasser et les contraintes du nombre de surfaces cultivables. Ensuite cette capacité dépend de ce qui est mis en place, en combien de temps, avec quels types et quantités d'irrigation et d'engrais pour les plantes.

Avec cette contrainte de base, les décisions et choix de produire plus ou moins, différemment sont forcément en adéquation avec la planète. La production étant limitée, elle conditionne la possibilité de satisfaire une demande. Aborder les questions par le biais des limites diffère complètement des modèles habituellement utilisés qui sont pour la plupart basés sur une logique économique qui vise avant tout une rentabilité sans se soucier de la manière d'y parvenir et de la matière disponible.

Ainsi les limites de la problématique étudiée, les limites d'un système, sont clairement prises en compte et aident à une prise de décision. Le modèle ne prédit pas que l'on va atteindre les limites d'un système mais expose ses limites comme des contraintes fixes.

Ce type de modèle permet une prise de conscience des éléments lors de décision et offre la possibilité de rapidement comprendre l'incidence du manque d'une des variables. Si l'on retire l'énergie fossile, quel est l'impact sur la quantité de production ? Réduire les émissions d'effet de serre coûterait donc à la production dans une mesure quantifiable.

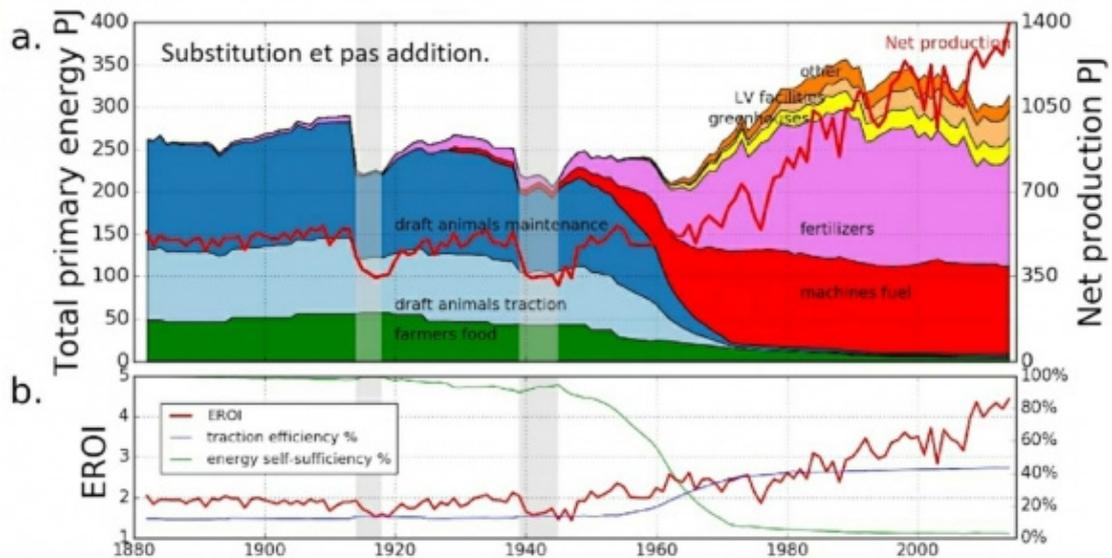
Les modèles de Pétros Chatzimpiros bien que simplifiés restent des outils scientifiques complexes à appréhender pour des non connaisseurs. Ils sont alors simplifiés de nouveau pour les vulgariser. Ils sont alors communément appelés des « toy modèles ». Ils décrivent un phénomène avec très peu de variables pour rester facilement compréhensibles. Ces résultats n'induisent pas en erreur car ils restent transparents dans leur fonctionnement.

Avec ces modèles clairs dont les variables sont modulables, le décideur découvre le pouvoir de choisir en connaissance de cause. Il accède à une décision plus éclairée et prise sur une base très différente de son habitude, le rapport au prix. Le modèle devient connaissance, pouvoir.

Actuellement ce type de modélisation intervient dans les décisions géopolitiques. Si par exemple nous souhaitons ne plus avoir de lien avec la Russie, il est nécessaire de réduire l'énergie utilisée, par conséquent la production va baisser. Le modèle peut éclairer sur la décision économique ou géopolitique à prendre.

Comme toute recherche scientifique, ce modèle soulève des questions. Pour être efficace, le modèle doit garder une vision systémique afin d'anticiper les répercussions du changement et non de réagir en urgence. Mais anticiper de manière holistique reste malheureusement illusoire note Pétros Chatzimpiros.

Exemple de ses modélisations.



Transitions énergétiques et efficacité de l'agriculture au cours du temps (Harchaoui et Chatzimpiros, 2018)
 L'énergie utilisée pour les animaux (bleu clair et foncé) et la nourriture des fermiers (vert) a été massivement remplacée par les fertilisants (violet) et le fuel (rouge). (« EROI » : représenté en partie basse du graphique est un indicateur de retour sur investissement de l'énergie)- <https://grainesdemane.fr/pas-de-petrole-pas-de-nourriture/>

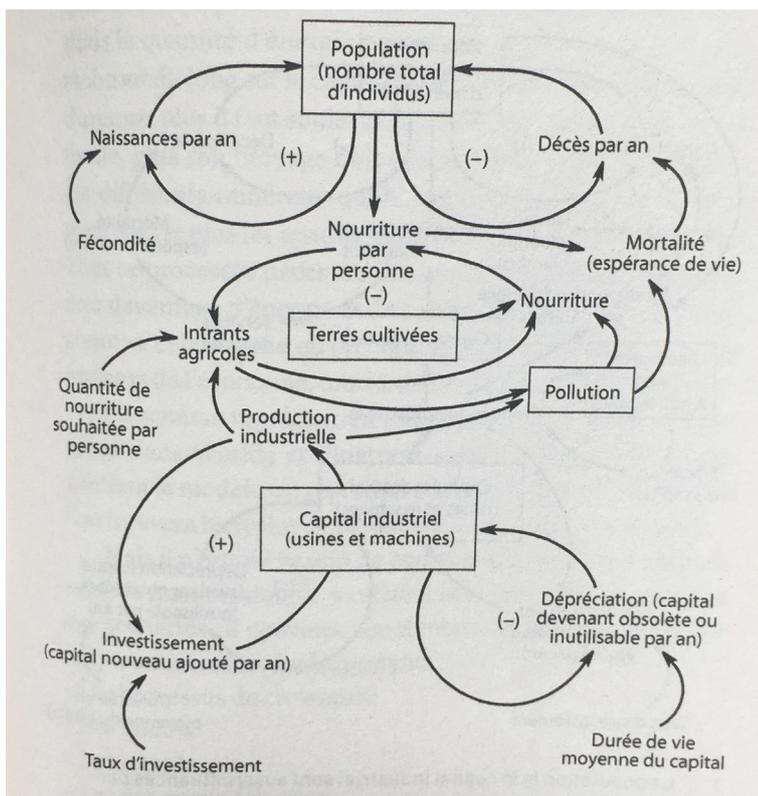
D – RECHERCHE D'UN SYSTEME GLOBAL HARMONIEUX ET RESPONSABLE.

Intitulé de la recherche : Modèle dynamique des systèmes : World 3

Thibaut Faucon, initiateur et responsable du programme Transition systémique, coordinateur «Approche systémique & Stratégies de résilience territoriale», ADEME.

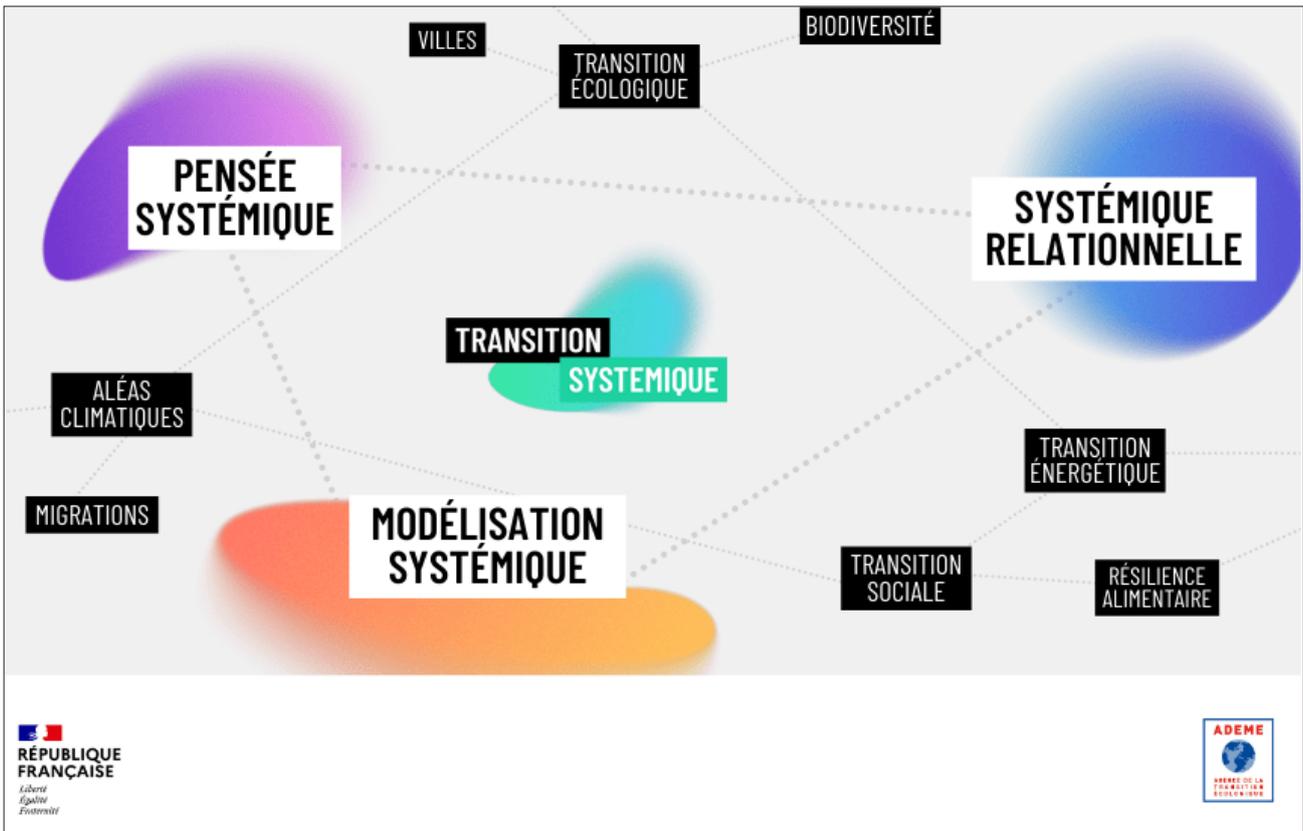
World 3 est un modèle de simulation informatique. Il est issu de la continuité du modèle innovant World 1 publié en 1972 dans un rapport communément appelé le rapport Meadows. Cette recherche sur « Les limites de la croissance » imaginée par Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers et William W. Behrens III, est une commande du Club de Rome. Ce groupe de réflexion se constitue en 1968 autour d'hommes venant principalement de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économique) souhaitant appréhender l'évolution du monde dans sa globalité et tenter de cerner les limites de la croissance. Cette étude est commandée à une équipe de recherche du MIT (Massachusetts Institute of Technology). Leur but est de trouver les lois de base qui régissent la croissance de la population et de la consommation matérielle. Ils s'intéressent surtout au comportement des variables et à la façon de les relier entre elles. Au nombre de quelques dizaines, elles englobent la population globale, puis par individu la superficie cultivable, les ressources naturelles restantes, le quota alimentaire, la production industrielle, le capital industriel global, le niveau de pollution, etc... Leur lecture a permis d'imaginer 13 scénarii de futurs possibles pour la planète. Certains sont désirables, soutenables, d'autres envisagent un monde dépassant les limites si rien ne change et l'ensemble repose sur les lois de la physique. Ces travaux, traduits en 35 langues, sont remis à jour en 1992 puis en 2004 suscitant un certain intérêt mais aucun changement.

Ce type de modèle repose sur une multitude de données et des calculs mathématiques divers fondés chacun sur des hypothèses différentes qui doivent être comprises et gardées à l'esprit pour une analyse juste. Ces données sont agrégées, formant des variables qui, transcrites dans un format commun créent un ensemble relié à de multiples dossiers.



Graphique de boucles de rétroaction de la population, du capital, de l'agriculture et de la pollution, extrait du livre les limites de la croissance avec sa légende :

Certaines des interconnexions entre la population et le capital industriel se produisent via le capital agricole, les terres cultivées et la pollution. Chaque flèche indique une relation causale qui peut être immédiate ou différée, importante ou limitée, positive ou négative selon les hypothèses présentes dans chaque modélisation.



L'ADEME, Piloter et naviguer dans la complexité. Avec le soutien de Dennis Meadows

Actuellement, l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) s'associe à l'Institut Paris Région Urbanisme et au GREC (Groupe régional d'études sur les changements climatiques et leurs impacts environnementaux) pour étudier la possibilité d'élaborer un modèle de système dynamique sur la base du World 3 sur la région Île-de-France. Il s'agit d'une réflexion globale sur l'approche systémique et la résilience comme source d'inspiration pour les politiques publiques. Une équipe pluridisciplinaire travaille à une modélisation analytique par anticipation pour comprendre comment le système va réagir à l'évolution du climat et tenter de proposer des solutions pour l'appréhender et s'organiser.

L'étude permettra d'expliquer scientifiquement les changements climatiques en cours en Île-de-France, d'anticiper les évolutions climatiques à venir au cours du XXI^e siècle pour la Région et d'en tirer les actions nécessaires à entreprendre. L'Institut Paris Région Urbanisme, à l'initiative du projet, apportera ses analyses des volumes de matière et d'énergie consommés par le métabolisme francilien et la connaissance de leur provenance.

Ce projet naît à la suite du constat de la forte dépendance de la région parisienne aux flux extérieurs à l'Île-de-France et même étrangers, et dont seulement 10 % sont recyclés.

L'organisme souhaite proposer une modélisation dynamique pour étudier l'évolution de ce métabolisme francilien dans le temps et en faire un outil d'évaluation des politiques publiques. Ce modèle permettra de comprendre l'évolution du système, de lire ses réactions en fonction d'actions mises en place, de jouer sur les différentes variables pour trouver celle qui agira sur le système dans le temps et de vérifier si cela est en phase avec le schéma directeur des objectifs politiques.

La modélisation dynamique des systèmes est très intéressante même si elle n'est qu'une représentation biaisée de la réalité. Elle permet d'appréhender un ordre de grandeur, une évolution dans le temps impossible à concevoir avec les analyses statiques communément utilisées.

Pour construire ce modèle, la difficulté est d'identifier les variables structurantes et d'avoir à disposition des bases de données. Pour le rapport Meadows initial, les chercheurs n'avaient pas toutes les données mondiales nécessaires pour construire le profil de leurs variables. Certaines n'étaient construites que sur les données américaines. Les variables étant très macro et agrégées cela restait pertinent. À des échelles plus micro et régionales cela peut devenir gênant et il faut garder cette limite en tête lors d'extrapolations.

L'expérimentation de la modélisation permet d'identifier les variables les plus influentes dans l'évolution du système, celles sur lesquelles il sera efficace d'agir et les variables secondaires à retirer pour clarifier la compréhension. Un compromis est à trouver entre la précision et l'intelligibilité. Avec cinq à six macro-variables comptabilisant la population, la production industrielle, l'agriculture, la production de services, la pollution et environ cent sous-variables, le modèle met en perspective la trajectoire de ces variables et permet d'en tirer des interprétations.

L'objectif du modèle est de sensibiliser les décideurs à un nouveau paradigme, faire des projections à long terme et d'aider à la prise de décision. Il rend l'outil compréhensible par le plus grand nombre par la création d'un modèle simplificateur du modèle plus complexe. Si l'outil est validé, il sera développé et affiné.

Que les sujets d'étude de tous ces modèles soient un simple élément, des particules interconnectées ou un système global, ils possèdent tous des limites structurelles et des biais liés à leur usage. Que retenir de ces modèles ?

⁸Jean-Marc Jancovici, *Rapport du Club de Rome –Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers et William W. Behrens III -1972*, 1^{er} novembre 2009.

<https://jancovici.com/recension-de-lectures/societes/rapport-du-club-de-rome-the-limits-of-growth-1972/>

⁹Dennis Meadows, #77 - *La fin de la croissance ? - DENNIS MEADOWS L'auteur du fameux rapport «The Limits To Growth» fait le point, 50 ans après...*, Podcast Sismique, 2 novembre 2021.

<https://www.sismique.fr/post/77-la-fin-de-la-croissance-dennis-meadows>

PARTIE 3

**ESSENTIELS ET
POURTANT SI
IMPARFAITS**

A - L'ABSTRACTION PAR LA SIMPLIFICATION OU LE RISQUE D'ISOLEMENT DU PRINCIPE

Regarder une aile de libellule comme une particule amène à la simplification et à isoler un élément.

Pour comprendre l'évolution d'une espèce, il est nécessaire de l'extraire de son environnement et de la simplifier. Les résultats seront ensuite replacés dans le contexte de l'espèce pour comprendre ses interactions avec le reste du vivant. Ici l'étude s'intéresse aux ailes des libellules de façon mécaniste. Elles sont étudiées telle une particule, une cause produisant un effet. Pour créer un modèle de compréhension, il est impossible de tenir compte de tout, car cela reviendrait à prendre en compte toutes les interactions de la libellule avec chaque élément du vivant qui, lui, interagit avec un autre. Sans limite, nous finirions par représenter l'ensemble de l'univers.

Par praticité et pour pouvoir servir d'outil, l'étude d'un modèle doit être simple. Jean Mawhin compare cette simplification du modèle à une caricature⁵. L'art de trouver le trait juste, celui qui représentera le mieux la réalité. Car lorsque trop de paramètres sont pris en compte, le modèle devient incompréhensible ou même incalculable. Alors il ne renseigne sur rien et perd toute fonction. Faire une bonne modélisation n'est pas donné à tous, elle dépend des facultés d'une personne, de sa capacité à choisir les bons outils et de sélectionner les bonnes données.

Les glissements des modèles de compréhension vers des modèles d'action sont fréquents.

Si cette aile de libellule est reproduite et devient un objet technologique, que laisse-t-elle de côté ? La libellule a une façon particulière de voler. Ses ailes peuvent battre de manière asymétrique ou groupée et ainsi avancer en avant et en arrière, sur les côtés, faire des accélérations et inverser subitement son vol. Des chercheurs très intéressés par ses mécanismes travaillent sur une libellule drone.¹¹ Celle-ci pourrait effectuer des missions de surveillance ou de pollinisation.¹² Pour fonctionner, ce drone nécessite de l'électronique, des capteurs et un certain nombre de matériaux rares. Il ne prend en compte ni la chimie de la nature ni la façon de produire de l'énergie, ni les services écosystémiques dispensés par une libellule. Cette technologie ne répond pas à un système naturel composé de flux d'énergie, de matière et d'information tel que le décrit le projet KARIM (Knowledge Acceleration and Responsible Innovation Meta-network).¹⁰



Le drone-libellule déploie ses ailes au salon du Bourget 2017- PME française SilMach.

Alors même que les calculs et les modèles issus de cette étude sont biaisés par une simplification à l'extrême de la particule et une incapacité de nos outils à reproduire la complexité du réel (incapacité des machines à reproduire le vol en 8 par exemple), ses technologies sont utilisées sans retenue et sans soucis de leur impact sur le vivant. Elles sont pour la plupart polluantes par leur fabrication ou en raison de leur usage ou à cause de la fin de leur vie. Cela nous échappe totalement. Lorsque nous utilisons de telles technologies, nous occultons toute connaissance de leur origine. Nous sommes à notre tour déconnectés de la réalité.

Comment les technologiques pourraient-elles être plus sobres et s'inscrire dans un cycle naturel plus responsable et peut-être devenir régénératives ? Comment pourraient-elles nous rendre compte de leurs impacts ? Faut-il une instance autoritaire pour décider de l'utilité de ces nouvelles technologies pour l'humanité ?

Par ailleurs, si cette technologie vient résoudre un problème de pollinisation qui à son tour va poser un problème de pollution, est-elle la bonne solution ? Le bon sens nous indiquerait plutôt la sauvegarde des espèces animales et végétales naturelles dont la pollinisation est inhérente à leur vie. Ne faudrait-il pas réfléchir à un nouveau modèle agricole pur de pesticides ? Si cette technologie est nécessaire pour soutenir une économie et donc une société, vers quel futur nous orientons-nous ? Ces technologies seront-elles utiles demain si l'énergie vient à manquer ?

Les modèles de compréhension simplifiés ne nous posent aucun problème tant qu'ils restent de l'ordre de la recherche. En revanche, leur application demande une rigueur morale et une attention au monde importante. Une croyance généralisée aujourd'hui comprend la technologie comme bénéfique pour tous et pouvant tout résoudre. Si en effet elle peut apporter beaucoup, elle est aussi très polluante et ne répond qu'à un problème précis en un lieu précis. Elle ne règle pas de problème systémique puisqu'elle est déconnectée de la réalité et ne repose sur aucune éthique acceptable.

⁵Jean Mawhin, «Les Modèles mathématiques sont-ils des modèles à suivre ?» *Collègue de Belgique*, conférence à l'Académie royale de Belgique, 9 mars 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=Nq0fyqs5Kac>

¹⁰KARIM - Knowledge Acceleration and Responsible Innovation Meat-network, 2015. https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/09/Guide_Biomimicry_Karim.pdf

¹¹Yann Matarin, *Bientôt des micro-drones de moins d'un gramme grâce à une technologie révolutionnaire*, 22 juin 2017. <https://www.capital.fr/entreprises-marches/bientot-des-micro-drones-de-moins-d-un-gramme-grace-a-une-technologie-revolutionnaire-1233928>

¹²Olivier Hertel, «La Libellule cyborg, nouvel auxiliaire de l'homme ?», *Sciences et Avenir*, 2 février 2017. https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/ceci-n-est-pas-une-libellule-mais-un-drone_110272

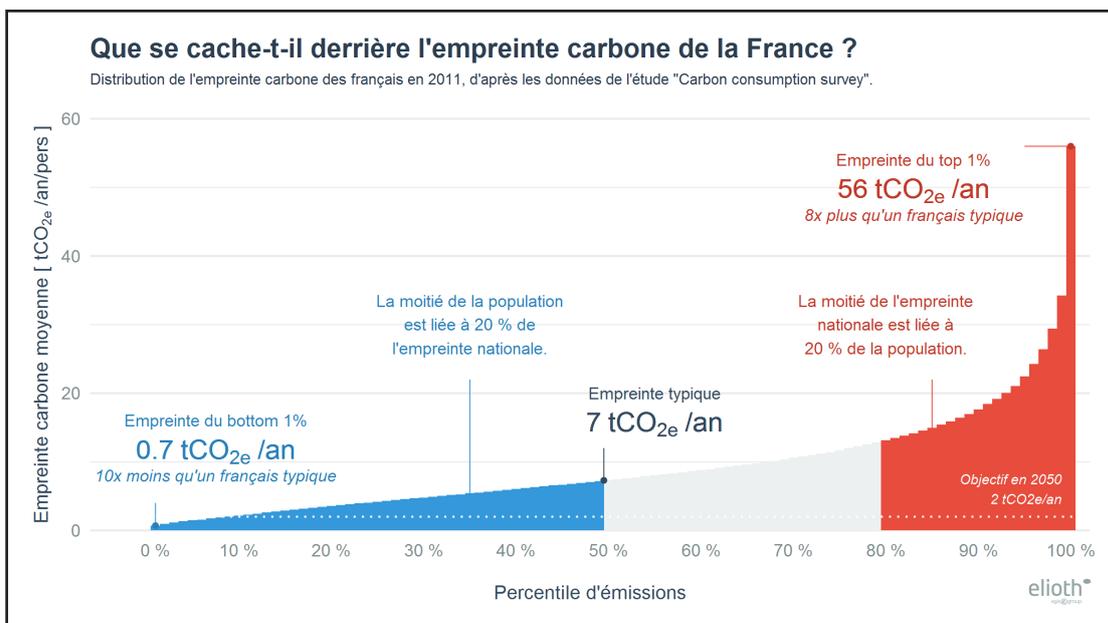
B – LES OBSTACLES DE LA MODÉLISATION ET DE L'INTERPRÉTATION DU VIVANT

L'étude des interconnexions et comportements des poissons dépend de nombreux paramètres car l'action de chaque individu étudié varie en fonction du climat, de ses proies et de ses prédateurs, de sa forme physique, de son âge... Une même cause ne produit pas le même effet. Ainsi le comportement individuel et en banc sont toujours changeants. Comprendre et mesurer le vivant n'est pas simple.

Les poissons ne se regroupent jamais de la même manière, ni ne forment le même motif. Le comportement des poissons ressemble à une forme à géométrie variable, s'amplifiant ou s'amenuisant, elle montre une certaine élasticité. Pour mener cette étude, les poissons sont vus comme des particules. Un individu est isolé et étudié puis associé à un autre puis à d'autres individus jusqu'à l'ensemble du banc. Ainsi leurs interactions sont étudiées en fonction du comportement d'une particule et son interaction avec son milieu. Ensemble, ces particules se regroupent sous certaines conditions. De ses phénomènes de groupe résultent de multiples résultats liés à l'imprévisibilité de la réaction d'une particule vivante à prendre en compte obligatoirement. Seul l'usage d'un modèle mathématique, les statistiques, permet d'avoir une compréhension globale des phénomènes en croisant l'ensemble des possibles. Est-ce une interprétation conforme au réel et utilisable, fiable ? Un modèle mathématique est-il bon à suivre ?

Dans notre imaginaire collectif, un modèle mathématique est forcément neutre. Comme l'impose la définition du Larousse il exclue toute incertitude, toute inexactitude. Le modèle est, lui, défini comme un guide, une chose bonne à suivre, à imiter. Un modèle mathématique devient alors un idéal à imiter, indiscutable, une vérité absolue. Pouvons-nous dire que suivre un modèle mathématique conduirait à la perfection ?

Prenons en exemple une étude statistique de l'empreinte carbone des Français en 2011.



Que se cache-t-il derrière l'empreinte carbone française ? Données de l'étude <http://carbonconsumptionsurvey.eu>
[https://twitter.com/f_pouchain/status/1206690124068802561-](https://twitter.com/f_pouchain/status/1206690124068802561)

Nous voyons dans ce graphique qu'un français consomme en moyenne 7 tonnes de CO2 équivalent par an. Nous pouvons remarquer que 5% de la population émet beaucoup de CO2 dans lesquels 1% consomme jusqu'à 56 tonnes de CO2e/an. Nous pouvons estimer que 5% de la population française tire la moyenne générale vers le haut. Quelle serait la quantité réelle produite par les 95% de français plus sobres ? Retirons les 5% de la population les plus émetteurs ainsi que leurs émissions et calculons la nouvelle moyenne.

En 2011, la population française était de 65,34 millions.

Les émissions totales en France sur l'année étaient de 65,34 millions x 7 = 457,38 tCO2e.

Si nous retirons les 5% les plus pollués, nous obtenons 62,1 millions de français.

Le total des émissions CO2e des 5 % français les plus pollués est de 181 tCO2e (56 tCO2e + 5 x 20 tCO2e + 5 x 10 tCO2e / 2).

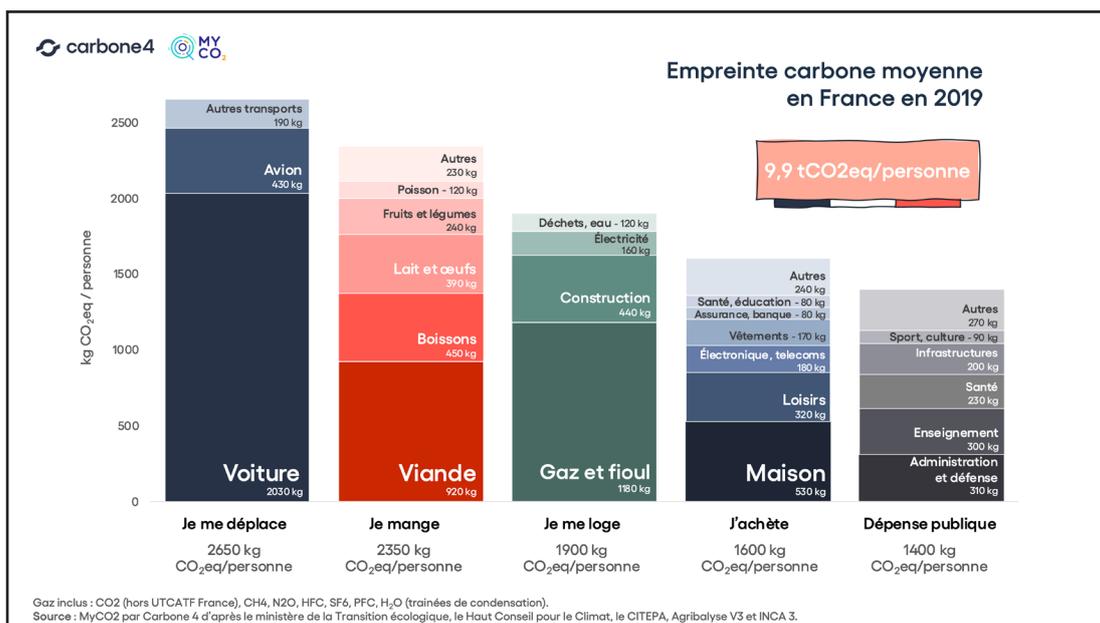
Donc 62,1 millions de français émettent au total 457,38 – 181 = 276,38 tCO2e

Ce qui équivaut à 4,4 tCO2e en moyenne pour un Français alors que le graphique indique une moyenne de 7 tonnes.

Nous voyons qu'une fraction de la population impacte fortement la moyenne, puisque 95% des français émettent seulement 4,4 tCO2e et non 7 tCO2e. Selon le recul pris face à ces résultats, l'analyse n'est pas la même.

Si le raisonnement est faux, qu'en est-il des données initiales et de la comptabilisation des émissions totales émises en France ? Pouvons-nous douter de leur exactitude ?

Récemment l'agence carbone 4 invalidait les résultats annoncés par le Ministère de la Transition écologique en octobre 2021. Le Ministère n'aurait pas pris en compte tous les gaz à effet de serre, la déforestation importée et les traînées de condensation des avions. Ainsi l'agence passe les 9,0 tCO2e par personne à 9,9 tCO2e. Ceci montre qu'il faut être vigilant et méfiant face aux résultats et à leur mode de calcul. Si la base de données de départ n'est pas bonne, cela impacte les résultats.



MyCO2] Article- Empreinte carbone française moyenne, comment est-elle calculée ?- 11 JANVIER 2022-
<https://www.carbone4.com/myco2-empreinte-moyenne-evolution-methodo>

Si nous revenons au banc de poissons qui se regroupe en vortex, cela n'est pas systématique. Cette forme de regroupement dépend fortement du nombre de poissons dans le bassin en plus des autres paramètres. Donc lors de la lecture des résultats statistiques, ces nuances doivent être apportées.

Robin George Collingwood (1889-1943), philosophe et historien du début du XX^e siècle, nous incite à la méfiance face aux modèles préexistants. Utiliser un modèle ou un système de calcul, par habitude, peut-être risqué et inadapté.

Un modèle est un système de règles, de questions qui s'imposent à un sujet de réflexion. Prendre un modèle créé pour répondre à une question antérieure empêche d'apprécier la particularité de la situation à étudier. Celle-ci pourrait tout aussi bien être traitée différemment avec d'autres questionnements. En utilisant une base toute faite, nous n'interrogeons que les éléments que nous connaissons déjà et ne sommes ni créatifs ni adaptatifs. Ces reproches sont applicables aux règles dès le XVII^e siècle car elles ne sont pas accompagnées de cette intelligence qui seule peut juger des règles à appliquer dans une situation très précise. Les modèles normatifs mènent à une forme d'aveuglement de la réalité.¹³

Les équations différentielles mènent au déterminisme et donnent une vision figée du monde. Les probabilités ou les statistiques offrent plus de possibilités mais Franck Varenne, épistémologue, les considère comme une approche métaphysique fautive.⁴ Pour se prémunir de ces biais et en avoir conscience, la solution est de connaître parfaitement les imperfections de chaque outil, de savoir de quels courants de pensées ils émanent pour être capable de réajuster leurs résultats. Entretenir sa culture de l'histoire des sciences est indispensable.

Le choix, la création ou l'interprétation d'un outil mathématique n'est donc pas neutre. Tout dépend du jugement d'une personne qui elle-même est nourri de la philosophie d'une société, de son éthique. Les conséquences d'une mauvaise interprétation de résultat peuvent-être graves, surtout lorsqu'il s'agit de juger des personnes.

Appliquées aux hommes au début du XIX^e siècle, les statistiques ont produit de lourdes erreurs. Les humains ont été mesurés tel des particules pour comprendre et systématiser des phénomènes de société. Par exemple, les pauvres sont analysés comme des dégénérés alcooliques par nature comme l'explique Alain Supiot.⁶ Plus tard des projets eugénistes émergent avec l'envie d'améliorer l'espèce humaine par la sélection génétique, d'Alphonse Bertillon (1853-1914) le criminologue français, développant ses typologies de bonnes personnes et de criminels jusqu'à la purification ethnique nazie.

Nous voyons ici qu'il est d'une part peu aisé de créer un modèle du vivant et de ses interactions car ces dernières dépendent de nombreux paramètres et que leur modélisation et analyse sont indissociables de nos connaissances et de notre sensibilité.

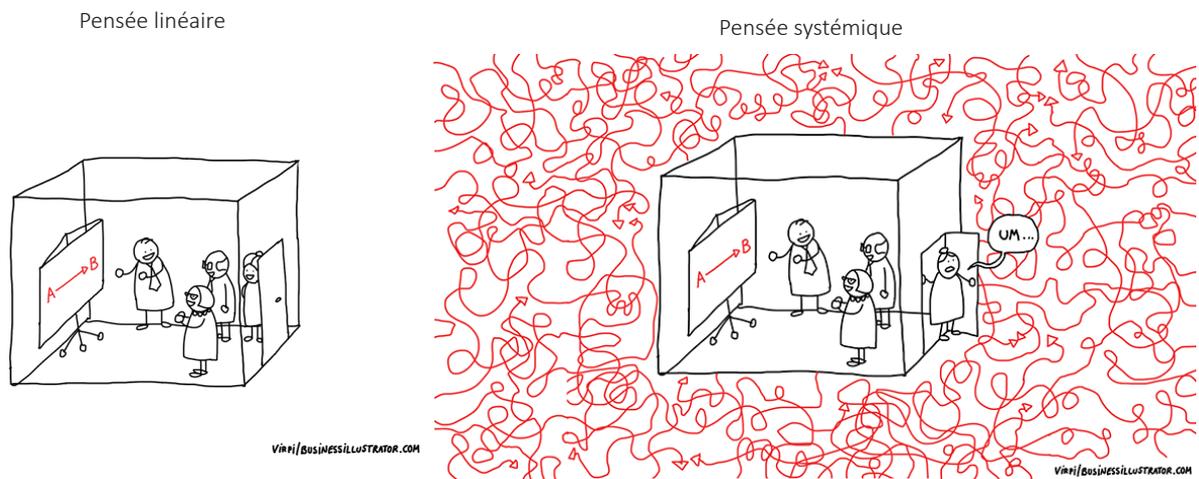
⁴ Franck Varenne & Frédérique Aït-Touati, «Les Modèles, ce qu'ils sont, d'où ils viennent et ce qu'ils font», *Modélisation et soutenabilité*, Séminaire Soutenabilités, France stratégie, 2020-2021.

⁶ Alain Supiot, *La Gouvernance par les nombres*, Fayard, 2015.

¹³ Robin George Collingwood, «*Toute histoire est histoire d'une pensée - Autobiographie d'un philosophe archéologue*», Epel, 2010.

C - VERS UNE NOUVELLE DONNÉE RÉFÉRENTE : LA RESSOURCE DISPONIBLE.

Les simulations dynamiques cherchent à nous reconnecter avec les réalités et à prendre en compte un maximum de données pour montrer leurs interactions. Ils sont des aides à la décision. Ces modèles permettent des projections ce qui nous offre la possibilité de quitter les modèles prescriptifs et les analyses trop linéaires. Mariana Mirabile, économiste à l'OCDE travaillant autour de la systémique, critique notre façon de résoudre les problématiques en les divisant toujours en particules séparées. Cette façon de faire ne s'adapte plus à nos sociétés complexifiées où des opportunités de solutions se trouvent dans les interconnexions.¹⁴



De plus nous prenons aujourd'hui conscience que nos problèmes systémiques sont reliés aux écosystèmes terrestres. Les plus petits et invisibles organismes dans nos sols fertilisent les océans, régulent le cours des rivières et modifient le climat comme le démontre Marc-André Selosse (né en 1968), biologiste et professeur au MNHN.¹⁵ Malheureusement notre monde mathématisé nous maintient dans une forme d'aveuglement. Après-guerre, l'économie plonge dans une optimisation maximale qui nous éloigne progressivement des réalités de la nature.

Face à des nombres, nous cherchons une rentabilité et avons petit à petit transformé notre terre en machine. Avant cela, nous étions à l'écoute de la nature et lui étions liés par l'intermédiaire de notre agriculture. Nous en avons tiré une surexploitation et créé l'élevage intensif d'animaux.

Notre agriculture ne profite plus des mécanismes et des cycles naturels. Ceux-ci n'étaient pas assez rapides ni assez rentables dans leur production et nos terres cultivables étant limitées, nous avons trouvé la solution des engrais synthétiques. Tels des apprentis sorciers, nos solutions modernes devaient nous aider à dépasser les facteurs limitants de la croissance naturelle tels l'azote ou le phosphore nécessaires à la croissance des plantes.

Nos productions s'abstraient progressivement des contraintes des sols, de la faune, des haies, et utilisent des semences génétiquement modifiées pour être plus résistantes et plus productives. La monoculture que nous avons multipliée est plus aisément attaquée par les nuisibles et nécessite des pesticides toujours plus élaborés.

Un modèle vient se superposer à un autre, posant à son tour un nouveau problème. La nature est toujours vue comme un obstacle, affirme Dominique Bourg (né en 1953), philosophe spécialiste des

questions environnementales. La culture hors-sol et hors-vivant nous a permis de totalement nous extraire du vivant.¹⁶

L'agriculture est poussée à bout par notre modèle économique. Ce modèle simple à utiliser est devenu un modèle dominant, un top modèle d'après Franck Varenne, normatif et prescriptif. Malheureusement il n'est plus adapté et ne correspond plus à la réalité. Trop anthropocentré, ce modèle se fixe des objectifs fictifs, nécessitant un surplus de production dont personne n'a besoin. Ce modèle ne tient pas compte des limites planétaires. Nous consommons et épuisons sans raison notre Terre.

L'objectif du modèle de simulation de Petros Chatzimpiros est de changer le regard et de rendre compte des interactions, des portées de nos actions et de les reconnecter avec les réalités de ce que la nature peut réellement offrir. Ainsi en donnant des éléments de décision aux élus, ce système met à leur disposition le pouvoir de rompre avec le tout puissant PIB, son rendement et le prix comme unique élément pivot.

S'il est urgent de reconsidérer nos sols, d'adapter nos pratiques, il est essentiel aussi de garder à l'esprit comme le rappelle Marc-André Selosse que si le labour, les pesticides et les engrais ont été mis en place, c'est aussi pour supprimer les famines, en occident principalement.¹

Ce modèle qui comptabilise les émissions CO2 pourrait-il aider à tenir davantage compte de l'état des sols, de la biodiversité ? Une étude de l'IUCN (Union internationale pour la conservation de la nature) estime que la forte diminution de la biodiversité dans les sols serait responsable d'une perte économique de 10 % de produit brut mondial annuel et à 25 % d'ici 2050.¹⁷

Ce modèle pourrait-il inciter à la mise en place de polyculture-élevage et à revaloriser les agriculteurs ? L'agriculture saurait-elle anticiper les évolutions du climat en ajustant très en amont les espèces cultivées selon son territoire ? Est-il envisageable d'imaginer un système limitant les pesticides en dédommageant les agriculteurs et les filières qui dépendent de cette biomasse ? Un monde futur, énergétiquement contraint, imposera la question de la répartition de la biomasse. Comment se prémunir de l'envie d'un agriculteur de cultiver de la biomasse pour des besoins énergétiques plutôt que pour l'alimentaire qui lui procurera certainement des revenus plus faibles ? Les terres cultivables n'étant pas infinies et déjà exploitées pour la plupart, comment pourrions-nous produire davantage ? Allons-nous déforester, utiliser plus d'engrais ou arrêter l'élevage et transformer nos prairies en cultures ? Dans ce contexte, toutes les solutions éthiquement recevables seront à étudier entre nourrir une population ou produire pour une industrie ou sauver la biodiversité et enrichir les sols qui sont des puits de carbone.

Ces modèles scientifiques aident à appréhender la complexité des sujets et à comprendre les effets de vases communicants des variables. Ils exposent la diversité des possibles sur des bases factuelles. Ils aident à forger de nouvelles décisions précieuses pour sortir des débats trop souvent idéologiques.

¹Marc-André Selosse, «Parole aux chercheurs : *La transition écologique ne suffit pas, il faut évoluer.*», *Science et vie*, 13 novembre 2021

¹⁴Mariana Mirabile, *Les Leviers d'innovation systémique pour un système de transport soutenable*, Transition systémique, ADEME, 2021.

<https://videos.lescommuns.org/w/tM4JVBhA7u9CWZqCk2vaVe>

¹⁵Marc-André Selosse, *L'origine du monde*, Actes sud, 2021.

¹⁶Dominique Bourg & Sophie Swaton, *Primauté du vivant, Essai sur le pensable*, Puf.

¹⁷IUCN, *Conserving healthy soils*, 2018.

<https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/conserving-healthy-soils>

D - LES LIMITES DE L'UNIVERSALITÉ DE LA PROJECTION

Les modèles de simulation sont des systèmes en interaction avec beaucoup d'autres modèles. Ils permettent de se projeter dans le futur, de comparer des résultats et d'ouvrir la discussion sur de futures stratégies. Plus évolutifs et rassurants, ces modèles ont également leurs limites. Quelles sont-elles et pourquoi World 3 n'a-t-il pas fonctionné ? Est-il encore pertinent de croire en ce modèle ?

Régulièrement controversés tout au long de l'histoire, les modèles scientifiques sont une interprétation du monde qui divise les pensées.

Conduites par des équipes pluridisciplinaires de pointe comprenant des climatologues, des économistes, des géographes, des sociologues et des anthropologues, ces études utilisent des techniques d'analyse, des modèles mathématiques très différents. Dont des parties de bases données n'existant pas sont estimées et reposent parfois sur un trop grand nombre d'hypothèses et d'estimations dont l'interprétation est délicate. Pouvons-nous faire confiance à de telles structures si complexes avec une telle part d'incertitude?

Les sciences du climat sont un bon exemple car leurs multiples modèles sont très utilisés bien qu'ils contiennent de grands écarts de résultats. En France, il existe le modèle de Météo France (CNRM) et celui de l'Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL). Leurs projections diffèrent. Il nous est alors impossible de nous appuyer avec confiance sur un seul résultat. Le GIEC est friand de modèles différents et estime ainsi arriver à un meilleur résultat. Si nous revenons au banc de poissons, nous pouvons en effet admettre que le résultat statistique sera toujours plus fin si une multitude d'essais sont pris en compte. Il est indispensable de garder en tête ces hypothèses sous-jacentes pour une meilleure interprétation des résultats.

Nos recherches de simulation sont essentiellement centrées sur l'augmentation du PIB et de la population. D'autres hypothèses sont également étudiées, l'intervention d'un gouvernement régulateur ou la prise de conscience de la population ou bien encore le résultat positif de nouvelles solutions technologiques. Il est néanmoins tout aussi nécessaire de prévoir une décroissance, des crises, des pandémies, des guerres ou tout autre événement graves.

C'est pour se défaire de ces idéologies que le rapport des Meadows avait prévu plusieurs scénarii.

Alors que nous réajustons ce rapport existant depuis près de 50 ans, qui s'acharne à démontrer les limites du globe terrestre et d'une consommation matérielle associée à une fictive croissance infinie, rien ne change. Notre vision collective poursuit la trajectoire du scénario « business as usual ». Pour quelles raisons restons-nous inflexibles ? Devons-nous encore croire à ces projections ? Sommes-nous capables de faire des sacrifices ?

Malgré leurs imperfections, les modèles de simulations semblent indispensables pour appréhender le contexte actuel de nos sociétés, nos économies et nos enjeux climatiques. Au début, ce modèle a trouvé un certain écho auprès d'hommes politiques importants dont le jugement a rapidement été remis en cause par les dieux économistes qui de leur côté, n'ont admis que très difficilement que leur système pouvait être inadapté.

Si en 1970 la population des pays riches n'était pas prête, 25 ans après la guerre, se pensant évoluer indéfiniment vers une vie toujours meilleure⁹, il en est autrement aujourd'hui.

Force est de constater aujourd'hui que le système s'essouffle, que le climat s'emballe et qu'une certaine proportion de la population est inquiète. Alors qu'en février 2022 des fondations américaines investissent largement dans la recherche d'écoles prestigieuses comme Harvard University, le MIT, Santa Fe Institute pour ne citer qu'elles, pour réfléchir à une économie alternative²¹, le ministre de l'Économie et du climat allemand, Robert Habeck (né en 1969) relance le débat en janvier 2022 autour

du PIB. Il propose de compléter cette notion d'une trentaine de nouveaux indicateurs, dont le bien-être.¹⁸ Encore faut-il arriver à mesurer ou quantifier celui-ci !

Par ailleurs, le journal Libération et l'AFP publient le 5 février 2022 un triste état des lieux : 94% des français se disent inquiets du dérèglement climatique, 47 % estiment que c'est un enjeu prioritaire, 73 % pensent qu'il serait possible de limiter les effets négatifs du réchauffement climatique, 33% qu'il faudrait changer ses habitudes de vie.²²

Sommes-nous prêts à changer nos modes de vie pour suivre un autre modèle ?

L'homme est imprévisible. Il change de comportement s'il se sait étudié. Frank Varenne parle d'effet placebo et nocebo. L'humain est encore moins prévisible qu'un banc de poissons. Ceci explique qu'entre chercheurs le facteur humain soit communément appelé le FHF, le Fucking Human Factor.

Actuellement des modèles basés sur la théorie du chaos tentent d'intégrer des procédés capables de reproduire une telle variabilité pour modéliser l'incertitude dans l'économie. Néanmoins il sera toujours difficile de prévoir le Printemps arabe ou une crise financière dans un modèle. Si ces émergences sont imprévisibles nous pouvons toutefois tenter de les anticiper pour nous préparer.

Certaines réticences nouvelles apparaissent face à l'incertitude, à la diversité des sociétés et à leur complexification. Pour Frédéric Keck (né en 1964), historien de la philosophie et anthropologue, les modèles ne suffisent pas. Méfiant à leur égard et à leurs prédictions face à la réalité des hommes, il préfère mener des études qualitatives et échanger avec les personnes.¹⁹

L'homme est fondamentalement inadapté à cette temporalité, affirme Dennis Meadows.⁹ Son évolution l'a habitué à agir face à un prédateur mais pas à faire face à des problèmes sur des temps aussi lointains. Rien ne pourra se faire tant qu'il ne changera pas sa vision actuelle du monde, celle d'un être supérieur sur cette Terre, et qu'il restera accroché à l'idée que le progrès est matériel.

Si nous estimons raisonnable de penser des modèles pour l'homme, avons-nous encore le temps de planifier ?

Les transformations économiques et démographiques sont lentes. Cela demande des projections longues comme le rapport des Meadows se projetant de 1900 à 2100. Nos systèmes d'organisation économique, politique ont pris des siècles à se mettre en place, s'affinant au fil du temps pour devenir plus efficaces et résilients malgré une dangereuse complexification. Aujourd'hui, l'ensemble des sociétés dépend d'eux. L'humanité dépend de ses modèles, qui l'enferment. Il est impossible de les changer brutalement, alors qu'il est question d'urgence. Des modèles pourraient-ils nous aider à décomplexifier le système et à nous adapter tout en préservant une forme de résilience ?

Ces simulations et leurs scénarii permettent de donner une visibilité aux besoins et aux solutions tout en créant une prise de conscience auprès des instances gouvernementales. Les conséquences et bénéfiques de leurs actions sont mis en lumière. Il est plus facile de mettre en place une stratégie si les conséquences et impacts peuvent-être estimés sur l'économie, les populations et l'environnement.

L'ambition d'un modèle systémique n'est pas de prédire avec exactitude mais de vérifier l'adéquation de projets en cours aux futurs possibles. Il est un outil scientifique qui vient nourrir des réflexions, des débats et des décisions d'acteurs politiques qui dépendent, eux, des intérêts qu'ils défendent, de leur conception du rôle de l'État, de l'économie et des individus dans la société. Si avec ce modèle World3 des simulations s'adaptent à des territoires plus restreints pour valider ou invalider des stratégies, il aura peut-être plus d'impact et d'écho qu'en tentant d'instaurer un nouvel ordre mondial. Il est permis de douter de son utilité au sein d'entreprises et de sa capacité à intégrer la notion de biodiversité trop souvent oubliée.

Dans ce contexte subjectif et sensible, Adèle Thorens Goumaz (née en 1971), députée au Conseil des États Suisse réaffirme l'importance des contenus scientifiques dans le débat lors de récents conflits entre la politique et la science.²⁰ Ils apportent une aide factuelle à des prises de décision et permettent de se prémunir de débats idéologiques stériles. Ces simulations précisent la nouvelle question fondamentale à se poser pour le bien-être de nos sociétés.

Si cette question posée peut-être la même à travers l'histoire, la réponse ne pourra pas être la même car l'analyse s'ajuste à la situation, à la société à ce moment précis et à ses attentes. Comprendre une réponse nécessite d'étudier l'histoire pour percevoir la situation à laquelle elle a été confrontée. La pensée et les problèmes évoluent.

Robin George Collingwood écrit «(...) Je compris rapidement que l'histoire de la théorie politique n'est pas l'histoire de différentes réponses données à une unique même question, mais l'histoire d'un problème qui se modifie plus ou moins constamment, et dont les solutions changent de ce fait.»¹³ Deux modèles établis pour une même question dépendent de leur situation temporelle individuelle. Il expose cette différence en comparant les deux modèles d'État, la République de Platon (428- 348 av J.-C.) et Léviathan de Thomas Hobbes (1588-1679). Tous deux décrivent un idéal, différent par leur source et leur but. L'éternité était le but suprême pour tous les hommes, de tout âge, de tout pays. Ce fut l'idéal d'une société humaine, une société vue par les Grecs au temps de Platon. Pour Hobbes, les gens avaient changé d'avis sur l'organisation sociale idéale comme sur leur désir. Les idéaux évoluent et la philosophie se trouve face à des tâches différentes.

Un modèle n'est donc pas immuable et malgré ses capacités de projection les données doivent être finement ajustées à leur époque et à leur défi. Nous n'échappons pas à la loi du vivant. Notre évolution est permanente et notre environnement change constamment. Mais contrairement au vivant qui ne sait anticiper et changer des paramètres, l'homme a la capacité de se projeter, d'imaginer et d'adapter ses actions. Mais serait-il capable de s'ajuster aux autres espèces ?

¹³Robin George Collingwood, « *Toute histoire est histoire d'une pensée - Autobiographie d'un philosophe archéologue* », Epel, 2010.

¹⁸Ninon Renaud, « Croissance : la coalition allemande veut aussi mesurer le « bien-être », *Les Echos*, 26 janvier 2022, www.lesechos.fr/monde/europe/croissance-la-coalition-allemande-veut-aussi-mesurer-le-bien-etre-1382250

¹⁹Frédéric Keck, « Covid-19 : Quelle utilité des modèles pour la gestion de crise et pour la prévention des risques ? », *Modélisation et soutenabilités*, Séminaire Soutenabilités, France stratégie, 2020-2021.

<https://www.strategie.gouv.fr/debats/seminaire-soutenabilites-cycle-1-seance-3-modelisation-soutenabilites>

⁹Dennis Meadows, #77 - *La fin de la croissance ? - DENNIS MEADOWS L'auteur du fameux rapport «The Limits To Growth» fait le point, 50 ans après...*, Podcast Sismique, 2 novembre 2021.

<https://www.sismique.fr/post/77-la-fin-de-la-croissance-dennis-meadows>

²⁰Adèle Thorens Goumaz, *Pourquoi ne peut-on pas se passer de l'apport des scientifiques dans l'élaboration des politiques publiques ?*, 2022.

<https://blogs.letemps.ch/adele-thorens/2022/05/20/pourquoi-on-ne-peut-se-passer-de-lapport-des-scientifiques-dans-lelaboration-des-politiques-publiques/>

²¹Michael T. Nietzel, « Leading Academic Institutions Will Receive More Than \$40 Million To Create Centers Challenging Neoliberalism ». *Forbes*, 16 février 2022. <https://www.forbes.com/sites/michaelt Nietzel/2022/02/16/leading-universities-will-receive-more-than-40-million-to-create-academic-centers-challenging-neoliberalism/?sh=363635f74e93>

²²Sondage Ipsos, « Le réchauffement climatique, un enjeu prioritaire pour 47 % des Français interrogés ». *Liberation et AFP*, 5 février 2022

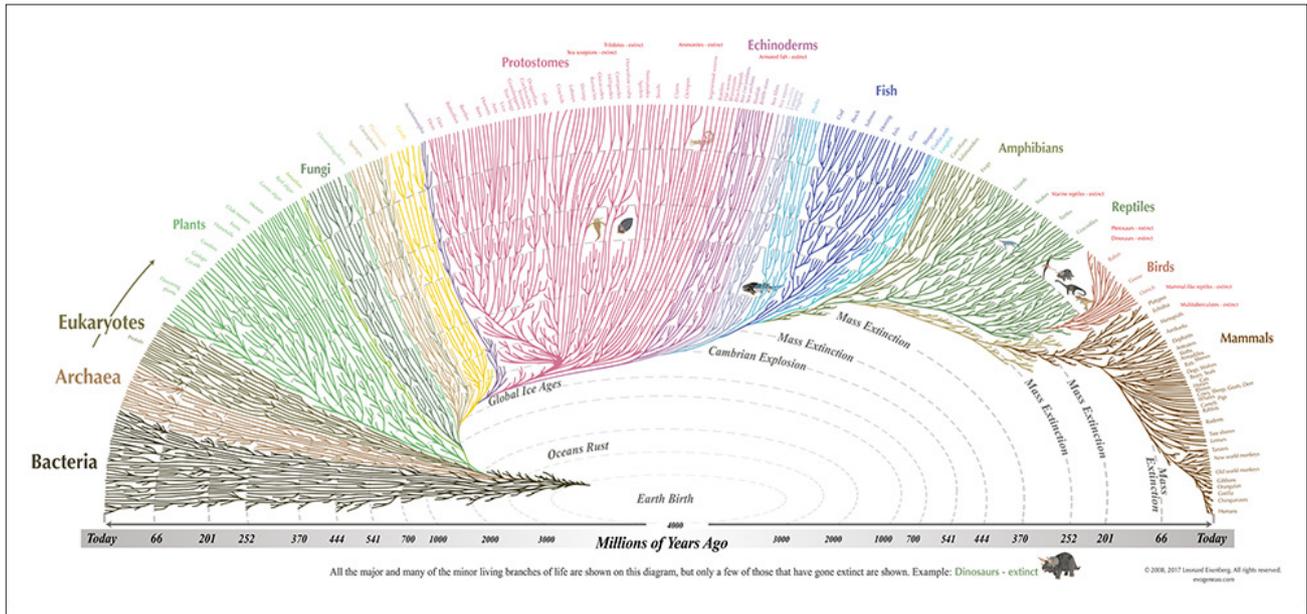
https://www.liberation.fr/environnement/le-rechauffement-climatique-un-enjeu-prioritaire-pour-47-des-francais-interrogés-20220205_L4DWXWI53FE4JF77FA4HNQM4JI/

PARTIE 4

**UN MODÈLE DANS LA
NATURE**

A – LE VIVANT : UN SYSTÈME OUVERT, RÉSILIENT, EN CONSTANT RÉAJUSTEMENT.

Le MNHM estime à 10 millions le nombre d'espèces sur Terre, dont seulement 20% seraient identifiées. La diversité au sein de certaines familles est impressionnante.



10 millions d'espèces en 3,8 milliards d'années d'évolution. <https://www.evogeneao.com/>

Par exemple, environ 6000 espèces de libellules ont été décrites à ce jour. Le super-ordre (groupe souche ou stem group) des Odonatoptera ayant donné naissance aux libellules modernes (Odonata) apparaît au Carbonifère, il y a environ 335 millions d'années. Celles-ci résistent aux extinctions massives de la fin du Permien et du Crétacé et poursuivent leur évolution sous forme d'insectes en changeant de taille mais en ayant acquis leur morphologie moderne très tôt (au Jurassique inférieur). Les scientifiques classent les organismes vivants en groupes hiérarchisés, divisés en règnes, embranchements, classes et ordres. L'ordre des Odonates rassemble toutes les libellules actuelles puis les divise en deux sous-catégories, les demoiselles (zygoptères), et les Epiproctophora (elles-mêmes divisées en libellules (anisoptères) modernes et plusieurs groupes éteints du Mésozoïque, dont les quelques espèces du genre actuel *Epiophlebia* sont les derniers représentants.²³ Leur répartition actuelle n'est pas homogène. Très concentrées dans les régions tropicales, les espèces sont beaucoup moins nombreuses en Europe. Peu adaptées aux périodes glaciaires, elles auraient migré ou disparu pour la plupart de cette région.

Dans le vivant, les espèces entretiennent des interactions complexes et intimes qui les relient entre elles comme l'explique Darwin. Tout changement du nombre d'individu dans l'espèce affecte toutes les autres espèces, et tous sont influencés par le climat.

Elles ne peuvent subsister qu'en co-évoluant, progressivement, en parallèle les unes des autres. Si une espèce migre et rejoint un écosystème, elle trouble les rapports mutuels pré-existants. La nourriture vient alors à manquer. Les espèces en sous nombre disparaissent. C'est le cas par exemple avec les perches du Nil importées dans le lac Victoria bordant la Tanzanie. Cette espèce inadaptée dévore tout l'éco-système du lac et rompt la chaîne alimentaire.²⁵ Elle perturbe l'ensemble du système.

Dans le vivant, toutes les espèces jouent un rôle particulier dans un contexte donné. Toute modification réajustera le contexte antérieur. Un cadre est conçu pour un système. S'il est modifié il faut modifier ce système.

Cela rejoint la réflexion de R.G. Collingwood qui, étudiant la pertinence d'une réponse à une question, suggère de créer un modèle pour une situation précise et de réévaluer constamment la pertinence de la question et de la réponse à laquelle il se réfère.

Nos modèles pourraient s'inspirer des règles du vivant. En 1995 Mahlon Bush Hoagland (1921-2009), biochimiste, décrit la nature comme régie par 16 principes.²⁴ Au même moment Janine Benyules, biologiste, fait ces mêmes constats avec son association Biomimicry 3.8. Si le système prend ses principes en compte, il pourrait fonctionner de manière durable. Comment nos modèles pourraient-ils intégrer ces principes et se régler sur les cycles de la nature ? A quoi cela pourrait-il correspondre ? Serait ce une variable dans un modèle ?

The Sixteen Patterns:	Les 16 règles:
1. Life Builds from the Bottom Up	1. Le vivant construit de bas en haut
2. Life Assembles Itself into Chains	2. Le vivant s'auto-assemble en chaînes
3. Life Needs an Inside and an Outside	3. Le vivant a besoin d'un dedans et d'un dehors
4. Life Uses a Few Themes to Generate Many Variations	4. Le vivant utilise peu de thèmes pour générer de multiples variations
5. Life Organizes with Information	5. Le vivant organise par information
6. Life Encourages Variety by Recombining Information	6. Le vivant encourage la variété en recombinaison des informations
7. Life Creates with Mistakes	7. Le vivant crée par des erreurs
8. Life Occurs in Water	8. Le vivant apparaît dans l'eau
9. Life Runs on Sugar	9. Le vivant roule au sucre
10. Life Works in Cycles	10. Le vivant fonctionne en cycle
11. Life Recycles Everything It Uses	11. Le vivant recycle tout ce qu'il utilise
12. Life Maintains Itself by Turnover	12. Le vivant se maintient par renouvellement
13. Life Tends to Optimize Rather Than Maximize	13. Le vivant tend à optimiser plutôt qu'à maximiser
14. Life Is Opportunistic	14. Le vivant est opportuniste
15. Life Competes Within a Cooperative Framework	15. Le vivant rivalise dans un cadre coopératif
16. Life Is Interconnected and Interdependent	16. Le vivant est interconnecté et interdépendant

Les 16 principes du vivant décrits par Mahlon Bush Hoagland en 1995.

Comment pourrions-nous rendre nos modèles adaptables aux environnements changeants ?

²³André NEL, interview du paléo-entomologiste et professeur au MNHN, 2022.

²⁴Mahlon Hoagland, Bert Dodson, Judith Hauck, *The Sixteen Patterns of Life, Exploring the way life works : the Science of biology*, Crown, 1995.

²⁵Hubert Saupe, *Le cauchemar de Darwin* (Darwin's Nightmare), documentaire, 2004.

B - IMITER LES SYSTÈMES DE LA NATURE.

Cette partie fait suite à l'interview de l'épistémologue Franck Varenne.²⁶

«Imiter la nature est un défi» d'après Franck Varenne. La nature est difficilement mathématisable. Les systèmes vivants sont des modèles de système ouvert, en équilibre, présentant une stabilité fonctionnelle. Cette résilience, cette capacité de perpétuelle régénération lui demande une consommation énergétique très importante.

L'organisation de ce système est régie par des mécanismes thermodynamiques et la sélection darwinienne. La nature évolue, expérimente, des choses émergent et d'autres disparaissent.

Ce qui nous est contemporain est donc ce qui a résisté à la fois à l'évolution et dont l'écosystème a su se fondre dans l'ensemble du vivant, équilibrer ses interactions avec les autres espèces, partager l'énergie, la matière et l'information. Seules les espèces optimales survivent.

Le vivant n'est pas en équilibre comme on a pu le croire. C'est un système ouvert dans lequel chaque élément trouve une résonance dans l'action d'un autre. Tout doit être flexible et réactif. Son fonctionnement impose d'être capable de changement spatial, temporel, répondant à des interactions de tous types. Son évolution est faite de permanence et de changements. La nature s'est construite des systèmes qui ont validé des ouvertures et le maintien de ses ouvertures. Son système l'alimente constamment. Claire François-Martin, docteur en biophysique au CEEBIOS, centre d'études et d'expertises en biomimétisme, illustre l'évolution du vivant en pointant les petites différences qui émergent constamment (brassage génétique pour la reproduction sexuée et mutations aléatoires dans tous les cas). Certaines de ces nouvelles solutions seront sélectionnées si elles sont plus adaptées au contexte donné.

Pour s'adapter, la nature a par exemple la capacité de remplacer un moyen chimique par un autre qui produit le même résultat.

Pour être résiliente et s'adapter elle mise sur la diversité, la régulation, et elle préfère être biodégradable pour être durable. Ainsi elle déploie et ajuste son système à chaque nouvel événement et s'offre également l'incroyable opportunité d'explorer le futur. Pour se prémunir des changements à venir, la nature a eu l'intelligence de se munir d'un code ADN non codant¹⁶, une matrice dont une partie reste libre pour faire face à l'inconnu et alors inscrire dans son identité source une nouvelle capacité de réaction.

Nous évoluons dans les mêmes contraintes que le vivant. La nature a certes de l'avance sur nous pour s'adapter, ayant exploité les lois de la thermodynamique depuis beaucoup plus longtemps, mais notre différence d'évolution ne tient pas à cela.

L'étude KARIM¹⁰ met en avant cet échange permanent des flux dans la nature qui lui offre l'opportunité de se modifier et de réagir rapidement au contexte extérieur. L'étude s'intéresse à la façon d'appliquer ces principes du vivant dans la conception de matériaux, n'abordant pas encore la question d'organisation ou de gestion. À quoi pourrait ressembler un modèle prenant en compte ces principes ?

¹⁰ KARIM - Knowledge Acceleration and Responsible Innovation Meat-network, 2015.

https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/09/Guide_Biomimicry_Karim.pdf ¹⁶ Dominique Bourg & Sophie Swaton, *Primauté du vivant, Essai sur le pensable*, Puf.

²⁶ Franck Varenne, interview de l'épistémologue des modèles et des simulations, *Qu'est-ce qu'un modèle qui s'adapte comme la nature ?*, 2022, voir la liste de question à la fin du mémoire.

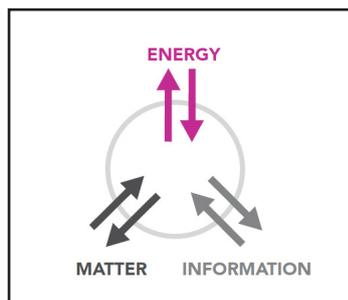


Illustration du Manuel KARIM (2015)

Notre conception industrielle est tributaire de ces mêmes lois du vivant mais nous avons exploré d'autres possibilités les jugeant plus efficaces que la simple nature. Nous avons préféré compartimenter le système et le centrer autour de la notion de rendement. Contrairement au vivant, notre modèle économique ne prend pas en compte la matérialité des échanges. Il fonctionne en système fermé où chaque action a une seule finalité qui, outre l'absence d'échange entre les espèces, génère des externalités négatives. Si nous prenions toutes les interactions en compte sur le modèle du vivant, nous ne parviendrions pas à gérer une telle complexité, ni à produire suffisamment d'énergie. Le défi le plus important serait celui de l'évolution. Serions-nous prêts à vivre dans l'incertitude ?

Certaines fourmis sont capables de faire évoluer leur habitat à leurs besoins et le remodelent en permanence. La forme globale ne change pas mais les fourmis en détruisent certaines parties pour en construire d'autres. Elles adaptent continuellement la structure du nid à la taille de la population et aux conditions environnementales. Les phéromones qu'elles déposent sur leurs constructions coordonnent leurs activités. Elles servent de boucles de rétroaction. Influencées par l'humidité ou la température, les phéromones s'évaporent plus ou moins vite, et la forme de la construction va changer.²⁷ L'homme sédentaire fait également un choix en fonction de son environnement mais ne revient pas dessus. Il ne le modifie que si des événements extérieurs l'ont détruit. Nous n'avons pas aujourd'hui la souplesse évolutive du vivant.

Comment pourrions-nous gérer les émergences comme le vivant ?

Pourrions-nous concevoir des modèles incluant des réactions immédiates à l'avènement d'une nuisance? Ce type de modèle avec une perception très fine, permanente et attentive, serait-il éthiquement acceptable ? Nous devrions réagir à chaque nouvel élément alors que notre résilience nous permet à notre échelle d'inclure ces différences dans notre modèle. Ne risquons-nous pas de voir apparaître de nouveaux ghettos ? L'application de la neutralité de la nature et de sa recherche d'optimisation des réactions ne semble pas convenir à la nature humaine. Néanmoins de tels critères nous permettraient peut-être d'anticiper et de prévoir de possibles émergences tout en laissant le sens moral les recevoir. L'homme et la nature appartiennent au même ensemble mais nous avons des difficultés à nous concevoir comme un tout. Cette proximité sans identification complète est clairement illustrée par l'anthropologue Philippe Descola (né en 1949) décrivant l'extraction de l'homme de la nature par ces mots : « Depuis plusieurs siècles en Occident, la nature se caractérise par l'absence de l'homme et l'homme par ce qu'il a su surmonter de naturel en lui. ».

Pourrions-nous retrouver du sens à nous instruire du vivant alors que nous avons dû nous en protéger pour évoluer ? A trop imiter la nature, ne risquons-nous pas de devenir à nouveau vulnérables et de nous plonger dans un système ultralibéral ?

²⁷ Catherine Jessus, *Étonnant vivant, Découvertes et promesses du XXI^e siècle*, CNRS, 2017.

CONCLUSION

Les modèles sont bien de formidables outils de communication, de transmission et de projection, nous permettant de nous remettre en question, d'imaginer de nouveaux futurs, de nouveaux possibles. Nos découvertes les déconstruisent pour créer la nouvelle base de réflexion, le nouveau schéma type.

Malheureusement, nos systèmes ne sont pas que performants. Ils sont devenus tellement complexes et mathématisés que les spécialistes n'en comprennent plus les imbrications, et ne peuvent plus les ajuster précisément à des situations. Pour être efficace un modèle doit répondre à une question précise. Il ne peut pas être une solution universelle.

Les modèles ont mené l'homme des cavernes à l'Espace, ont offert une espérance de vie et une qualité de vie à l'homme bien meilleures, une liberté plus largement partagée. Un progrès dont nous découvrons les limites depuis quelques décennies. Les années 70 ont vu naître les premières inquiétudes écologiques et d'éminents scientifiques ont proposé des premiers changements (les Meadows) mais nous tardons à les prendre en compte, à les imposer ou à nous y soustraire.

Les mouvements écologiques atteignent les sphères politiques mais sans l'assise, la force ou l'universalité qui leur seraient nécessaires pour mener une évolution globale uniforme.

Comment contrôler les deux dérives majeures des modèles que sont leur absence d'interconnexion et leur extraction du vivant ?

Le biomimétisme propose de prendre la nature en modèle; mais en sommes-nous capables ?

A l'étude des comportements du vivant nous découvrons notre manque d'interconnexion de nos systèmes au vivant. La nature co-évolue toujours. Les organismes s'entraident et se répondent. Nous n'évoluons que dans un sens, vers plus de profit, de connaissances, de bien-être mais oublions que nous appartenons à un vivant. Nous ne pouvons certes pas imaginer supprimer une espèce ou une évolution qui nous entraverait. L'homme a une conscience dont la nature ne s'encombre pas. Néanmoins nous devons comprendre que nous appartenons à ce vivant et devons respecter son éco-système.

L'homme est une espèce intelligente qui s'est modernisée, modifiée très rapidement par rapport à l'histoire du Monde. Ce rythme n'a pas permis au reste du vivant de créer les éléments nécessaires pour contrer nos nuisances. Un jour toutes les bactéries se nourriront certainement de plastique mais aujourd'hui nous épuisons le vivant en le consommant sans respecter son cycle de renouvellement, de régénérescence. Nous détruisons le vivant, surexploisons ses ressources.

Nous avons conscience de devenir une espèce nuisible pour la nature et tentons de modéliser des structures innovantes et plus responsables (World 3) pour revenir à une consommation plus raisonnée, tenant compte du changement climatique, de notre pollution et de la baisse des ressources. Ces simulations de taux de CO2 ou les études d'ACV (analyse de cycle de vie d'un produit) sont clairement

des avancées vers ce besoin de rapprochement du vivant. Néanmoins certains points essentiels comme la biodiversité semblent encore absents de ces modèles. Sans biodiversité, les terres s'appauvrissent et ainsi leur rendement ne sera pas celui prévu par les derniers modèles responsables. Toutes les variables sont importantes pour tenter de trouver le meilleur équilibre, l'harmonie la plus importante possible entre nos actions et notre vivant.

Mais cette harmonie semble inatteignable rapidement. Nous savons que réintroduire un peu de conscience de la nature dans nos modèles n'est pas suffisant. Seule une remise en question profonde de nos sociétés boostées au profit et au PIB donnerait une chance d'équilibre d'union retrouvée. Mais un changement brutal est impossible car nos systèmes sont complexes, imbriqués et le changement doit être pensé de manière globale et équitable pour espérer un succès. Nous sommes à la veille d'une nouvelle révolution copernicienne.

La nature elle-même ne sait pas produire de changement rapide sans causer de cataclysme.

Nous devons donc trouver comment co-évoluer tous ensemble, ne pas laisser un territoire de côté en nous recentrant chacun sur nous-même. Nous devons décomplexifier nos systèmes qui trouvent leurs résiliences dans la superposition des modèles et la capacité constante à trouver des ressources aux quatre coins du monde. Toute envie peut-être satisfaite tant que l'on ne regarde pas son ACV.

Quel type de résilience pourrions-nous trouver pour simplifier notre modèle ? Nous devons tendre vers des territoires résilients pour retrouver le cycle de la nature.

Les modèles de demain seront donc résilients et utiliseront la capacité de l'homme à produire des projections, des estimations et des anticipations autour de systèmes dont le cœur de fonctionnement est de se satisfaire des ressources disponibles et raisonnablement utilisables. L'homme devra trouver un compromis entre sa mère nourricière et son savoir, sa technologie.

Revenir à des pratiques plus en lien avec le réel, non pas un retour à la terre et aux valeurs des années 30 mais vers une organisation respectant un vivant amélioré par nos nouvelles connaissances raisonnablement utilisées.

En respectant les ressources, le vivant et l'ensemble de la biodiversité, ces modèles devront prioriser les besoins et donner à l'homme ce pouvoir d'évolution constante de la nature (Marc-André Sélosse) de manière universelle et sans conflit.

C'est un objectif digne des meilleures épopées fantastiques, mais sachons rester positifs et rêveurs pour imaginer de futurs possibles.

BIBLIOGRAPHIE

- > Marc-André Selosse, «Parole aux chercheurs : *La transition écologique ne suffit pas, il faut évoluer.*», *Science et vie*, 13 novembre 2021.
- > Marc-André Selosse, *L'origine du monde*, Actes sud, 2021.
- > Franck Varenne, «Comparer les modèles à l'aide du vecteur caractéristique : fonction, nature, principe et usage des modèles», *Natures Sciences Sociétés* ; à paraître.
- > Amy Dahan, «Les Modèles, ce qu'ils sont, d'où ils viennent et ce qu'ils font», *Modélisation et soutenabilités*, Séminaire Soutenabilités, France stratégie, 2020-2021. https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/les_modeles_ce_quils_sont_dou_ils_viennent_et_ce_quils_font.pdf
- > Alain Supiot, *La Gouvernance par les nombres*, Fayard, 2015.
- > Gaël Giraud, *Un Système économique à bout de souffle ?*, Podcast Sismique, 29 mars 2022. <https://www.sismique.fr/post/87-gael-giraud-1-le-systeme-economique-mondial-et-ses-limites>
- > Franck Varenne & Frédérique Aït-Touati, «Les Modèles, ce qu'ils sont, d'où ils viennent et ce qu'ils font», *Modélisation et soutenabilités*, Séminaire Soutenabilités, France stratégie, 2020-2021. <https://www.strategie.gouv.fr/debats/seminaire-soutenabilites-cycle-1-seance-3-modelisation-soutenabilites>.
- > Jean Mawhin, «Les Modèles mathématiques sont-ils des modèles à suivre ?» *Collègue de Belgique*, conférence à l'Académie royale de Belgique, 9 mars 2016. <https://www.youtube.com/watch?v=NqOfyqs5Kac>
- > Jean-Marc Jancovici, *Rapport du Club de Rome –Donella Meadows, Dennis Meadows, Jørgen Randers et William W. Behrens III -1972*, 1^{er} novembre 2009. <https://jancovici.com/recension-de-lectures/societes/rapport-du-club-de-rome-the-limits-of-growth-1972/>
- > Dennis Meadows, #77 - *La fin de la croissance ? - DENNIS MEADOWS L'auteur du fameux rapport «The Limits To Growth» fait le point, 50 ans après...*, Podcast Sismique, 2 novembre 2021. <https://www.sismique.fr/post/77-la-fin-de-la-croissance-dennis-meadows>
- > Yann Matarin, *Bientôt des micro-drones de moins d'un gramme grâce à une technologie révolutionnaire*, 22 juin 2017. <https://www.capital.fr/entreprises-marches/bientot-des-micro-drones-de-moins-d-un-gramme-grace-a-une-technologie-revolutionnaire-1233928>
- > Olivier Hertel, «La Libellule cyborg, nouvel auxiliaire de l'homme ?», *Sciences et Avenir*, 2 février 2017. https://www.sciencesetavenir.fr/high-tech/ceci-n-est-pas-une-libellule-mais-un-drone_110272
- > Robin George Collingwood, «*Toute histoire est histoire d'une pensée - Autobiographie d'un philosophe archéologue*», Epel, 2010.

- > Mariana Mirabile, *Les Leviers d'innovation systémique pour un système de transport soutenable*, Transition systémique, ADEME, 2021.
<https://videos.lescommuns.org/w/tM4JBhA7u9CWZqCk2vaVe>
- > Dominique Bourg & Sophie Swaton, *Primauté du vivant, Essai sur le pensable*, Puf.
- > IUCN, *Conserving healthy soils*, 2018.
<https://www.iucn.org/resources/issues-briefs/conserving-healthy-soils>
- > Ninon Renaud, « Croissance : la coalition allemande veut aussi mesurer le « bien-être », *Les Echos*, 26 janvier 2022, www.lesechos.fr/monde/europe/croissance-la-coalition-allemande-veut-aussi-mesurer-le-bien-etre-1382250
- > Frédéric Keck, « Covid-19 : Quelle utilité des modèles pour la gestion de crise et pour la prévention des risques ? », *Modélisation et soutenabilités*, Séminaire Soutenabilités, France stratégie, 2020-2021.
<https://www.strategie.gouv.fr/debats/seminaire-soutenabilites-cycle-1-seance-3-modelisation-soutenabilites>
- > Adèle Thorens Goumaz, *Pourquoi ne peut-on pas se passer de l'apport des scientifiques dans l'élaboration des politiques publiques ?*, 2022.
<https://blogs.letemps.ch/adele-thorens/2022/05/20/pourquoi-on-ne-peut-se-passer-de-lapport-des-scientifiques-dans-lelaboration-des-politiques-publiques/>
- > Michael T. Nietzel, « Leading Academic Institutions Will Receive More Than \$40 Million To Create Centers Challenging Neoliberalism ». *Forbes*, 16 février 2022. <https://www.forbes.com/sites/michaelt Nietzel/2022/02/16/leading-universities-will-receive-more-than-40-million-to-create-academic-centers-challenging-neoliberalism/?sh=363635f74e93>
- > André NEL, Interview du paléo-entomologiste et maître de conférences au MNHN, 2022.
- > KARIM - Knowledge Acceleration and Responsible Innovation Meat-network, 2015.
https://ceebios.com/wp-content/uploads/2020/09/Guide_Biomimicry_Karim.pdf
- > Mahlon Hoagland, Bert Dodson, Judith Hauck, *The Sixteen Patterns of Life, Exploring the way life works : the Science of biology*, Crown, 1995.
- > Franck Varenne, Interview de l'épistémologue des modèles et des simulations, *Qu'est-ce qu'un modèle qui s'adapte comme la nature ?*, 2022.
- > Catherine Jessus, *Étonnant vivant, Découvertes et promesses du XXI^e siècle*, CNRS, 2017.
- > Hubert Saupe, *Le cauchemar de Darwin (Darwin's Nightmare)*, documentaire, 2004.
- > Sondage Ipsos, « Le réchauffement climatique, un enjeu prioritaire pour 47 % des Français interrogés ». *Liberation et AFP*, 5 février 2022
https://www.liberation.fr/environnement/le-rechauffement-climatique-un-enjeu-prioritaire-pour-47-des-francais-interrogés-20220205_L4DWXWI53FE4JF77FA4HNQM4JI/

INTERVIEWS – LISTE DES INTERROGATIONS ABORDÉES :

Qu'est-ce qu'un modèle ?

Sur quel type de modèle travaillez-vous ?

Qu'est-ce qu'une approche systémique ?

Comment aborder la complexité ?

Utilisez-vous des modèles mathématiques existants ou les adaptez-vous à la situation ?

Travaillez-vous avec beaucoup ou peu de variables ?

Créez-vous des nouvelles variables ? Si oui, lesquelles ?

Intégrez-vous la nature, la biodiversité, l'humain dans vos modèles ?

Êtes-vous influencé par des modèles, des disciplines ?

Quel est votre attente vis-à-vis du modèle et de la simulation ?

Que pouvons-nous reprocher aux modèles, quelles en sont les limites ?

Change-t-il votre vision ou celle des autres ?

Avec qui partagez-vous vos résultats ?

Vos résultats sont-ils facilement compréhensibles ?

Qu'est-ce qu'un modèle dans la nature ?

Qu'est-ce qu'un modèle résilient ?

Qu'est-ce qu'un modèle figé, adaptatif, évolutif ?

Quel modèle face à l'incertitude ?

Comment intégrer le vivant dans nos modèles ?

LIENS VERS LES SITES DES PERSONNES INTERROGÉES :

Franck Varenne, épistémologue des modèles et des simulations - <https://www.researchgate.net/profile/Franck-Varenne>

Camille Aracheloff, doctorante en physique/biologie - PMMH & MNHN - <https://isyeb.mnhn.fr/fr/annuaire/camille-aracheloff-7714>

André Nel, paléo-entomologiste, professeur au MNHN - <https://isyeb.mnhn.fr/fr/actualites/andre-nel-honore-par-la-international-palaeontomological-society-et-par-la-revue>

Baptiste Lafoux, doctorant en physique - PMMH - <https://baptistelafoux.com/>

Pétros Chatzimpiros, chercheur au laboratoire interdisciplinaire des énergies de demain (LIED) et maître de conférences en géographie à l'Université Paris-Diderot. - <https://www.researchgate.net/profile/Petros-Chatzimpiros>

Thibaut Faucon, initiateur et responsable du programme transition systémique, coordinateur «Approche systémique & Stratégies de résilience territoriale», ADEME. - <https://transitionsystemique.fr/a-propos>

Eduardo Blanco, doctorant biomimétisme & villes régénératives, Ceebios/MNHN -<https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Blanco-5>

Eliot Graeff, docteur ingénieur biomiméticien, chef de projet, Ceebios - <https://www.researchgate.net/profile/Eliot-Graeff>

Adrien Saint-Sardos, ingénieur matériaux et fouille de la donnée biologique, Ceebios -<https://ceebios.com/2021/04/13/adrien-saint-sardos-ingenieur-de-recherche-fouille-de-la-donnee-biologique/>

Claire François-Martin, docteur en biophysique, chargée de mission études industrielles, Ceebios-<https://www.researchgate.net/profile/Claire-Francois-Martin>

Antoine Pierrot, expert modélisation multi-physique, Michelin - <https://www.researchgate.net/profile/Antoine-Perriot>

Lise Maisonneuve, concepteur élastomères, Michelin - <https://viadeo.journaldunet.com/p/lise-maisonneuve-2095246>