



ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES
INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

INTERDÉPENDANCES, PANDÉMIES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Jean-Louis Bobin
Anne Burban
Eric Chenin
Ernesto Di Mauro
Jean Félix Durastanti
Victor Mastrangelo
Paul Meunier
Edith Perrier
Jean Schmets
Jean-Pierre Treuil



ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES INTERDISCIPLINARY EUROPEAN ACADEMY OF SCIENCES

INTERDÉPENDANCES, PANDÉMIES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Isabelle Alvarez (Mathématiques et Informatique appliquées, Paris Saclay/INRAE/Institut des Systèmes Complexes, Paris) ; Éric Baptiste (UMR 7138 Évolution/Adaptation, Intégration, Réticulation et Évolution/Institut de Biologie Paris-Seine) ; Patrick Berche (Académie Nationale de Médecine) ; Jean-Louis Bobin (Sorbonne Université/AEIS) ; Denis Bonnelle (Institut Simon Laplace) ; Jean-Philippe Bouchaud (École Normale Supérieure/Académie des Sciences/Capital Fund Management – CPM – Paris) ; Anne Burban (Éducation Nationale/Conseil Supérieur des Programmes) ; Bruno Canard (Laboratoire Architecture et Fonction des macromolécules biologiques/Unité mixte CNRS/Aix Marseille Université) ; Franck Carré (Direction des Énergies du CEA) ; Éric Chenin (AEIS) ; Claire Kerboul (Association Sauvons le climat) ; Philippe Kourilsky (Institut Pasteur) ; Daniel Kroh (Center of Excellence on Systems Architecture Management Economy & Strategy – CESAMES – Paris) ; Pierre Lenders (Capital Fund Management -CPM- Paris) ; Philippe Moingeon (Université Paris-Saclay/ Académie nationale de Pharmacie) ; Gérard Mourou (Prix Nobel de Physique 2018 avec Donna Strickland) Michel Spiro (Conseil de la Fondation CERN & Société).

L'objet de ce cinquième livre de la collection de l'AEIS est de présenter les états des lieux, analyses et points de vue exprimés lors des conférences s'étant tenues fin 2023 dans le cadre du colloque AEIS intitulé « Interdépendances, Pandémies et Changement Climatique ». Autant l'émergence et la diffusion des maladies virales que les causes et conséquences du changement climatique nous rappellent – certes à différentes échelles de temps – que notre sort est inévitablement lié à celui des autres. C'est l'idée qui a présidé au colloque. Une première partie prend l'exemple des récentes pandémies et leur historique pour aborder la nécessité et les moyens d'anticiper et de faire face à des événements de survenue quasi certaine mais dont l'instant peut être imprévisible. Une seconde partie aborde quelques-uns des outils permettant de mieux maîtriser les incertitudes et complexités liées à de telles dynamiques. Une troisième partie concerne la question de l'énergie, sachant que l'activité humaine et la maîtrise de ses conséquences, notamment sur le Climat, reposent sur la disponibilité de l'énergie et la nature de ses diverses sources. Une quatrième partie présente à travers des exemples différents, notamment quant aux échelles et institutions concernées, des leviers pour tendre vers un développement durable de l'humanité. Cette dernière partie se termine par un aperçu du projet onusien d'une « Décennie Internationale des Sciences pour le Développement durable » destinée à promouvoir une coopération internationale et interdisciplinaire autour des « Sciences de la durabilité ».

ISBN : 978-2-7598-4105-9



edp sciences



Interdépendances, pandémies et changement climatique

Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences
Interdisciplinary European Academy of Sciences



<https://doi.org/10.1051/978-2-7598-4105-9>

ISBN (papier) : 978-2-7598-4105-9

ISBN (ebook) : 978-2-7598-4106-6

Cet ouvrage est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/bync-nd/0/fr/>) permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© AEIS, 2026

La collection de l'AEIS

Les travaux de l'**Académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences** portent depuis plus de dix ans sur les questions majeures auxquelles est confrontée la recherche à la croisée de plusieurs disciplines. Et la présente collection a pour but de faire le point sur ces questions.

Nos ouvrages sont issus de séminaires mensuels et de congrès bisannuels pluridisciplinaires auxquels sont associés de nombreux chercheurs extérieurs. Notre ambition est de faciliter les échanges entre programmes de recherche spécialisés. Elle est aussi d'informer un public plus large sur les avancées récentes.

Pour chacun des ouvrages et en concertation avec les auteurs, un comité de lecture a pour tâche de coordonner l'ensemble des contributions conformément aux objectifs poursuivis, et d'en faire ressortir les lignes de force.

Les ouvrages de l'Académie recourent à deux formes de publications : le livre papier avec diffusion dans les bibliothèques des universités et des centres de recherche et en librairie, et la version électronique en ligne dans la section e-Books du site de l'éditeur *EDP Sciences*.

Le premier ouvrage de la collection : « *Formation des systèmes stellaires et planétaires-Conditions d'apparition de la vie* » est disponible en téléchargement gratuit au format PDF à l'adresse suivante :

<https://www.edp-open.org/books/edp-open-books/312-formation-des-systemes-stellaires-et-planetaires>

Le deuxième ouvrage : « *Ondes, Matière et Univers* » est disponible en téléchargement gratuit au format PDF à l'adresse suivante :

<https://www.edp-open.org/books/edp-open-books/372-ondes-matiere-et-univers>

Le troisième ouvrage : « *Les signatures neurologiques de la conscience* » est disponible en téléchargement gratuit au format PDF à l'adresse suivante :

<https://laboutique.edpsciences.fr/produit/1184/9782759826124/Les%20signatures%20neu%20robiologiques%20de%20la%20conscience>

Le quatrième ouvrage : « *Les signatures des états mésoscopiques de la matière* » est disponible en téléchargement gratuit au format PDF à l'adresse suivante :

<https://laboutique.edpsciences.fr/produit/1375/9782759834891/les-signatures-des-etats-mesoscopiques-de-la-matiere>

Table des matières

La collection de l'AEIS.....	3
------------------------------	---

Introduction générale.....	7
----------------------------	---

Première partie : La difficulté d'anticiper

Chapitre 1

Les pandémies virales contemporaines dans un monde à risques.....	15
---	----

Chapitre 2

Virus pandémiques, les défis de l'anticipation scientifique	29
---	----

Chapitre 3

Interdépendance et résilience dans le vivant : une perspective en biologie de l'évolution.....	43
---	----

Deuxième partie : Quels outils pour faire face ?

Chapitre 4

Intelligence artificielle et nouveaux médicaments : vers une médecine computationnelle de précision.....	63
---	----

Chapitre 5

Traitement de la crise de la Covid-19 : Vers une approche intégrée dite « agile » basée sur une modélisation systémique.....	73
---	----

Chapitre 6

Crises économiques : un point de vue de physicien	99
---	----

Chapitre 7

La théorie mathématique de la viabilité au service de la gestion durable.....	115
---	-----

Troisième partie : Questions d'énergie

Chapitre 8

Atouts potentiels des nouveaux réacteurs nucléaires pour le développement durable	141
--	-----

Chapitre 9

En quête du Graal : la fusion thermonucléaire contrôlée.....	155
--	-----

Chapitre 10

L'innovation du laser femtoseconde et ses applications169

Chapitre 11

Table ronde : Quelles perspectives pour une transition énergétique ?.....179

Quatrième partie : Agir et Éduquer

Chapitre 12

Le changement climatique, défi global et action locale : L'exemple
de la Nouvelle-Aquitaine.....199

Chapitre 13

La finance verte : changement de paradigme ou bulle spéculative ?217

Chapitre 14

L'interdisciplinarité dans l'enseignement scolaire : une source
d'enrichissement indéniable, mais dont la mise en œuvre soulève
des questions vives, d'ordres pédagogique et organisationnel.....249

Chapitre 15

2022-2023 : Année des sciences fondamentales
pour le développement durable267

Épilogue273

Remerciements.....281

Présentation de l'ACADEMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE
DES SCIENCES.....283

Introduction générale

Interdépendances, pandémies et changement climatique, tel était l'intitulé de notre colloque de novembre 2023¹ et consécutivement le titre du présent ouvrage qui en présente la synthèse². Ce colloque s'est inscrit dans les manifestations scientifiques organisées dans le cadre de l'Année Internationale des Sciences Fondamentales au service du Développement Durable proclamée par l'Assemblée générale de l'ONU du 2 décembre 2021³. Promue par l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée sous la direction de Michel SPIRO, ancien Président du Conseil scientifique du CERN et ancien directeur de l'IN2P3⁴/CNRS, cette Année a été officiellement inaugurée par une conférence d'ouverture le 8 juillet 2022 au siège de l'UNESCO à Paris avec la participation de deux prix Nobel de Physique, Serge HAROCHE et Giorgio PARISI. Des évènements et des activités ont ensuite été organisés dans le monde entier.

Interdépendance. Pour un grand nombre d'entre nous, une évidence s'impose. Savoir le fait que les différentes parties de l'humanité et plus largement, les différentes composantes du monde vivant sont toutes reliées entre elles. Autrement dit il n'est pas d'évènement un peu important affectant un de ces éléments sans que les conséquences ne touchent pas, tôt ou tard, d'autres éléments voire même la totalité.

On a pu le constater à différentes reprises dans l'Histoire récente. L'embrasement de la guerre de 14-18, devenue « Première Guerre mondiale », la propagation de la crise boursière puis économique de 1929, la Seconde Guerre mondiale en sont de tragiques exemples. Cette interdépendance était peut-être moins marquée autrefois, alors que les hommes étaient moins nombreux, les voyages plus longs, les occasions de rencontre plus rares. Cependant la découverte de liens d'échanges anciens entre régions éloignées amène parfois à relativiser cette idée.

La pandémie de Covid-19⁵ nous a également brutalement rappelé que notre sort est inévitablement lié à celui des autres : les solutions du repli sur soi sont manifestement des vues à courte portée. Les besoins de résilience et de protection passent en particulier par davantage de coopération. L'anthropisation globale du monde favorise l'émergence et la rapide diffusion de virus qui étaient jusqu'à présent cachées chez les animaux, ces derniers étant maintenus dans leurs habitats naturels par une biodiversité importante.

Dans cette prise de conscience générale, l'expertise scientifique a un rôle majeur à jouer. La confiance dans les scientifiques persiste dans les sondages d'opinion, malgré la diffusion d'informations non référencées ou biaisées sur les réseaux sociaux. Ce dernier phénomène est cependant un réel danger : selon un article de la revue *La Recherche* du mois de février 2021 en rapport avec la pandémie, « L'Organisation

¹ <https://aeis-2023.sciencesconf.org/>

² Notre société savante a créé une collection d'ouvrages auprès de l'éditeur scientifique de référence EDP Sciences. Nous en sommes au cinquième ouvrage. Ceux-ci sont disponibles par téléchargement à l'adresse suivante <https://www.edp-open.org/books/edp-open-books>

³ <https://press.un.org/fr/2021/ag12391.doc.htm>

⁴ Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules

⁵ La pandémie de Covid-19 est une pandémie d'une maladie infectieuse émergente, appelée la maladie à coronavirus 2019 ou Covid-19, provoquée par le coronavirus SARS-CoV-2.

mondiale de la santé considère que la désinformation est l'une des plus grandes menaces sur la santé dans le monde aujourd'hui. Dans ce contexte l'interdisciplinarité est une absolue nécessité dans la lutte contre la désinformation ».

Changement climatique. Il s'agit bien là d'un cas pour lequel la direction prise par un petit nombre de pays à partir de la fin du XVIII^e siècle, savoir une progression vers l'industrialisation, a fini, sur une échelle de temps de deux siècles, par impacter le monde entier. Tout d'abord par l'effet d'un ensemble de mécanismes politiques, économiques et culturels, conduisant à l'adoption de cette même direction, avec certes des spécificités locales, par un nombre de plus en plus grand de nations. Ensuite par l'impact, massivement non anticipé⁶ jusque vers 1960-1970 et pourtant majeur, de la généralisation de ces comportements sociaux sur la physique du globe elle-même.

Pandémies. La progression assez lente, disons à l'échelle d'une vie humaine tout entière, du changement climatique peut laisser place à une certaine indifférence, voire à un certain déni. Cette indifférence est plus difficile face aux épidémies, car il s'agit pour les individus de savoir que faire face au risque de leur propre mort à brève échéance. Ce en raison non seulement de l'extrême rapidité de la progression des risques objectifs, mais aussi de la propagation quasiment instantanée de la conscience de ces risques et de leur approche jour après jour. Et les puissances publiques, devant ces diffusions « exponentielles » des dangers et des peurs, sont elles-mêmes obligées de trouver les moyens d'y parer.

La pandémie de Covid-19 a révélé la fragilité de nos sociétés. Pensons aux conséquences humaines que pourrait avoir une telle pandémie si le taux de létalité ou de contagiosité avait été plus élevé, ou encore si elle s'était combinée avec un phénomène extrême – ouragan, incendie géant, canicule – dont la probabilité et l'amplitude augmentent à cause du réchauffement climatique. Il est important d'identifier correctement nos vulnérabilités, sanitaires ou autres, à différentes échelles, et d'anticiper celles en devenir ! Il est donc vital que cette pandémie comme la menace du changement climatique renforcent la conscience du rôle fondamental de la recherche et la confiance des autorités et du grand public dans les scientifiques.

Et donc on en revient aux sciences : celles dites « fondamentales », Mathématiques, Physique, Chimie, Biologie..., car elles ont fondé, à la fois, sur le plan technique, la marche vers l'industrialisation, puis l'analyse de ses conséquences sur « la santé du globe » et la santé humaine ; celles dites « humaines », Théorie de l'évolution (notamment des espèces « Homo »), Démographie, Anthropologie, Sociologie, Psychologie, Économie, toutes sciences qui conjointement peuvent aider à comprendre les différents processus de domination, d'imitations, d'échanges en œuvre dans les sociétés humaines.

Si ces diverses sciences, de façon séparée puis ensuite conjointement dans la collaboration interdisciplinaire, nous ont permis de **comprendre** comment on en est arrivé où nous en sommes, alors on peut faire l'hypothèse qu'elles nous sont **nécessaires** pour nous donner les **possibilités** d'infléchir les déterminismes, d'anticiper les conséquences de telles ou telles actions, de faire de nouvelles découvertes susceptibles d'assurer un développement durable.

Dans le but d'illustrer comment diverses sciences peuvent contribuer à résoudre les défis qui se posent à nous, le présent ouvrage est divisé en quatre parties.

⁶ Robert Salais, *Le piège du changement climatique, Entre le temps qui vient et le temps qui reste*. Editions universitaires Septentrion 2025.

La première partie, intitulée « La difficulté d’anticiper » prend l’exemple des récentes pandémies et de leur Historique. Cet exemple est particulièrement intéressant pour aborder l’anticipation. Il s’agit en effet, sur ce thème des pandémies, de se doter des moyens de faire face à des événements locaux possibles, mais dont la date, ni le lieu (dans une moindre mesure) ne peuvent être prévus et dont les conséquences peuvent affecter en peu de temps l’ensemble de l’humanité. En gros, étant donné la difficulté de prévoir, il s’agit d’être prêt malgré tout. Les deux premiers chapitres traitent de cette question, notamment dans le contexte des pandémies virales. Le premier chapitre présente les implications médicales, démographiques, comportementales que la pandémie de Covid-19 a mises en évidence, et la complexité des facteurs mis en œuvre pour en faire l’analyse. Le deuxième chapitre présente les principales voies thérapeutiques à explorer : vaccins et médicaments antiviraux, thérapeutique par repositionnement de molécules existantes.

Le dernier chapitre aborde un thème général, lié cependant d’une certaine façon à la difficulté d’anticiper à travers le thème de la complexité : la complexité des liens – non seulement d’ancêtres à descendants mais aussi « horizontaux » entre êtres vivants au cours de leur coévolution. Dès le stade moléculaire se manifestent des structures concrétisant des réseaux d’interactions ; les développements successifs de telles structures d’interactions jalonnent l’évolution, d’abord des êtres unicellulaires, puis des êtres vivants multicellulaires et des écosystèmes dans lesquels ils vivent. La question de l’interprétation évolutionnaire des réseaux qui animent les sociétés humaines est enfin posée.

La deuxième partie, intitulée « Quels outils pour faire face », aborde quelques-uns des moyens « intellectuels » pour maîtriser ces incertitudes et ces complexités. Un premier chapitre traite, dans un contexte pharmacologique – recherche de médicaments et ciblage thérapeutiques – des possibilités offertes par l’Intelligence artificielle, dans sa capacité à extraire, de la masse de données disponibles, des éléments pertinents pour les objectifs recherchés. L’Intelligence artificielle ne peut pas prédire le succès des essais humains, mais elle peut faire un tri dans la masse considérable de données et de résultats de plusieurs expériences – y compris les publications scientifiques – en examinant tous les paramètres et en découvrant des modèles qu’un cerveau humain pourrait ne pas repérer. L’IA favorise aussi l’émergence d’une médecine de précision « computationnelle » proposant des traitements parfaitement adaptés aux spécificités des patients.

Deux chapitres illustrent ensuite les apports de modèles dits « multi-agents » et des possibilités de simulations qui leur sont associées. Le premier se place dans le contexte de la lutte contre la progression d’une pandémie. Ces modèles permettent d’aborder avec une meilleure précision des questions concernant les chemins et les durées de diffusion, les modalités cliniques, sociales et environnementales de prise en compte de la maladie, et d’esquisser des principes d’approche pour des événements sanitaires similaires. Le second chapitre concerne le contexte des crises financières et économiques, et souligne la capacité des modèles multi-agents à prendre en compte le réseau d’interactions dont la mise en évidence ressort parfois de disciplines très différentes. Après la crise financière de 2008 notamment, afin de prévenir d’autres crises, quelques économistes et physiciens développent ainsi des modèles multi-agents s’inspirant des apports de la physique statistique et de la théorie des jeux. Le but étant de faire le lien entre les comportements des différents acteurs et les fortes volatilités des marchés.

Le quatrième et dernier chapitre présente une théorie mathématique, celle de la viabilité, axée sur le triptyque durabilité/robustesse/résilience. Cette théorie formalise les interactions entre les groupes humains et leurs environnements, ces derniers ayant leurs propres dynamiques, et en déduit les conditions de la durabilité du système commun. La connaissance de ces conditions éclaire alors les acteurs, intervenant par exemple sur de grandes entités naturelles, sur les compromis assurant la compatibilité de leurs interventions sur le long terme.

La troisième partie, intitulée « Questions d'énergie », concerne une question fondamentale, puisque l'activité humaine, la possibilité de poursuivre son développement, ses conséquences, notamment sur le Climat, reposent sur la disponibilité de l'Énergie et sur la nature de ses diverses sources. Il est tout à fait compréhensible que ce soit la Physique qui soit ici à l'honneur. Comment produire massivement de l'Énergie, à l'échelle des besoins des groupes humains, et de façon durable. Cette question est l'objet des deux premiers chapitres, autour des possibilités des énergies bas carbone, fission et fusion nucléaires, et de la table ronde en fin de partie, autour des débats actuels sur les énergies décarbonées et lors de laquelle, à travers notamment les échanges avec le public, diverses questions importantes ont été évoquées. Comme la nécessité de procéder sans tarder à une forte électrification, le rôle incertain de l'hydrogène, ou encore l'utilité, pour mener à bien la transition nécessaire, d'une science participative où les expériences et les savoirs circulent dans les deux sens.

Le troisième chapitre, autour de l'énergie des lasers, concerne les méthodes de génération d'impulsions optiques ultra-courtes de haute intensité. Ces méthodes permettent d'obtenir des puissances considérables, d'aller dans des domaines de la physique qu'on ne pouvait pas atteindre. Ces techniques lasers peuvent être utilisées pour des applications variées, notamment médicales telle la chirurgie femtoseconde en Ophtalmologie. Des recherches sont en cours pour appliquer ces techniques lasers dans le domaine nucléaire.

La quatrième partie a pour titre « Agir et Éduquer ». Face aux divers déterminismes et incertitudes qui nous menacent, il ne peut y avoir de réponse unique. C'est par une convergence de projets de multiples échelles et natures que nous pouvons espérer imprimer des changements de trajectoire. Cette quatrième partie présente quatre entreprises différentes ayant bien cet objectif, tout en décrivant cependant les difficultés rencontrées ou les faiblesses. Un premier chapitre se place dans le contexte des accords de Paris de 2015 lors de la COP 21⁷ visant à limiter le réchauffement. Il présente une analyse sélective d'un ensemble de diagnostics puis d'actions d'adaptation à entreprendre dans le cadre d'une grande région française, l'Aquitaine. Ensemble de diagnostics et d'actions consignés dans un rapport officiel de l'administration régionale, le rapport « AcclimaTerra ».

Le second chapitre traite des moyens destinés à financer les changements d'activités productives et les investissements nécessaires, ce qu'on a appelé « la finance verte », basée sur des critères environnementaux, sociaux et de gouvernance (ESG) applicables dans les décisions d'investissement. Le chapitre trace l'historique des divers courants de la finance verte, leur montée en puissance puis un certain recul, et en analyse les motivations et les résultats.

Les deux derniers chapitres concernent davantage l'éducation. Au niveau national d'abord (chapitre 14), avec une description des efforts faits en France par l'Éducation

⁷ <https://unfccc.int/fr/news/accord-cop21>

nationale pour promouvoir l'interdisciplinarité. La pratique de l'interdisciplinarité est en effet essentielle pour une compréhension de la complexité du monde auquel les nouvelles générations seront confrontées. Il s'agit d'abord de pouvoir dialoguer : son premier enjeu est que toutes les parties prenantes puissent saisir la signification spécifique que chaque spécialiste donne à son vocabulaire. Les principaux dispositifs interdisciplinaires en termes de contenus, de modalités pédagogiques et d'organisation mis en place au collège, au lycée, et au niveau post-bac sont relatés. Sont par exemple mentionnées deux initiatives pour promouvoir l'interdisciplinarité et qui ont eu un réel succès. Il s'agit en premier d'une épreuve incontournable aux concours d'entrée dans les grandes écoles scientifiques : le travail d'initiative personnelle encadrée (TIPE) qui se déroule depuis 1995 et conduit au fil des ans à de véritables projets interdisciplinaires. Au niveau universitaire, la formation à l'interdisciplinarité a été renforcée lors de la création des écoles doctorales telles qu'on les connaît actuellement dans les universités, les grandes écoles et les grands établissements suite à la publication dans les années 2000 du rapport des travaux d'une Commission de la Société Française de Physique⁸.

Au niveau mondial ensuite (chapitre 15), avec un rappel des objectifs et l'organisation de « l'Année des Sciences Fondamentales pour le Développement Durable » ainsi que les thèmes et propositions en ayant marqué les principales manifestations dans les mois qui ont suivi son inauguration en juillet 2022. Ce chapitre donne enfin un aperçu du projet onusien qui en est résulté, à savoir celui d'une « Décennie Internationale des Sciences au service du Développement Durable », Décennie destinée à instaurer une véritable coopération internationale et interdisciplinaire autour des « Sciences de la Durabilité ».

Le comité de lecture de l'AEIS

⁸ Commission de la Société Française de Physique pour la réforme des formations par la recherche, 1999. Voir : https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/pdf/1999/02/refdp_bsfp-118_Suppl.pdf

Première partie :

La difficulté d'anticiper

Il est illusoire, face à une menace d'épidémie, de penser pouvoir s'isoler. En retraçant l'historique de certaines maladies virales (variole, grippe, Covid, VIH, Hépatites), en rappelant les hôtes intermédiaires impliqués et en décrivant leur diffusion plus ou moins rapide à l'ensemble de la population mondiale, le premier chapitre (*Patrick Berche, Les pandémies virales dans un monde à risque*) met en lumière et analyse, à une échelle macroscopique, ces mécanismes de diffusion, faits de déterminismes divers (zoologiques, géographiques, socio-économiques, culturels), mais aussi de hasards, qui vont faire se propager la maladie à de grandes distances. La tentation est alors de ralentir voire d'arrêter cette diffusion en renforçant les frontières et, à l'échelle locale, en « confinant ». Actions, parfois effectivement suivies de succès, mais qui ne suffisent pas : Qu'eût été le cours de la pandémie de Covid par exemple, si les vaccins à ARN messenger n'avaient pas pu être aussi massivement et rapidement utilisés ?

Le second chapitre (*Bruno Canard, Virus pandémiques, les défis de l'anticipation scientifique*) se centre sur la question du « comment être prêt, comment faire face si cela arrive ». La connaissance des mécanismes macroscopiques de diffusion ne suffit pas : il faut très vite connaître l'identité du pathogène, les processus biologiques d'infection, puis en déduire des techniques de diagnostics et des angles d'attaque thérapeutique (vaccins, médicaments antiviraux déjà existants, mais possiblement actifs, nouveaux médicaments). La réalisation de ces tâches implique une coopération effective, faite d'échanges d'information sincères et rapides sur les faits survenus, une bonne communication sur les recherches menées et les accidents de laboratoires. L'histoire des avancées dans ces domaines, résultats de longues années de recherche fondamentale suivies de percées thérapeutiques, le montre clairement.

Le troisième chapitre (*Eric Baptiste, Interdépendance et résilience dans le vivant, une perspective en biologie de l'évolution*) met en exergue la notion d'interactions et de réseaux d'interactions. L'interdépendance entre deux entités n'est qu'une conséquence de ces interactions. L'auteur insiste alors sur plusieurs faits. Tout d'abord, ces réseaux d'interactions s'observent à toutes les échelles du vivant, « du niveau moléculaire au niveau écosystémique » autrement dit, entre molécules au sein d'une cellule, entre cellules d'un même organisme, entre organismes au sein d'un écosystème. Ils exercent,

au sein de l'ensemble des entités qu'ils relient, certaines fonctions, liées par exemple à la stabilité de cet ensemble. Ensuite, ils s'observent à tous les stades de l'évolution, depuis le début de la vie sur la Terre, et ils se transforment constamment. C'est précisément une des tâches de la biologie de l'évolution de comprendre ces transformations : notamment, au-delà de l'approche par espèces, en considérant ces réseaux comme étant eux-mêmes, en tant que tels, des objets sur lesquels opère la sélection naturelle.

Nous avons intitulé cette première partie « La difficulté d'anticiper ». Elle aurait bien pu également se nommer « la nécessité d'anticiper », en référence notamment au second chapitre. Un élément a pu être cependant omis : anticiper des menaces, sans qu'elles soient certaines, ou encore qu'elles soient quasi certaines, mais à une échéance inconnue, c'est souvent la faire craindre, susciter une peur, ou à l'inverse entraîner un déni. C'est une situation qui semble se répéter dans notre monde actuel dans différents contextes ; celui des pandémies – n'a-t-on pas tant de fois entendu que la survenue d'une prochaine pandémie virale majeure est certaine, la seule incertitude étant sa date ? Celui du changement climatique, avec le sentiment diffus d'une menace lointaine, abstraite, n'ayant que peu de conséquences – contrairement au cas d'une épidémie – sur notre comportement quotidien, et dont les implications sur les sociétés humaines – radicales selon certains – incitent à le nier ; celui des guerres enfin, dont on pouvait penser que « c'en était fini avec elles », mais qui redeviennent un danger dont on parle, et auquel il faudrait là aussi se préparer.

Avons-nous raison de rapprocher ces trois types de menaces ? Les sciences humaines – notamment l'anthropologie, la sociologie et la psychologie – mais aussi la philosophie et l'éthique peuvent-elles aider l'humanité à les gérer ? Ce sont des questions qui nous paraissent utiles d'être posées.

1

Les pandémies virales contemporaines dans un monde à risques¹

Patrick Berche

Académie Nationale de Médecine
Professeur émérite à l'Université Paris Cité
Ancien directeur Institut Pasteur Lille

Abstract

Contemporary pandemics highlight the importance of monitoring and preventing contagious infectious agents, primarily viruses. These originate from animal reservoirs (bats, rodents, primates, birds, etc.). They are capable of adapting to the human species through mutations or recombination. The species barrier can be crossed after a succession of stages in intermediate hosts. Viral pandemics are either rapidly evolving and have a short incubation period (influenza, smallpox, Covid-19, etc.), or long incubation periods and periods (AIDS, hepatitis B and C, etc.). There are several risk factors for a pandemic. First, there are the properties of new viruses (virulence, mode of propagation, resistance in the environment, etc.). Then there is the population density, which favors promiscuity (urbanization, precarious living and hygiene conditions, etc.), and its fragility (age, chronic diseases, immunosuppression, malnutrition, obesity, etc.). Finally, several environmental factors (global warming, various pollutions, etc.) have consequences on population movements, particularly favoring contact with wild reservoirs and new distributions of tropical disease vectors towards temperate countries. These pandemics appear inevitable, but we have diagnostic and therapeutic tools, particularly vaccines, to control these scourges.

1. Introduction

L'émergence d'une pandémie dépend de trois facteurs. Il faut d'abord un agent infectieux avec ses propriétés, sa virulence, son mode de transmission, sa survie dans l'environnement, ses réservoirs animaux. Le deuxième facteur est la population cible, avec sa sensibilité génétique, sa densité démographique, son immunité collective, ainsi que des facteurs physiologiques, comme la malnutrition, l'obésité, les comorbidités et les conditions sanitaires. Enfin il y a l'environnement avec le climat, les saisons, la pollution, les catastrophes naturelles. Ces trois facteurs peuvent interagir à travers un facteur crucial, le comportement humain, incluant la promiscuité, la mobilité, les migrations et les guerres.

Au Paléolithique, il pouvait y avoir tout au plus des micro-épidémies sans avenir, du fait de la rareté des contacts dans des populations clairsemées. Les premières épidémies

¹ Ce chapitre est une transcription, effectuée par Ernesto Di Mauro (AEIS), de la conférence tenue par Patrick Berche le 23 novembre 2023 dans le cadre du colloque AEIS. Il a été relu et amendé. Il est publié avec son accord.

sont apparues au Néolithique, en particulier à partir de la fondation des grands empires, quand les premières cités apparaissent, accompagnant une croissance démographique. Les trois facteurs commencent à interagir. Ces épidémies restent cependant limitées et régionales. Même si plusieurs pandémies ont été décrites dans l'Antiquité (Peste Antonine, Peste de Justinien) et au Moyen Âge (Peste Noire), c'est surtout à partir de la Renaissance que l'on voit apparaître les premières grandes pandémies et panzooties pour les animaux, touchant l'ensemble du monde, incluant l'Amérique (grippe, variole, rougeole...).

Les pandémies virales appartiennent à deux catégories selon leur évolution. Il y a celles à évolution rapide et incubation courte, de quelques jours ou semaines : c'est le cas de la variole, de la grippe, de la rougeole et de la Covid-19. À l'inverse, d'autres d'épidémies virales sont à évolution lente, surprenant après une longue incubation qui peut durer des mois ou des années, comme le sida, l'hépatite B et l'hépatite C.

Les virus pathogènes pour l'homme proviennent d'espèces animales sauvages qui forment des réservoirs. Les principaux réservoirs sont les primates (à l'origine notamment du sida, de la syphilis et du paludisme), les oiseaux (porteurs des virus de la grippe, avec le porc comme hôte intermédiaire), et surtout les chauves-souris et les rongeurs qui sont porteurs de nombreux virus connus ou inconnus. Ce portage chez les animaux sauvages est souvent asymptomatique. Le contact direct avec des animaux sauvages ne donne pas naissance à des épidémies, mais il peut entraîner parfois des infections graves chez l'homme, mais sans propagation, car ces virus sauvages ne sont pas adaptés à notre espèce. En effet, il existe une barrière d'espèce difficile à franchir pour les virus. Pour être transmis par contagion interhumaine, il faut que les virus franchissent une série d'étapes les faisant passer par des espèces animales intermédiaires (figure 1) [1, 2]. Ce processus d'adaptation se fait en fonction de la proximité génétique des espèces animales qui se côtoient, aboutissant à l'adaptation à l'espèce humaine infectée au contact d'un hôte intermédiaire. Dans des conditions favorables, la contagion interhumaine peut être à l'origine d'épidémies.

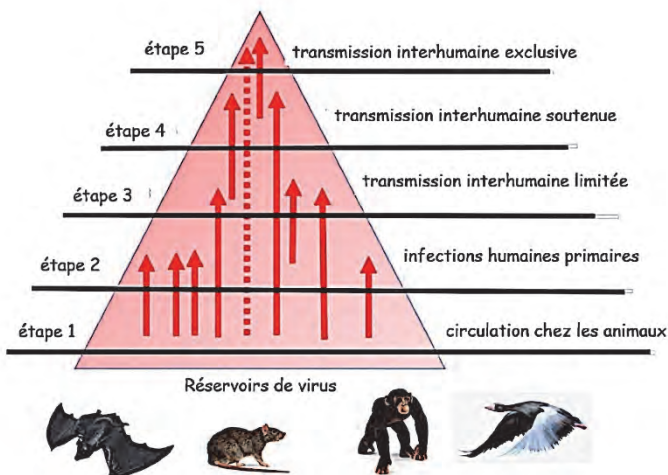


Figure 1. Étapes de franchissement des barrières d'espèces : à partir de réservoirs animaux, les virus procèdent par étapes successives par des hôtes intermédiaires génétiquement apparentés, jusqu'à l'espèce humaine. Le passage direct sans hôte intermédiaire n'est pas possible à cause de la barrière d'espèce [9].

Ce processus d'adaptation peut survenir à la suite de mutations virales aléatoires, permettant aux structures virales de s'adapter par étapes aux récepteurs cellulaires des nouveaux hôtes. Un autre mécanisme est la survenue de recombinaisons lors de co-infections virales chez un hôte animal. C'est le cas, par exemple, des virus de la grippe provenant d'oiseaux qui peuvent contaminer des porcs porteurs de virus porcins. Ces co-infections génèrent des réassortiments des génomes viraux, donnant naissance à des virus aux propriétés nouvelles, éventuellement très contagieux pouvant déclencher des pandémies de grippe.

2. Pandémies virales contemporaines

Depuis le début du XX^e siècle, on constate que sont survenues des épidémies bien plus dévastatrices que celles survenues dans un passé récent. La pandémie de variole a entraîné plus de 300 millions de décès dans le monde pour le seul XX^e siècle, jusqu'à sa disparition en 1980, il y a 44 ans [3, 4]. Le taux de létalité (nombre de décès sur le nombre de patients symptomatiques) était de 30 % en moyenne, contre seulement 0,6-1 % pour la Covid-19. Le sida a entraîné 76 millions de cas identifiés et 36 millions de morts. Il existe aussi des pandémies silencieuses, dont on parle peu bien qu'elles fassent de très nombreuses victimes : les hépatites B et C. Il y a eu enfin les pandémies de grippe : la grippe espagnole en 1918 dont les ravages restent dans les mémoires, la grippe asiatique de 1957, la grippe de Hong Kong de 1968, et la grippe porcine de 2009, qui a été la plus bénigne (figure 2). Aujourd'hui, nous affrontons la Covid-19.

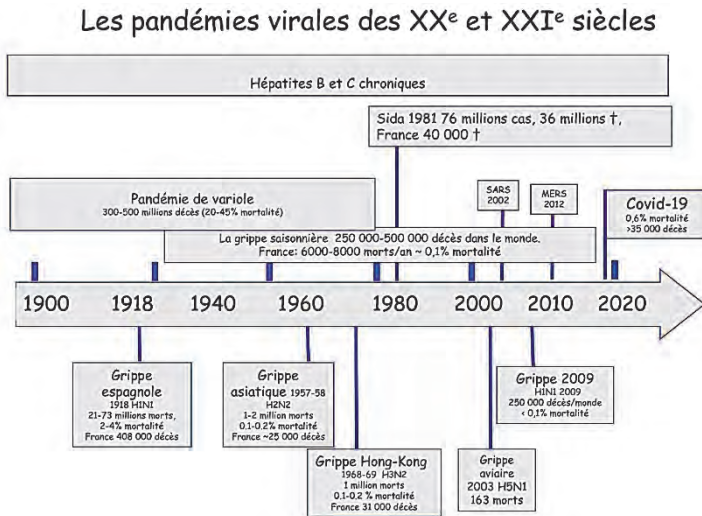


Figure 2. Pandémies virales des XX^e et XXI^e siècles.

2.1 La variole

La variole est un terrible fléau associé à une mortalité de près 30 % des patients [3, 4]. Les victimes survivantes gardent des séquelles pour la vie, telles que des cicatrices défigurantes et parfois une cécité. La maladie a été éradiquée grâce à la vaccine de Jenner, dont l'efficacité est illustrée par la figure 3.



Figure 3. Deux enfants de la même classe ont été en contact le même jour avec un même cas index à Leicester en 1900 ; l'un était vacciné, l'autre pas (*The NewSydenhamSociety*, London : 1904).

Aux États-Unis, la dernière alerte épidémique a été un cas de variole hémorragique à New York en 1947. Les gens faisaient la queue sur des kilomètres pour aller se faire vacciner avec un vaccin beaucoup plus dangereux que le vaccin ARN anti-SARS-Cov-2, puisqu'il provoquait une encéphalite sur 100 000 vaccinations et 1 décès par million. Malgré ces rares complications, le bénéfice-risque était parfaitement perçu par la population (figure 4).



Figure 4. New York, 1947, Personnes allant se faire vacciner contre la Variole [New Yorker, May 16, 1947, Photo. Associated Press].

2.2 La grippe

La mot grippe est dérivé de l'allemand *greifen* qui signifie « griffe ou croc », désignant une maladie qui « agrippe », à début très brutal. La grippe dite « espagnole » (alors qu'elle est d'origine américaine) s'est manifestée à partir de 1918 jusqu'en 1919, avec une fièvre à 40 °C et une pneumonie hémorragique. Il y avait une prédominance chez les adultes jeunes, qui mourraient de ce qu'on appelait la *cyanose héliotrope* : ils présentaient une détresse respiratoire avec asphyxie, comme on l'a vu pour la Covid-19 dans les cas sévères en réanimation [5, 6]. Cette pandémie a débuté aux États-Unis dans un camp militaire ; la première vague a été assez bénigne (létalité 0,1 %) ; mais la deuxième vague a été dévastatrice, atteignant un taux de létalité de 2 à 4 % pour une pandémie qui a touché parfois plus de 50 % de la population dans certaines régions

(figure 5), entraînant dans le monde une très forte mortalité qui a tant frappé les esprits. On estime qu'il y aurait eu entre 21 et 73 millions de morts. Il faut se rappeler qu'à cette époque il n'y avait pas de réanimation, pas d'oxygène, pas d'antibiotiques, pas de virus identifié – on croyait même que l'agent responsable était une bactérie – et pas de vaccins. C'est à cette époque que l'on a commencé à utiliser massivement les masques et le confinement, finalement la seule façon de se prévenir contre cette maladie aéroportée.

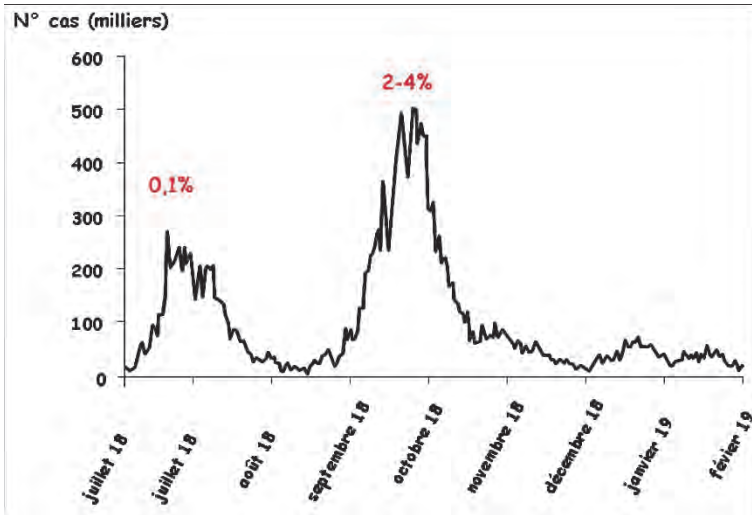


Figure 5. Évolution des cas de grippe espagnole entre juillet 1918 à février 1919.

Dans les années 2000-2005, on a pu reconstituer et entièrement séquencer le génome du virus de la grippe espagnole à partir des prélèvements réalisés en 1918 sur une femme Inuit de 18 ans inhumée dans le permafrost et de biopsies pulmonaires de soldats décédés de grippe. On a réussi à ressusciter le virus par manipulations génétiques. Le virus viable s'est avéré très virulent pour les primates. Ce virus pose la question de la conservation d'un virus hautement pathogène dans un laboratoire aux États-Unis. L'enseignement le plus intéressant de ces travaux est que tous les virus de la grippe humaine existant actuellement sont des descendants directs de ce virus de 1918, baptisé H1N1. Ainsi sur la figure 6, on peut distinguer une lignée humaine avec les virus saisonniers, et ceux de la grippe asiatique de 1957 et la grippe de Hong Kong de 1968. Parallèlement existe une lignée porcine provenant des États-Unis, qui a contribué par recombinaison à l'apparition d'un virus H1N1 porcin, à l'origine de la grippe de 2009 qui heureusement a été bénigne.

2.3 La Covid

La Covid-19 est une maladie respiratoire très contagieuse due à un coronavirus, le SARS-Cov-2. Ces virus sont connus depuis plus de 50 ans. Le SARS-Cov-2 a la propriété d'être très pathogène pour l'homme et de diffuser très vite la population. Cette pandémie a complètement bouleversé la vie dans le monde entier. Tout a commencé à Wuhan, cité de 11 millions d'habitants située dans une région du Hubeï (58 millions d'habitants). Les premiers cas auraient été localisés dans un marché aux poissons de cette ville. On pense que l'épidémie a commencé entre mi-octobre et mi-novembre 2019. Le virus a été isolé et séquencé début janvier 2020. À l'occasion du Nouvel An

chinois, 5 millions de personnes ont quitté Wuhan à partir du 20 janvier, pour rejoindre leurs familles dans toute la Chine. Puis, par le biais des transports aériens, l'Europe et l'Amérique du Nord ont été fortement touchées, en l'espace de deux mois (figure 7). Au début, la gravité de l'épidémie n'a pas été perçue par les responsables politiques de la plupart des pays. En réalité, personne n'avait anticipé l'ampleur du phénomène épidémique, illustré dans la figure 7.

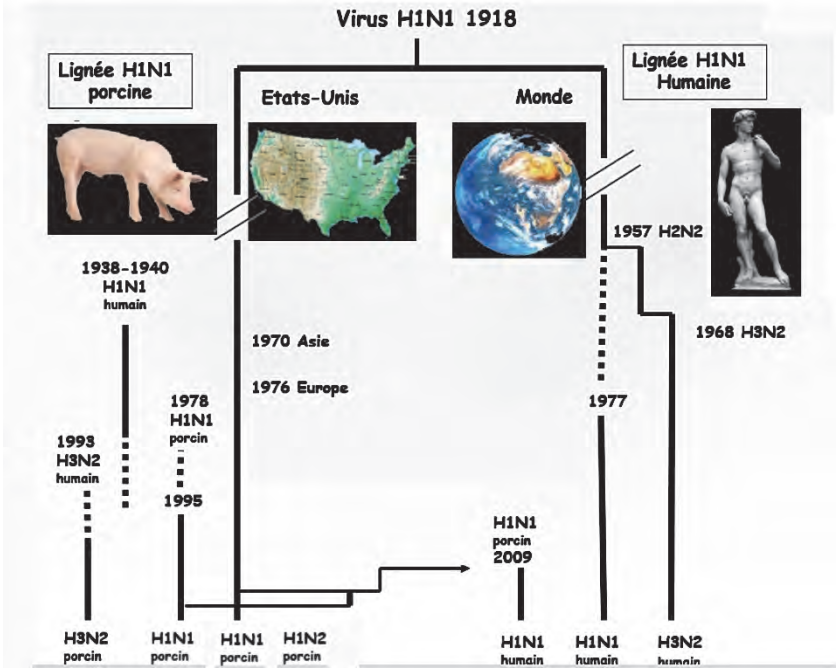


Figure 6. La descendance du virus H1N1 de la grippe espagnole ([6] p. 175).



Figure 7. L'extension de l'épidémie de la Covid-19 en avril 2020 [7].

La pandémie de Covid-19 a ensuite évolué par phases successives de deux à trois mois, entraînant des mesures itératives de confinement dans de nombreux pays [8]. Cela correspond à l'apparition séquentielle de multiples variants, car ces virus à ARN mutent en permanence et s'adaptent à leurs nouveaux hôtes. Chaque nouveau variant possède un avantage sélectif sur le précédent, lequel finit par disparaître dans la population. On compte plus de 7 variants qui se sont ainsi succédés (figure 8). La bonne nouvelle est que, dans l'ensemble, ces nouveaux variants semblent être plus contagieux, mais moins virulents. La chute de la mortalité, comparativement aux premiers mois de la pandémie, est aussi due à une meilleure prise en charge thérapeutique et à une forte couverture vaccinale avec les nouveaux vaccins à ARN. La mortalité a surtout concerné les personnes âgées de plus de 60 ans et les patients fragiles (diabète, obésité, immunodépression...). La maladie épargne les enfants pour des raisons inconnues. L'origine du SARS-Cov-2 demeure controversée [9].

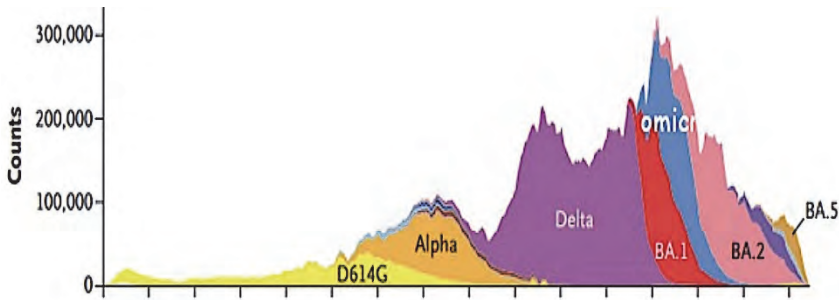


Figure 8. Cinétique des variants SARS-Cov-2 : Wuhan, Alpha, Delta, Omicron BA-1, BA-2, BA-5.

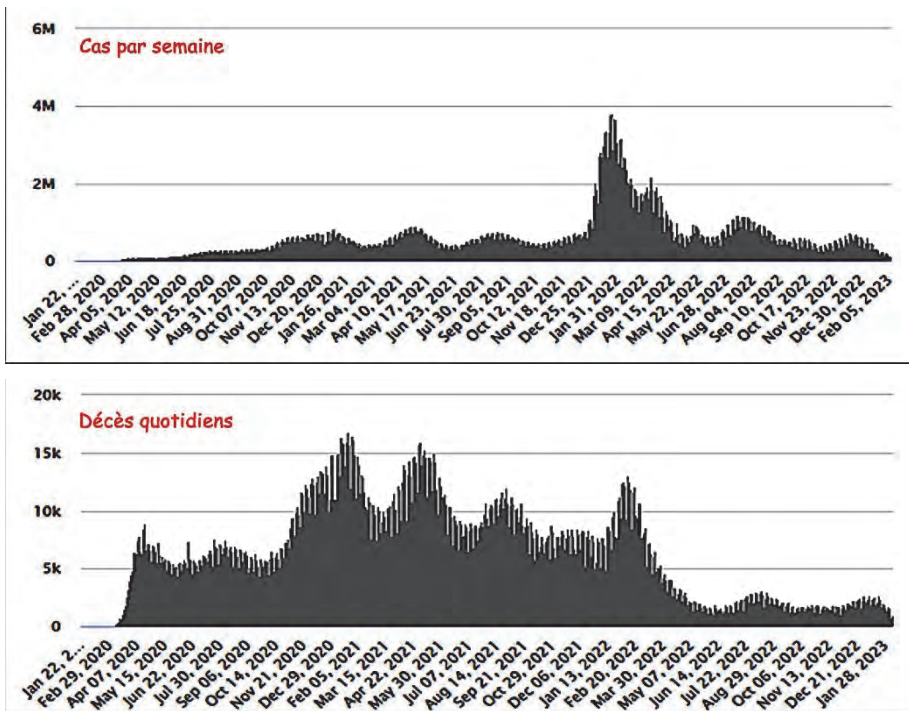


Figure 9. Évolution mondiale 2020-2022 des cas et des décès dus à la Covid [7].

La figure 9 montre l'évolution des cas par semaine et des décès quotidiens dans le monde entre 2020 et 2022. On distingue clairement différentes vagues qui vont progressivement, s'atténuer, au fur et à mesure de l'émergence de nouveaux variants et de l'acquisition d'une immunité collective contre le virus. Il s'agit d'un phénomène de passage vers une maladie endémique et saisonnière, que l'on retrouve dans plusieurs pandémies de grippe. On pourrait s'attendre pour les prochaines années à des vagues saisonnières régulières pendant plusieurs années.

À l'opposé de ces pandémies à incubation courte, il existe des pandémies à incubation longue de plusieurs mois ou années. Les virus responsables sont ceux de sida, de l'hépatite B et de l'hépatite C. Ces virus sont habituellement transmis par voie sexuelle ou par transfusion.

2.4 Le sida

Le sida est dû au VIH (virus de l'immunodéficience humaine) à ARN, et se manifeste par des signes cliniques : cachexie (perte de poids importante), et/ou des tumeurs (sarcome de Kaposi et lymphomes). La maladie a été découverte aux États-Unis par le CDC d'Atlanta du fait d'une demande accrue de pentamidine, un antiparasitaire utilisé pour traiter des pneumocystoses, pneumonies dues à un champignon, jusque-là exclusivement rencontrés chez des patients immunodéprimés par chimiothérapie. Entre 1967 et 1979, ils n'avaient reçu seulement que deux demandes, alors qu'ils en ont reçu 9 pour le seul mois d'avril 1981. L'enquête épidémiologique a révélé que ces patients étaient des adultes jeunes, homosexuels, souffrant d'infections pulmonaires graves, et que tous mouraient.

Le VIH qui s'est répandu sur l'ensemble du monde est en réalité d'origine africaine. À partir des séquences des rétrovirus isolés chez les animaux et chez l'homme, on a pu situer cette origine au début du XX^e siècle avec des premiers cas humains sporadiques. On a montré que le virus SIV (virus de l'immunodéficience simienne), répandu chez les chimpanzés en Afrique, était proche du VIH, parfois presque identique dans des zones au sud-est du Cameroun. Les tous premiers cas humains proviendraient d'une contamination par contact alimentaire ou sanguin (par blessure). Le virus a ensuite voyagé au gré des déplacements humains utilisant diverses voies fluviales de communication, vers Kinshasa, Brazzaville, Lubumbashi, Kisangani, Pointe Noire (figure 10). Kinshasa a probablement été le berceau puis la plaque tournante de la pandémie dans les années 1970-1980 [10–12]. Ainsi le virus a traversé l'Atlantique, peut être avec des Haïtiens venus travailler au Congo.

Cette maladie toujours mortelle sans traitement est devenue aujourd'hui une maladie chronique, à l'instar de la tuberculose, que l'on peut traiter par des médicaments antiviraux puissants, les anti-protéases (figure 11) [13].

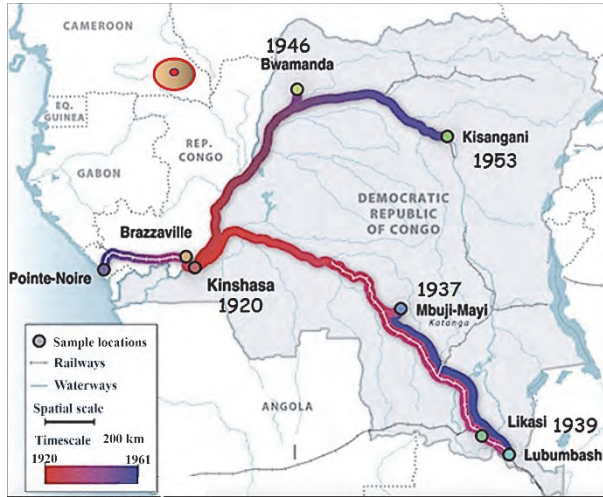


Figure 10. Émergence du sida en Afrique vers 1920 [10].

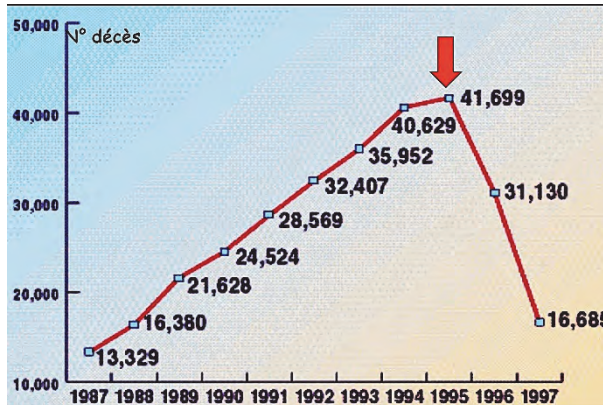


Figure 11. Évolution des décès par du sida aux États-Unis, avec une chute de la mortalité à partir de l'utilisation des anti-protéases en 1996. AIDS DEATH-US Wikimedia Commons.

2.5 Les hépatites B et C

L'hépatite B et l'hépatite C sont à l'origine de pandémies totalement silencieuses pendant de nombreuses années. Ces virus donnent des hépatites aiguës, dont on guérit en général. Cependant certaines personnes vont faire des hépatites chroniques, puis des cirrhoses et des cancers. Le passage à la chronicité est fréquent. Le virus de l'hépatite B (VHB à ADN) est responsable de 200 millions de cas et de 1 million de morts par an, avec 370 à 400 millions de porteurs sains. Mais on n'en parle pas. La population française est infectée à 0,3 %. Pour ce qui concerne le virus de l'hépatite C, l'OMS compte 71 millions de porteurs de ce virus, et chaque année 440 000 morts, avec 0,5 % de taux d'infection pour la population française. Mais en Afrique et en Asie on peut atteindre des taux de portage de l'ordre de 3 % [15]. Les modes de transmission sont essentiellement les transfusions, les dialyses et les toxicomanies [14].

3. Pandémies : les facteurs de risques

Aujourd'hui, les principaux facteurs de risque de pandémies dans notre monde sont : (1) la croissance démographique ; (2) la mobilité, notamment par transport aérien qui permet une diffusion très rapide des virus à transmission aérienne ; (3) l'état de santé général de la population, incluant la fragilité due au vieillissement et aux maladies chroniques souvent liées à l'âge, comme le diabète et l'hypertension ; (4) des facteurs environnementaux, notamment le réchauffement climatique.

3.1 La croissance démographique.

La population du monde est actuellement estimée à 8 milliards d'habitants. Selon certains, elle pourrait atteindre 10 milliards en 2050. Cependant le taux de fécondité de l'humanité est en baisse. Il était en moyenne en 1950 de 5,3 enfants par femme. Il est estimé aujourd'hui à environ 3,2. Certains démographes pensent qu'à terme on pourrait voir diminuer la population mondiale, comme ce serait le cas pour la Chine. Cela reste une hypothèse fondée sur les taux de fécondité nettement plus faibles qu'en 1950. L'Afrique serait le principal continent ayant une croissance démographique au milieu de ce siècle.

L'urbanisation pose un très important problème, avec l'augmentation du nombre de mégapoles, villes de plus de 10 millions d'habitants.

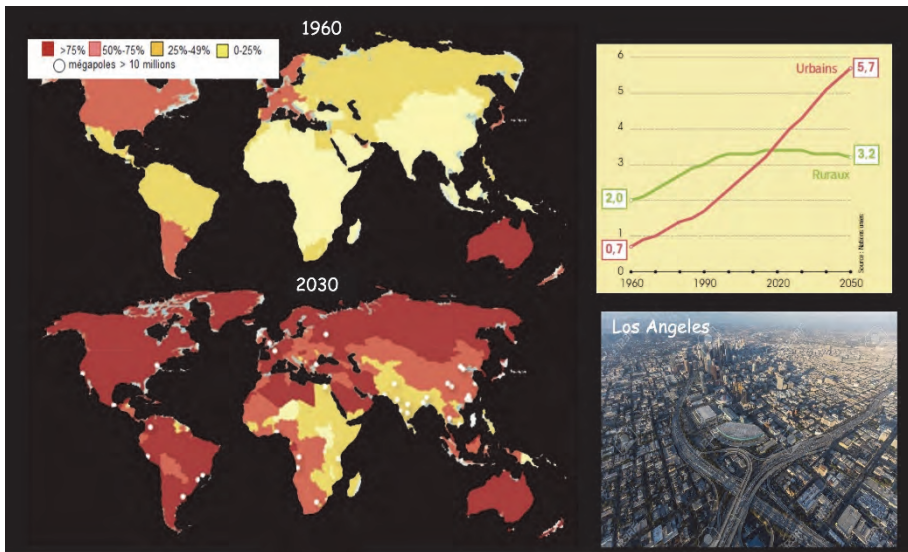


Figure 12. Urbanisation et mégapoles. À gauche, les points blancs sont les mégapoles 1960 et en 2030. À droite, la cinétique de l'urbanisation jusqu'en 2050. Los Angeles est un exemple de mégapole. Figure inspirée de Alternatives Economiques : L'explosion des villes. 01/10/216.

En 1960, on comptait quelques mégapoles en Europe et aux États-Unis, comme New York et Londres. Aucune mégapole n'existait en Asie, en Amérique du Sud et en Afrique. On a ensuite assisté à un exode rural entassant de plus en plus les gens dans des villes énormes, de plus en plus polluées, avec de multiples problèmes de promiscuité. Il s'agit là d'un problème majeur pour l'expansion des épidémies. En 2030, on prévoit qu'il y

aura des dizaines de mégapoles en Inde, en Turquie et en Chine, en Afrique et en Amérique latine (Mexico...), deux continents jusque-là épargnés. La plus grande ville du monde est Shanghai, autour de 30 millions d'habitants. Cette croissance du nombre de mégapoles va de pair avec une urbanisation générale illustrée par la figure 12. Aujourd'hui, la population mondiale est pour moitié urbaine et pour moitié rurale. En 2050, on aura probablement 64 % d'urbains contre 36 % de ruraux.

3.2 La mobilité des populations

Le transport aérien est un des principaux facteurs de propagation des épidémies à transmission aérienne. En 2019, 4,3 milliards de personnes ont pris l'avion. À cette époque, les communications aériennes entre Shanghai, Hong Kong et Wuhan, avec les États-Unis, la France et l'Angleterre étaient de 8 à 10 vols par jour, nombre considérable. De tels trafics sont vraiment un facteur de risque essentiel pour la diffusion des pandémies dues à des virus aéroportés. À cela, il faut ajouter les déplacements massifs de populations, ce qui favorise des contacts interhumains, notamment lors des guerres, des sécheresses, des inondations...

3.3 L'état de santé général de la population.

Du fait du vieillissement de la population mondiale, il existe de véritables pandémies de maladies chroniques non transmissibles, qui fragilise les populations rendues ainsi plus vulnérables aux infections. Tel est le cas du diabète, de l'hypertension artérielle, du surpoids et de l'obésité, les bronchites chroniques, les cancers.

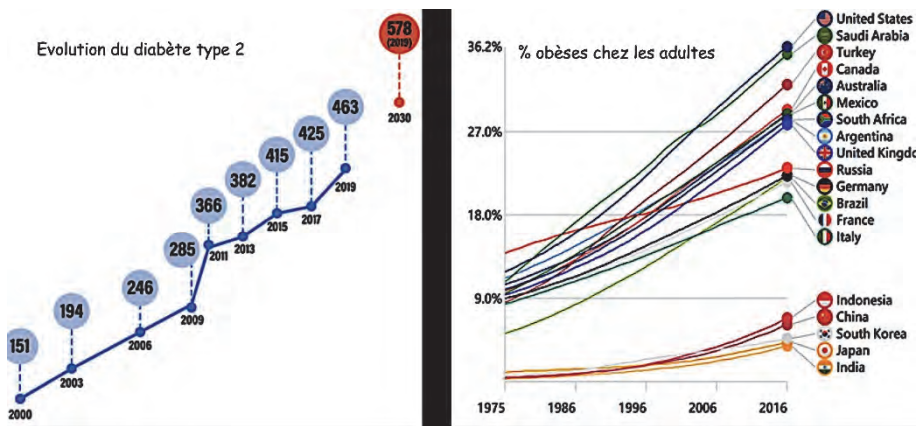


Figure 13. Évolution récente au niveau mondial du diabète et de l'obésité [15].

Le diabète de type 2 atteint 463 millions en 2019 et l'évolution est toujours ascendante, pouvant atteindre 578 millions en 2030. L'obésité est aussi un important facteur de risque d'infections graves. On estime le nombre d'obèses à environ 650 millions et à 1,9 milliard les personnes en surpoids (figure 13) [16]. Les obèses ont eu ainsi un taux de létalité au Covid-19 beaucoup plus élevé que celui retrouvé dans le reste de la population.

Parmi les autres maladies facteurs de risque, on peut citer l'hypertension, les BPCO (Broncho-pneumopathies chroniques obstructives), et les cancers.

3.4 Le réchauffement climatique

Le réchauffement climatique *de facto* entraîne d'inévitables migrations animales et humaines, à cause des catastrophes climatiques (sécheresses, inondations, tempêtes...). Ces phénomènes augmentent la fréquence des contacts avec les réservoirs animaux. Il y a aussi la fonte des glaces et du permafrost.

Des simulations du réchauffement climatique pouvant impacter la transmission des virus ont été récemment rapportées [17]. En simulant la déforestation et les extensions des zones d'élevage et d'agriculture puis en répertoriant 10 000 virus potentiellement pathogènes circulant chez les mammifères et potentiellement capables d'infecter l'homme, il a été montré que le réchauffement climatique augmente le risque de transmission à l'homme par un facteur 4 000.

Il existerait sur le globe des points chauds pouvant être des sources d'émergence de pandémies. Ces foyers putatifs sont déterminés par simulation de la probabilité de contact avec des réservoirs animaux, entraînant l'émergence de zoonoses chez les animaux domestiques et, *a fortiori*, d'épidémies chez l'homme. Ces points chauds sont en Chine du Sud, en Inde, et certaines régions de l'Afrique équatoriale (figure 14).

Le changement climatique a aussi des conséquences sur la répartition géographique des arthropodes. Par exemple, le moustique tigre, *Aedes albopictus*, vecteur des virus de maladies tropicales virales, telles que la dengue, le chikungunya et le virus Zika, lesquelles pourraient survenir dans les pays tempérés comme la France. La répartition de ce moustique en 2021 en Europe est illustrée dans la figure 15 [18], où l'on voit la simulation de son expansion d'ici 2054. En France entre 2014 et 2019, on a observé pour la première fois 31 cas de dengue autochtone, alors qu'auparavant il n'y avait que des cas importés. On peut s'attendre ainsi à une augmentation du nombre de cas de dengue dans le sud de la France.

La simulation effectuée par le GIEC montre que le moustique tigre risque d'envahir pratiquement toute l'Europe autour de 2050 [19]. Ces simulations ne sont pas des certitudes, mais on peut craindre ce type de scénario pour l'avenir.

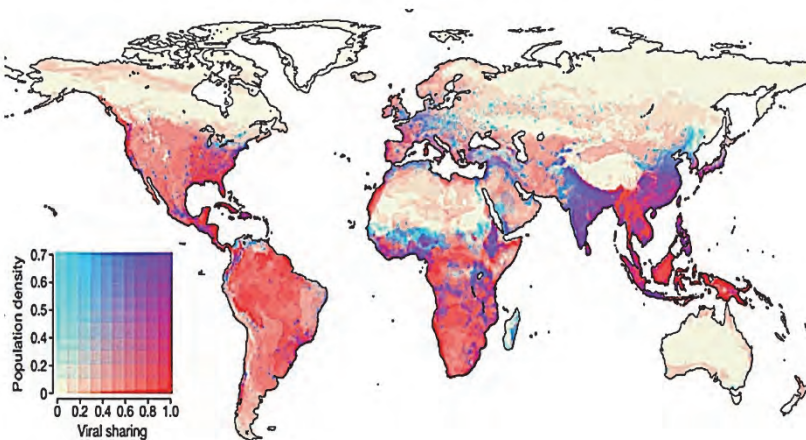


Figure 14. Réchauffement climatique et risques de transmission des virus : les points chauds apparaissent en bleu foncé [17].

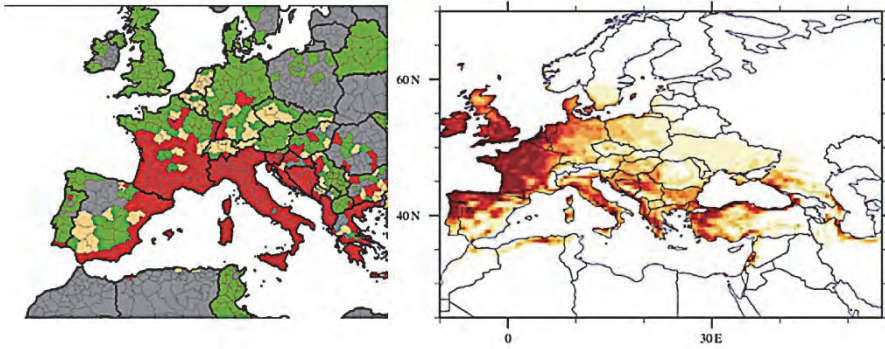


Figure 15. Répartition du moustique tigre et simulation pour 2050. À gauche, situation 2021 [18] ; à droite projection à 2045-2054 selon le GIEC [19].

Un autre exemple concerne la maladie de Lyme, transmise par une tique, *Ixodes ricinus*, qui vit dans les forêts [20]. Cette maladie entraîne en France plusieurs dizaines de milliers de cas tous les ans. L'évolution de la répartition géographique des tiques au Canada est rapportée dans la figure 16 [21]. On voit l'habitat du vecteur s'étendre progressivement, couvrant de larges zones géographiques dans les années 2050-2080.



Figure 16. Extension anticipée de la maladie de Lyme au Canada (Atlas climatique du Canada) [21].

4. Conclusion

Selon l'OMS, la Covid-19 a fait plus de 20 millions de morts, par extrapolation à partir des cas confirmés et déclarés par les pays. Cette mortalité a été atténuée par l'utilisation généralisée des vaccins ARN. La science trouve des solutions, comme le montre aussi l'exemple du sida. À l'avenir, il paraît inéluctable que nous aurons à affronter d'autres pandémies, plus ou moins graves. Il faut tirer des leçons du passé et se tenir vigilant pour s'en prémunir. Notre destin est entre nos mains.

Références

- [1] Plowright, R., Parrish, C., McCallum, H. *et al.* Pathways to zoonotic spillover. *Nat Rev Microbiol*, **15**, 502-510 (2017).
- [2] Rochman, N.D., Koonin, V., Learn from the past to predict viral pandemics. *Nature News and Views* (11 October 2023).
- [3] Hopkins D. R. *Princes and Peasants: Smallpox in History*. Chicago : University of Chicago

Press (1983).

[4] Berche, P., Life and death of smallpox. *Presse Med*, **51**, 104117, (2022).

[5] Berche, P., The spanish flu, *Presse Med*, **51** (3), 104127 (2022).

[6] Berche, P., Faut-il avoir peur de la grippe ? Paris : Odile Jacob (2012).

[7] Coronavirus Resource Center, Johns Hopkins University of Medicine, <https://coronavirus.jhu.edu/map.html>

[8] Buisson Y., Covid-19, an unfinished story, *Presse Med*. **51**, 104131 (2022).

[9] Berche P., Gain-of-function and origin of Covid-19, *Presse Med*, **52**, 104167 (2023).

[10] Faria, N.R., Rambaut, A., Suchard, M.A., Baele, G., *et al.*, HIV epidemiology. The early spread and epidemic ignition of HIV-1 in human populations. *Science*, **346** (6205):56-61 (2014).

[11] Wise, J., HIV pandemic originated in Kinshasa around 1920. *Br Med J*, **349**: g5967. (2014).

[12] Barin F., HIV / AIDS as amodel for emerging infectious disease: Origin, dating and circumstances of an emblematic epidemiological success, *Presse Med*, **51**,104128 (2022).

[13] Barré-Sinoussi, F., Ross, A., Delfraissy, J.F. Past, present and future: 30 years of HIV research. *Nat Rev Microbiol*, **11**, 877–883 (2013).

[14] Alter, M.J., Epidemiology and prevention of hepatitis B, *Semin. Liver Dis.*, **23** (1), 39-46 (2003).

[15] Hofstraat, S.H.I., Falla, A.M., Duffell, E.F., Hahné, S.J.M., *et al.* Current prevalence of chronic hepatitis B and C virus infection in the general population, blood donors and pregnant women in the EU/EEA: a systematic review. *Epidemiol Infect* **145** (14):2873-2885 (2017).

[16] Kirchengast, S., Diabetes and Obesity – An evolutionary Perspective. *AIMS Medical Science* **4** 28-51 (2017).

[17] Carlson, C.J., Albery, G.F., Merow, C. *et al.* Climate change increases cross-species viral transmission risk. *Nature* **607**, 555–562 (2022).

[18] European CDC, *Aedes albopictus* – current known distribution: March 2021. <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/aedes-albopictus-current-known-distribution-march-2021>.

[19] Proestos, Y., Christophides, G.K., Ergüler, K., *et al.* Present and future projections of habitat suitability of the Asian tiger mosquito, a vector of viral pathogens, from global climate simulation. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* **370** (1665):20130554 (2015).

[20] Van Hout, M.C.. The Controversies, Challenges and Complexities of Lyme Disease: A Narrative Review. *J Pharm Pharm Sci*, **21**(1), 429-436. (2018).

[21] Atlas climatique du Canada. *L'impact des changements climatiques sur la maladie de Lyme*. Prairie Climate Centre (n.d.). <https://atlasclimatique.ca/limpact-des-changements-climatiques-sur-la-maladie-de-lyme>

2

Virus pandémiques, les défis de l'anticipation scientifique¹

Bruno Canard

Directeur de Recherche CNRS
Laboratoire Architecture et Fonction des macromolécules biologiques
Unité mixte CNRS/Aix-Marseille Université

Abstract

The Covid-19 pandemic has exposed our world's vulnerabilities to emerging viruses and highlighted the critical importance of preparedness and scientific research. For centuries, viruses have caused devastating epidemics and influenced our history. Today, as we face increasingly frequent and potentially devastating viral threats, it is imperative to understand the mechanisms of infection, develop effective prevention and treatment strategies, and prepare for future pandemics. This paper explores in depth the origins of viruses, shedding light on their ancient history and coevolution with humans and animals. It also examines how we can prepare for outbreaks, highlighting the importance of rapid diagnostics, accelerated vaccine production and the availability of antiviral drugs. Rapid reaction and listening to alerts are crucial elements in containing a pandemic before it spreads uncontrollably. The mechanisms of coronavirus infection are also detailed, with attention paid to their viral cycle and therapeutic strategies to prevent their entry into cells or disrupt their replication. The ethical and safety issues of virological research are addressed, including the risks associated with gain-of-function experiments and the need for international regulation to govern such research. By combining current scientific knowledge with constant vigilance, we can hope to anticipate and mitigate the impacts of future health crises. Science is essential to address these challenges, but it is also crucial to disseminate knowledge to the general public to strengthen understanding and acceptance, a major societal issue.

1. Une longue histoire

Les virus sont la deuxième cause de maladies infectieuses et accompagnent les hommes et les animaux depuis longtemps. Concernant l'histoire de leur apparition – ou de la certitude de leur présence – on a pu remonter très loin pour les virus à ADN. Mais très récemment, des techniques de détections de l'ARN ont été mises au point, ce qui amène à changer quelque peu notre perspective sur l'histoire des virus. Et aussi répondre à des questions telles que, par exemple, quel a été l'animal qui a introduit la rougeole, et quand ? À ce sujet, les interactions entre biologistes, anthropologues et archéologues sont déjà et seront très productives de savoirs. Ainsi une stèle égyptienne d'environ 1400 ans avant notre ère où un pharaon est représenté avec une jambe amincie et un

¹ Ce chapitre est une transcription, effectuée par Jean-Pierre Treuil (AEIS), de la conférence tenue par Bruno Canard le 23 novembre 2023 dans le cadre du colloque AEIS. Il a été relu et amendé. Il est publié avec son accord.

support, fait soupçonner une atteinte de poliomyélite.

2. Comment se préparer aux pandémies virales par temps calme

Quelles sont donc les méthodes de préparation qui pourraient nous donner à l'avance les moyens de contrôler les pandémies ? On peut en répertorier quatre catégories. Au-delà de l'analyse des facteurs de risques, densités de population, mobilités, changement climatique, trois éléments clés doivent être mentionnés, pour lesquels les sciences fondamentales peuvent avoir un rôle très important :

- la capacité de faire très rapidement des diagnostics, savoir d'identifier le plus vite et le plus précisément possible le pathogène responsable, sinon on ne pourra rien faire. Ainsi, en 2003, le SARS-Cov-1 a été longtemps confondu avec un autre virus respiratoire. Pour la Covid, l'identification du virus a été achevée en février 2020, date à laquelle il a été nommé SARS-Cov-2. Mais il y a eu aussi un moment de flottement, rendant incertaine la détection des cas.
- Une fois le pathogène identifié, il faut être en capacité de produire rapidement un vaccin. Mais on ne peut rien faire à l'avance car on ne sait pas sur quelle protéine il va être ciblé. Ce qu'on peut faire, c'est essayer de réduire le délai. Le « Graal » serait d'arriver à 100 jours maximum pour avoir un vaccin efficace, prêt et diffusable dans la population. Pour la Covid, rappelons-le, cela a été fait en quelques mois.
- En attendant de disposer d'un vaccin, dans ces premiers mois qui sont clés dans la diffusion de l'épidémie, il faudrait pouvoir disposer de médicaments antiviraux. Pour pouvoir, autour d'un cas contact, d'un cas suspect, couper la chaîne de transmission de la maladie avant que le virus se transmette. Lors de la Covid, les seuls traitements qu'on a eu en quelques mois étaient des anticorps monoclonaux. Ces derniers cependant ont deux inconvénients principaux, peut-être résolus dans les années qui viennent : il faut les injecter, ce qui nécessite un acte médical à l'hôpital, et leur coût est assez important.

2.1 De l'importance de réagir vite

Les infections virales concernées ici posent un problème car elles arrivent en générant une maladie subite à laquelle le corps réagit de deux manières. Il y a d'abord une réponse immunitaire immédiate, innée des cellules infectées, ayant appris à se défendre au cours de l'évolution, et puis une réponse immunitaire différée. Mais de mauvais diagnostics, ou leur survenue tardive faisaient que l'infection était déjà trop développée pour que l'on puisse espérer altérer réellement la croissance du virus. Si bien que pendant des années on a considéré qu'avec les médicaments antiviraux on ne pouvait rien faire, ces médicaments étaient impuissants. C'est effectivement le cas lorsque suite à un mauvais diagnostic on se trompe de médicament ou bien quand on l'administre trop tard. Et l'on constate que souvent le bon sens a été incroyablement malmené : toute une liste de médicaments a ainsi été testée par le biais d'essais cliniques, en cherchant un résultat sur des malades qui étaient presque mourants. Le virus était venu, il avait frappé, il était parti provoquant derrière lui une réaction cytokinique, une hyperinflammation, il était totalement inutile de donner un médicament.

La pandémie a amené sur ce point une prise de conscience du fait qu'il est important de bien définir les essais cliniques et d'administrer le bon médicament antiviral dès le départ de la maladie.

2.2 De l'importance d'écouter les alarmes

Certes, la Covid nous a pris par surprise, mais la menace d'épidémies virales était perçue et annoncée depuis longtemps. Ainsi, en 2006 déjà, nous avons présenté un état des lieux où nous attirions l'attention sur une liste de neuf virus qui avaient « bougé » au cours des dix dernières années. Et nous avons à cette occasion avancé l'idée d'une administration immédiate de médicaments autour des cas contacts. La liste mentionnait deux nouveaux virus à ARN, le virus de Nipah en Malaisie en 1997 et le virus du SRAS en 2003. Elle mentionnait également d'autres virus qui depuis se sont manifestés d'une façon plus ou moins prononcée dans l'actualité : le virus de la variole du singe dont on a parlé récemment, le Chikungunya, qui a continué, ou le virus de Marburg qui a à nouveau sévi en 2014 avec une grosse épidémie d'Ebola, qui est un virus voisin. Cette liste nous paraît effectivement indicative de ce qui peut arriver : le virus de l'encéphalite japonaise présent en Inde ; la Rift Valley Fever, qui a franchi la mer Rouge et continue son développement géographique ; la grippe bien sûr – avec sa variante dite grippe de Hong Kong – qui est toujours là ; le West-Nile dont on détecte toujours des cas résurgents un peu partout en Europe du fait de l'extension de l'aire du moustique qui le porte.

Il faut aussi rappeler dans cet esprit (cf. figure 1) la lettre que nous avons adressée en 2015 à la Communauté Européenne avec des collègues particulièrement concernés par les antiviraux. Cette lettre attirait l'attention sur neuf groupes de virus à ARN pouvant constituer des menaces importantes et ayant une forte probabilité d'émergence. Et de fait, Zika est arrivé en 2016, puis le SARS-Cov-2 en 2019, et enfin en 2022 l'épidémie de poliovirus-entérovirus passée au second plan sous la Covid.

2015: A warning sent to the EC – FP after Ebola 2014

ANTIVIRAL DRUGS: A VITAL COMPONENT OF A EUROPEAN FIRST RESPONSE TO EMERGING RNA VIRUS INFECTIONS

JOHAN NEYTS¹, PATRICK CHALTIN², ERIC J. SNIJDER³ & BRUNO CANARD⁴

¹ Rega Institute for Medical Research, University of Leuven, Belgium (www.antivirals.be)

² Centre for Drug Design & Discovery, Leuven, Belgium (www.cd3.eu)

³ Leiden University Medical Center, the Netherlands

⁴ University Aix-Marseille, France

Here, we list 9 groups of RNA viruses that are important human pathogens and from which newly emergent viruses have a high probability of arising – (i) dengue, West Nile and related flaviviruses, (ii) coronaviruses, (iii) enteroviruses, (iv) noroviruses, (v) chikungunya and related alphaviruses, (vi) paramyxoviruses, (vii) rabies and related rhabdoviruses, (viii) bunyaviruses & (ix) arenaviruses. Given the funding opportunity, we would assemble an appropriate consortium of experts to develop an antiviral drug discovery programme for these viruses, with a view to licensing the most promising classes of inhibitors to pharmaceutical companies for advanced preclinical and clinical development.

2016: Zika

2019: SARS-Cov2

2022: Polio-Entero

Figure 1. Extrait de la lettre adressée à la Communauté Européenne en 2015 concernant le risque d'émergence de nouveaux virus ARN.

2.3 Nos réactions à l'apparition du SARS-COV-2

Quelles ont été nos réactions lors de l'émergence de la Covid, début 2020, et l'apparition de différents virus ? Concernant les maladies avec atteintes respiratoires potentiellement graves, nous avons notamment en mémoire l'épidémie du SARS-COV-1 apparue en 2002 en Chine, marquée par une létalité importante (environ 10 %). Et celle du MERS-COV, apparue en 2012 en Arabie Saoudite, marquée par une létalité très importante (30 %), mais dont le nombre de cas est resté très limité.

La figure 2 montre différentes cinétiques d'apparition. Ainsi voit-on dans la partie gauche, avec le MERS, un type d'émergence lente ; la question que l'on peut se poser est celle de la probabilité que ce virus adopte brusquement une cinétique rapide, telle que celle d'Ebola en 2014 et celle du SARS en 2003, avec une pente d'augmentation très importante. Cette année-là plusieurs pays ont été touchés successivement à partir de la Chine et de Hong Kong, puis l'épidémie a cessé de croître et s'est arrêtée pour des raisons non complètement élucidées.

Donc début 2020, nous comparions dans notre laboratoire les évolutions des nombres quotidiens de cas et de décès avec celles observées pour le SARS-COV-1 (cf. figure 2, partie droite), lesquelles avaient déjà été très rapides. Aux yeux d'Etienne Decroly, la progression de la nouvelle maladie est apparue tout d'un coup dans cette comparaison très alarmante, pouvant laisser présager quelque cent mille morts. Cette extrapolation nous a laissé sceptique dans un premier temps, mais il a fallu se rendre à l'évidence, Etienne Decroly avait raison et il y a eu une alerte.

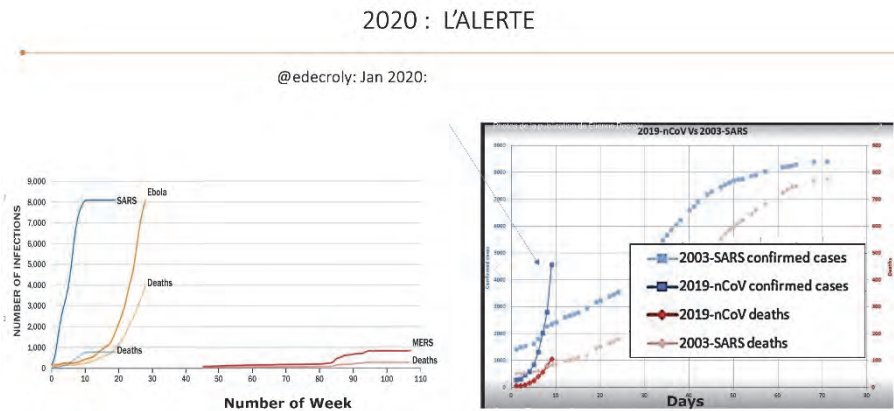


Figure 2. Différentes cinétiques d'apparition d'épidémies de virus ARN [1].

3. Les coronavirus, origines, mécanismes d'infection et angles de contre-attaque

Les coronavirus sont donc des virus « enveloppés » avec cette forme typique en couronne de diamètre de l'ordre de 100 nm et un génome de 30 000 nucléotides : ils possèdent ainsi un matériel génétique environ trois fois plus fourni que les virus ARN classiques comme celui de la poliomyélite, la dengue ou d'autres encore plus petits. C'est-à-dire qu'ils emmagasinent beaucoup de possibilités d'interactions, de

développement d’enzymes, de nouveaux mécanismes. Toutes ces possibilités sont très intéressantes à étudier : en recherche fondamentale, c’est une bénédiction car cela sert de modèle.

3.1 Comment sont-ils apparus ?

La figure 3 résume ainsi différents coronavirus connus pour être pathogènes pour l’homme, et auxquels on a pu grâce à la génétique et au séquençage, attribuer un hôte de départ, la chauve-souris principalement, dans quelques cas des rongeurs. Dans quelques cas on ne sait pas quel a été l’animal intermédiaire. Ainsi que l’a rappelé Patrick Berche, la transmission directe est très peu fréquente, et quand elle se produit en atteignant une personne, elle ne se poursuit pas au-delà. Selon les médecins travaillant sur des pneumopathies, on peut dire que chaque année en France entre cinq cents et mille personnes meurent de pneumopathies foudroyantes causées par des coronavirus ou apparentés, mais sans que l’on ait pu isoler le pathogène. Parmi ces cas, il est probable qu’il y ait une forte proportion de virus nouveaux, dont on ne connaît ni le réservoir ni la manière dont ils ont été rencontrés par les malades, mais qui ne sont pas transmissibles secondairement.

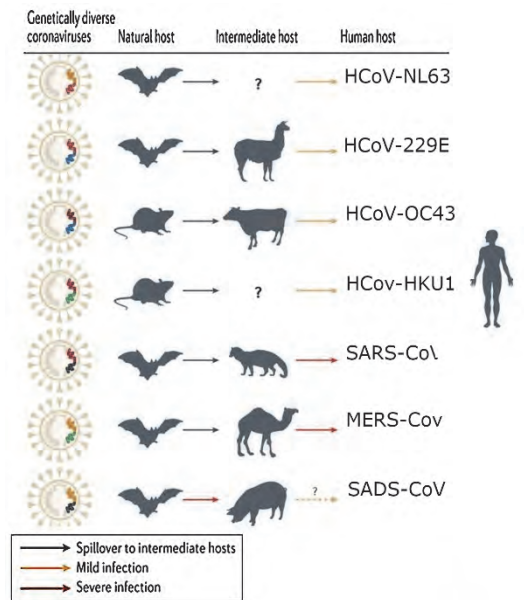


Figure 3. Mécanismes d’émergence des CoV Humains [2, 3].

3.2 Le cycle du virus

Le cycle du virus de la Covid se décrit, vu de loin, de façon simple : un virus se fixe sur un récepteur, relâche à l’intérieur de la cellule son matériel génétique, lequel va être répliqué plusieurs fois, les répliquants ainsi formés étant ré-encapsidés pour former de nouveaux virus, qui vont ressortir en abondance ; ce cycle met en œuvre différents mécanismes dont certains, dans le cas présent, ne sont pas bien connus.

La première étape est donc l’entrée du virus dans la cellule. Le processus est analogue

à celui de notre monde macroscopique : il y a une serrure, fixée sur la membrane de la cellule, c'est un certain récepteur comme l'ACE2 mentionné sur la figure 4 ; il y a une clé, fixée sur celle du virus, c'est une certaine protéine virale, dans le cas présent la fameuse « spicule » (*spike*, en anglais). La clé se loge dans la serrure, la porte s'ouvre. On comprend que cette interaction détermine quelle cellule va être infectée par quel virus : si vous changez la clé vous ne pouvez pas entrer. Si la clé est ainsi celle d'un virus adapté à une espèce animale, elle ne pourra pas être utilisée pour infecter une cellule humaine, sauf si l'évolution par exemple, finit par la transformer par mutation avec au bout du compte une adaptation aux serrures humaines.

Bien sûr, les chercheurs ont pu pousser l'analyse, en travaillant au niveau moléculaire et infra-moléculaire. La clé, la protéine Spike possède un mécanisme analogue à celui d'une clé de voiture, lorsqu'on appuie sur un bouton et que le pêne de la clé s'ouvre. Elle se présente d'abord dans une configuration de sauvegarde, une configuration fermée. Mais aux abords de la cellule, une enzyme présente à sa surface fait passer la protéine de sa configuration fermée à une configuration ouverte, la partie de la protéine qui va se fixer au récepteur va se trouver exposée. S'établit à cet instant un contact, une sorte de pont entre le virus et la cellule, puis, par un jeu de forces moléculaires, une fusion des deux membranes, et dès lors, le matériel génétique va pouvoir être transmis.

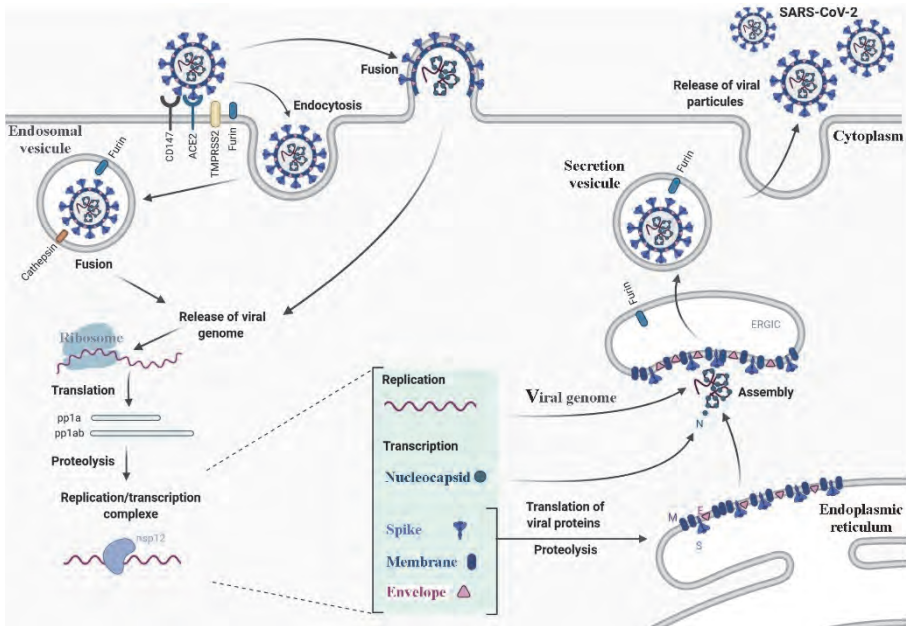


Figure 4. Le cycle de réplication du coronavirus [4].

3.3 Angles d'attaque thérapeutiques

Deux types d'approches se dessinent donc, pas nécessairement exclusifs l'un de l'autre : empêcher l'entrée du virus dans la cellule, et/ou agir à l'intérieur sur les processus de réplication et de reconstruction. Une variante de cette dernière catégorie consiste à stimuler le système immunitaire pour éliminer la cellule atteinte.

3.3.1 Ils ne rentreront pas !

Dans le premier type s'inscrivent les *anticorps monoclonaux* dans leur action neutralisante : en reconnaissant la protéine Spike et en s'y attaquant, la clé ne fonctionne plus. Cette approche a montré son efficacité neutralisante sur la souche originale du SARS-COV-2, mais les problèmes sont apparus avec certains des variants, dont Omicron. C'est qu'en effet le passage d'un variant à l'autre se fait beaucoup par mutations sur la protéine Spike, et dès lors tel anticorps monoclonal actif sur un variant ne le sera plus sur un autre.

C'est aussi dans le cadre de ce premier type que se place l'affaire de l'hydroxychloroquine. Lors de l'attaque du SARS-Cov-1 en 2002 sont parues en 2004 et 2009 [5, 6] des études montrant l'efficacité de l'hydroxychloroquine sur des cellules *en culture, in vitro*. En 2020, de nombreuses études redécouvrent la chloroquine et semblent confirmer cette possible action. Les cellules concernées ne sont pas des cellules pulmonaires. Mais on s'aperçoit vite que cette efficacité disparaît lorsque les cellules, et c'est le cas des cellules pulmonaires humaines, possèdent dans leur matériel génétique un certain gène exprimant une enzyme, en l'occurrence la « protéase transmembranaire 2 » capable d'initier le processus d'entrée du virus. Pour les cellules rénales cultivées *in vitro* le virus ne trouve effectivement pas d'entrée, car le gène exprimant la protéase 2 n'est pas présent dans leur génome. Et au contraire, il en trouve une dans les cellules pulmonaires humaines, sur laquelle il se précipitera si d'autres portes lui sont bloquées. Le virus échappe ainsi à l'action de l'hydroxychloroquine. Elle est inefficace, ce qui a fini par être admis après de longues polémiques.

Cet épisode rappelle qu'il peut exister plusieurs portes possibles pour un même virus, des majeures et des mineures, et que la neutralisation des portes majeures ne suffit pas, il faut les neutraliser toutes.

3.3.2 Ils sont rentrés !

Le second type d'approche se base sur des médicaments constitués de plus petites molécules qui vont donc pénétrer dans la cellule, se fixer sur les protéines du virus et perturber la reconstruction de particules virales.

Nombre de médicaments ont ainsi été testés par la technique du *repositionnement*. Ce sont des médicaments dont on sait qu'ils sont sans effet sur une cellule saine, mais qu'ils ont une action sur une cellule malade. On a ainsi sélectionné des médicaments ayant obtenu l'autorisation de mise sur le marché et s'étant montré actifs dans des maladies relevant de divers domaines (cardio-vasculaires, cancers...) pour voir si par hasard ils agiraient aussi sur le virus. Dans ce jeu il n'est pas bon, pour garder la confiance de la société, d'être trop pressés, de faire n'importe quel essai, notamment lorsque l'on sait que le médicament, spécifiquement actif sur telle protéine, ne pourra l'être dans le nouveau cas car cette protéine ne joue aucun rôle dans le processus d'infection concerné. Cela a pourtant été le cas pour l'oseltamivir inhibiteur de la neuraminidase, alors qu'on savait que le SARS-Cov-2 était dépourvu de cette dernière enzyme, et qu'elle ne participait pas au cycle de sa réplication (contrairement au virus de la grippe par exemple).

Il y a eu par contre des médicaments qui ont été repositionnés avec une valeur scientifique prédictive beaucoup plus importante, tel en effet le remdésivir, qui avait été étudié depuis quelque temps sur d'autres virus.

3.3.4 Quels enseignements faut-il tirer de toutes ces tentatives ?

Comme déjà dit, l'enjeu en cas de nouvelle pandémie liée à un coronavirus est, au-delà de la nécessité d'un diagnostic et d'une identification rapides, de pouvoir administrer dès le début, des médicaments antiviraux capables de sauver les malades et de stopper la progression de la maladie.

Mais, on l'a vu pour le SARS-Cov-2, les approches du premier type sont facilement contournées par la sélection naturelle, produisant à chaque fois de nouveaux variants, nécessitant constamment de créer de nouveaux médicaments. Mettre au point des anticorps monoclonaux « universels » par exemple, capables de faire face à la variété des virus et de leurs mutations possibles s'avère une chose très difficile, voire impossible. Les approches du second type, dans lesquelles des médicaments agissent à l'intérieur de la cellule pour casser les processus de réplication, paraissent une voie plus ouverte. En effet, dans la réplication virale, le moteur de tous les coronavirus reste le même. Si donc on trouve une molécule active sur un isolat identifié en début de pandémie, il est probable qu'elle restera active sur d'autres variants. Dans ces approches donc, pouvoir disposer de médicaments à large spectre disponibles très rapidement de façon massive, et les administrer dès les premiers symptômes paraît un objectif atteignable. Si en 2020 nous avons été dans cette situation, on peut penser que l'on aurait pu sauver un très grand nombre de malades.

Un fait également à retenir, bien illustré par l'épisode de la Covid, c'est la connexion étroite entre le temps long de la recherche fondamentale et le temps de la recherche en urgence d'une solution. Le 19 février 2020 la structure de la protéine Spike était publiée dans Sciences [7] après à peine plus d'un mois d'un travail qui dans des conditions ordinaires aurait pu prendre des années. Mais travail facilité par l'obtention de modèles en amont qui ont permis de le réaliser remarquablement vite. Les travaux de biologie structurale, menés depuis de longues années et prenant beaucoup de temps et d'énergie, ont été déterminants.

La figure 5 montre la *time line* de tout ce qui a été fait depuis 2010 jusqu'à la production effective des vaccins ARN. Sans oublier, en amont, les quarante ans de recherche menées dans les murs de diverses institutions scientifiques – à l'Institut Pasteur et aussi aux États-Unis et ailleurs dans le monde – sur des bactériophages anodins, recherches qui pourraient paraître difficiles à conduire aujourd'hui. Ce sont cependant ces recherches qui ont permis très efficacement de produire, par voie biotechnologique, des ARN messagers en très grande quantité. Et bien sûr de citer ceux qui, parmi les premiers dans les années 1990, ont eu l'idée de la possibilité de vaccins par ARN messenger et la ténacité pour franchir les obstacles techniques – mais aussi de reconnaissance institutionnelle – avant d'arriver au succès que l'on sait. Savoir les prix Nobel de médecine attribués à Drew Weissman et Katalin Kamiko².

² J'étais l'archétype de la scientifique qui lutte ; et qui chute. Interview de Katalin Kamiko au journal Le Monde, 3 juillet 2022

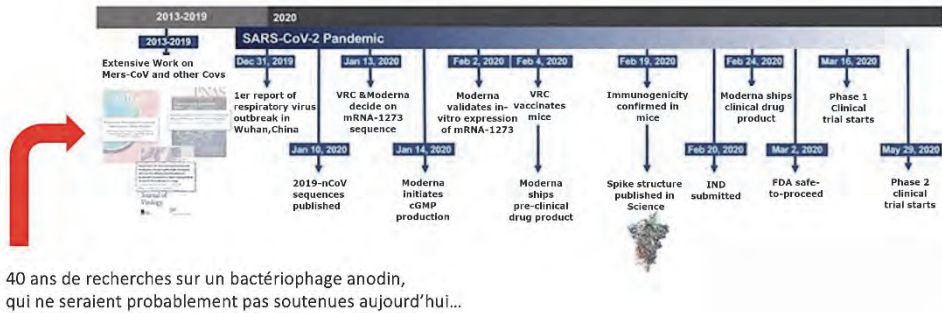


Figure 5. Le temps long, l'urgence et le lien entre les deux [12, fig.2].

Insistons ici sur l'apport de la biologie structurale, qui a permis d'établir la structure cryo-électro-microscopique de la protéine Spike. La connaissance de cette structure a permis de déterminer sur deux acides aminés la mutation nécessaire pour éviter que la Spike n'active son changement conformationnel, cette connaissance précise a donc permis de choisir la meilleure préparation vaccinale pour les vaccins ARN messager.

4. Risques et questions d'éthique dans les recherches en virologie

Les recherches en virologie se regroupent en trois grands thèmes. Tout d'abord, la pathogénèse : identifier les mécanismes de virulence : pourquoi le virus rend-il malade – il pourrait se développer dans la cellule sans faire de dommage, mais c'est très rarement le cas. Ensuite, développer des contre-mesures : vaccins et antiviraux -la compréhension préalable de la pathogénèse est nécessaire pour ne pas agir à l'aveugle. Enfin comprendre les mécanismes d'émergence et de franchissement de la barrière d'espèce.

Pour avancer dans cette compréhension, quatre types de manipulations sont habituellement conduites en laboratoire, qui peuvent se combiner. Ces types de manipulations sont, dans un ordre de risque croissant, les modèles cellulaires (culture *in vitro* du virus sur cellules humaines ou animales), le clonage des génomes, les expérimentations sur des animaux, les expériences de gain de fonction. Ces dernières constituent un sujet sensible et qui fait l'objet de débat : si un virus pathogène pour lequel une certaine propriété est absente et qu'on lui donne cette propriété (par exemple celle de passer une barrière d'espèce), on crée évidemment un problème potentiel.

4.1 La question des niveaux de sécurité des laboratoires

La figure 6, en haut à gauche, montre que l'approche gain de fonction ne concerne pas que la virologie, bien que ce soient les virus qui en bénéficient le plus fréquemment. Concernant ces derniers, la même figure indique également le nombre d'expériences de gain de fonction – gain ou perte de fonction car souvent il s'agit d'annuler une fonction – faites par grande famille de virus. On y voit enfin (partie droite de la figure) que toutes ces expériences potentiellement dangereuses ne se font pas du tout au niveau de

sécurité que l'on attendrait *a priori*. La gradation des niveaux de sécurité se différencie en quatre classes de laboratoires, depuis le label BSC1 qualifiant les laboratoires normaux jusqu'au label BSC4 qualifiant les laboratoires où l'on travaille sous scaphandre, avec dépression contrôlée. La majorité des expériences de gain de fonction se font dans les laboratoires BSC2, c'est-à-dire des laboratoires qui se contentent de précautions de base. Les laboratoires BSC3, déjà hautement sécurisés, ne font qu'un quart des manipulations.

Si donc un virus très pathogène est manipulé dans des conditions faibles de sécurité, il peut effectivement s'échapper d'un laboratoire soit par un animal infecté soit par une fausse manipulation par un expérimentateur infecté. La figure 7 résume un article paru récemment [2]. Dans cet article, les accidents sont répertoriés et fréquents. Il est donc nécessaire de comprendre les mécanismes de leur survenue afin d'agir sur la sécurité et d'identifier quelles manipulations peuvent être faites ou non.

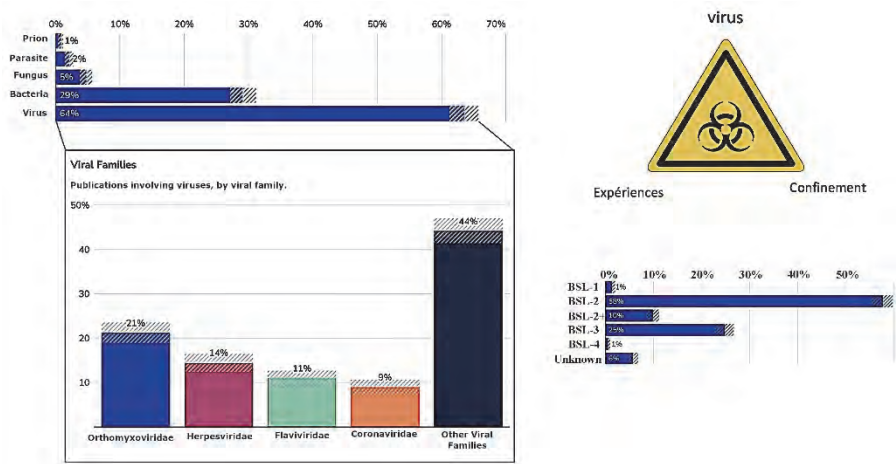


Figure 6. Domaines et niveaux de sécurité des expériences de gain de fonctions [Decroly, com. personnelle].

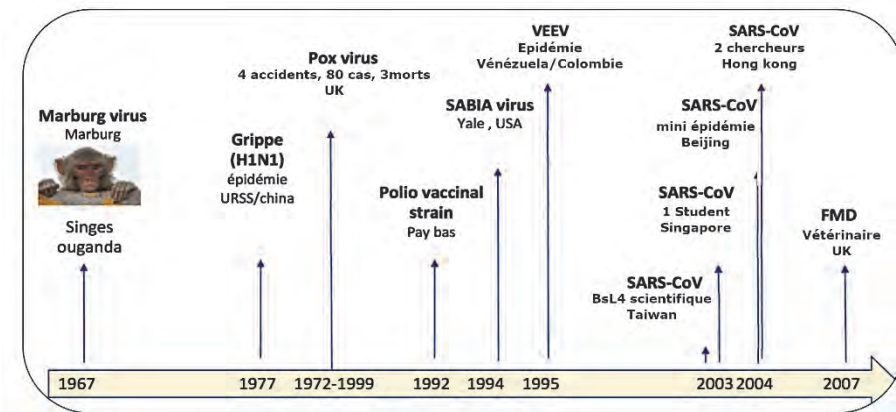


Figure 7. Exemples d'accidents de recherche décrits dans la littérature.

4.2 Les expériences et leurs surprises

Lorsqu'un nouveau virus est découvert, on souhaite évidemment savoir quel est son potentiel d'infection. On va alors chercher, en l'expérimentant en série sur des cellules humaines, à sélectionner des variants capables de se développer sur ces cellules. Le résultat est bien qu'après avoir découvert ce nouveau virus, vous savez aussi comment il peut ou va s'adapter. La contrepartie, c'est l'existence effective, au sein du laboratoire, d'un virus pathogène pour l'homme, alors que le virus initial ne l'était pas ; ou encore, l'obtention d'un variant échappant aux vaccins et antiviraux, si l'expérience avait été faite dans le but de connaître les potentialités d'échappement pour une première souche.

Au-delà de cette méthode de sélection par passage en série cellules humaines ou cellules animales génétiquement « humanisées » on peut à partir d'un virus donné créer des variants ou reconstruire des virus éradiqués³ en essayant de prévoir quelles zones du virus peuvent être impliquées et en effectuant dans ces zones des manipulations génétiques de type gain ou perte de fonction (démarche de génétique inverse : on sait ce que l'on veut obtenir comme propriété et on effectue une manipulation génétique dont on pense qu'elle va aboutir au résultat souhaité). Mais ces prévisions sont difficiles, des surprises peuvent arriver.

Un exemple de telles surprises est donné dans un article concernant des travaux autour du vaccin contre la variole. Des chercheurs ont identifié que l'Interleukine 4 était impliquée dans le développement du virus de la variole. Pour mieux cerner l'impact de cette substance, ils ont introduit son gène dans un virus adapté sur la souris [8]. Mais le virus modifié, au lieu de se trouver affecté dans le sens attendu, s'est révélé beaucoup plus pathogène. Et il y a bien d'autres exemples de ce type, en particulier sur les coronavirus, où lorsqu'on supprime un gène, le résultat est qu'au lieu d'avoir une fonction atténuée, on se retrouve avec une fonction accrue.

En résumé, la possibilité des outils de génétique permet de nos jours un travail de précision. Savoir, à partir d'un virus sauvage, enlever certaines fonctions, en mettre d'autres et avoir des virus chimériques dont le potentiel pathogène est assez difficile à prédire et peut être dangereux. La figure 8 résume les objectifs du projet Defuse soumis à la Darpa aux États-Unis en 2018, suite à un appel d'offres. Il s'agissait d'étudier le potentiel pathogène de coronavirus collectés sur des chauves-souris pour savoir leur potentiel de franchissement de la barrière d'espèce. Les chercheurs avaient prévu de faire exactement ce type d'expériences, c'est-à-dire remplacer le gène de la Spike et construire des virus chimériques, puis regarder les infections sur des souris humanisées ou des cellules humaines. Si le projet avait été accepté et financé et que les expériences avaient marché nous aurions eu comme résultat un virus pathogène humainement adapté.

³ Comme ce fut le cas, rappelons-le, pour le virus de la grippe espagnole

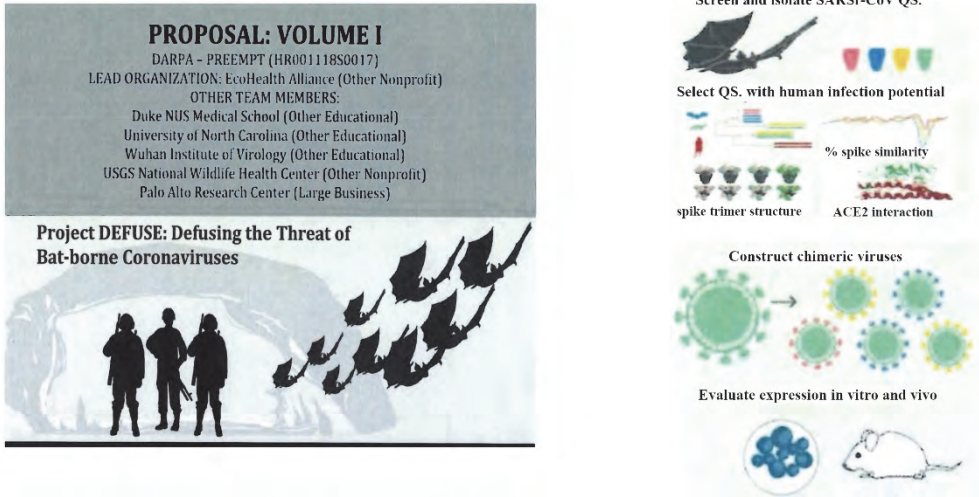


Figure 8. Le projet Defuse, soumis à la Darpa en 2018 [9].

4.3 Retour sur le cas du SARS-Cov-2

Si le projet Defuse a pu alimenter nombre de discussions [références innombrables], un article sorti récemment dans the Journal of Virology [10] donne deux hypothèses.

Il y a effectivement une *hypothèse zoonotique* : celle d'un hôte intermédiaire non identifié qui a permis au virus du SARS de passer des chauves-souris de la région de Hunan à Wuhan à 1500 km de là. Cet hôte intermédiaire aurait été la cause de la première transmission du virus dans des circonstances inconnues liées à la tenue du marché de Wuhan, se situant près du centre de la ville.

Mais il y a une autre possibilité, *l'hypothèse accidentelle*, plus difficile à envisager, savoir la suivante : lors de l'une des multiples collectes de virus de chauve-souris et éventuellement lors de travaux subséquents il y aurait eu une personne du laboratoire qui se serait infectée et qui aurait ensuite initié une épidémie. À l'heure actuelle, il n'est pas possible de dire avec certitude, entre ces deux possibilités, quelle est celle qui s'est réalisée. On reste dans le domaine des probabilités. Dans la mesure où personne n'a été en mesure d'identifier ni l'animal intermédiaire ni le personnel infecté par le virus collecté, *il faut admettre qu'il n'est pas possible à l'heure actuelle de trancher quant à l'origine du virus.*

4.4 Nécessité d'une réglementation internationale dans la conduite des expériences ?

En 2017, dans l'un des groupes phares dans l'étude des virus chimériques, l'état d'esprit était résumé par cette affirmation [11] : *in the future, the rapid development of vaccines, therapies, and diagnostics for emerging viruses will be dependent on the reconstruction and the in vitro and in vivo adaptation of these viruses in the laboratory.* Soit accélérer l'évolution pour créer un pathogène humain.

Il est peut-être temps de reconsidérer cette affirmation : sans empêcher les chercheurs de travailler, il faut trouver les conditions de sécurité et d'expériences qui seraient légitimement discutées pour ne pas se mettre en situation de danger.

À ce propos, il faut porter attention sur le fait que nous entrons dans une nouvelle ère. Une nouvelle ère où l'on peut isoler de nouveaux virus dangereux, les séquencer extrêmement rapidement⁴, et transférer les données obtenues sur un téléphone. Une fois que ce matériel génétique est ainsi disponible, il devient possible de synthétiser ce que l'on souhaite sur ce matériel, et ainsi de proposer la « meilleure » Spike, le « meilleur » virus. Voilà le futur permis par l'utilisation de l'intelligence artificielle sur les données de séquençage.

Lorsqu'existe ainsi la possibilité de synthétiser à volonté des virus, et en même temps celle de fabriquer contre ce virus un vaccin puissant, les conditions de la fabrication d'une arme biologique sont réunies. Il est clair, par conséquent, qu'un encadrement, une surveillance, une réglementation devront être mis en place.

5. En conclusion

Concernant l'anticipation et la préparation aux pandémies, nous nous trouvons sur trois fronts qui doivent être traités sérieusement.

- Comment nous allons interagir avec notre environnement pour éviter cette diffusion des virus et les catastrophes possibles, en développant l'observation, la compréhension et le respect du monde qui nous entoure.
- Comment nous allons faire pour disposer de diagnostics précoces et de médicaments antiviraux par voie orale pour éviter le développement de la maladie avant la production d'un vaccin.
- Parallèlement, quelles politiques de vaccination nous devons mettre en place ; sachant que les techniques de vaccins par ARN messagers sont en voie de très forte accélération, comment nous allons résoudre dans ces nouvelles conditions le défi chronologique des délais de production.

Pour répondre à ces questions, nous ne pouvons pas nous passer de la science, nous ne pouvons pas nous passer des connaissances qu'elle apporte, et nous ne pouvons pas nous passer de diffuser ces connaissances auprès du grand public, de façon à ce qu'il puisse les comprendre et les intégrer. On sait que la science a pu ces derniers temps être malmenée, pour différentes raisons que les anthropologues, sociologues et psychologues ont pu analyser. Il y a là un défi sociétal qu'il faut absolument relever.

Références

[1] Coutard, B., Valle, C., de Lamballerie, X., Canard, B., Seidah, N. G., Decroly, E. The spike glycoprotein of the new coronavirus 2019-nCoV contains a furin-like cleavage site absent in CoV of the same clade. *Antiviral Res* 2020 Apr;176:104742. Epub 2020 Feb 10.

[2] Peeling, R. W., Heymann, D. L., Teo, Y.-Y., Garcia, P. J. Diagnostics for Covid-19: Moving

⁴ C'est, par exemple, l'un des buts de la société Oxford NanoPore Ltd.

from pandemic response to control. *Lancet* **399**, 757-768 (2022).

[3] Yuanchen Liu, Xiaoyu Zhao, Jialu Shi, Yajie Wang, Huan Liu, Ye-Fan Hu, Bingjie Hu, Huiping Shuai, Terrence Tsz-Tai Yuen, Yue Chai, Feifei Liu, Hua-Rui Gong, Jiayan Li, Xun Wang, Shujun Jiang, Xiang Zhang, Yanliang Zhang, Xiangnan Li, Lei Wang, Madeline Hartnoll, Tianrenzheng Zhu, Yuxin Hou, Xiner Huang, Chaemin Yoon, ..., Hin Chu Lineage-specific pathogenicity, immune evasion, and virological features of SARS-CoV-2 BA.2.86/JN.1 and EG.5.1/HK.3. *Nature Communications* **15**, Article number: 8728 (2024).

[4] Valle, C., Martin, B., Touret, F., Shannon, A., Canard, B., Guillemot, J.-C., Coutard, B., Decroly, E. Drugs against SARS-CoV-2: What do we know about their mode of action? *Rev. Med. Virol.* **30(6)**, 1-10 (2020).

[5] Keyaerts E., Vijgen L., Maes P., Neyts J., Van Ranst M., In vitro inhibition of severe acute respiratory syndrome coronavirus by chloroquine. *Biochem. Biophys. Res. Commun.* **323(1)**, 264-268 (2004). doi: 10.1016/j.bbrc.2004.08.085. PMID: 15351731;

[6] Keyaerts E., Li S., Vijgen L., Rysman E., Verbeeck J., Van Ranst M., Maes P., Antiviral activity of chloroquine against human coronavirus OC43 infection in newborn mice. *Antimicrob. Agents Chemother.* **53(8)**, 3416-3421 (2009). doi: 10.1128/AAC.01509-08. Epub 2009 Jun 8. PMID: 19506054

[7] Bangaru, S., Ozorowski, G., Turner, H. L., Antanasijevic, A., [...], and Ward, A. B. Structural analysis of full-length SARS-CoV-2 spike protein from an advanced vaccine candidate. *Science* **370**, 1089-1094 (2020).

[8] Chen, N., Bellone, C. J., Schriewer, J., Owens, G., Fredrickson, T., Parker, S., Buller, R. M. Poxvirus interleukin-4 expression overcomes inherent resistance and vaccine-induced immunity: Pathogenesis, prophylaxis and antiviral therapy. *Virology* **409** 328-337 (2012).

[9] Project DEFUSE. Defusing the threat of bat-born Coronavirus DARPA – PREEMPT (HR001118s0017)

[10] Alwine J. C., Casadevall A., Enquist L. W., Goodrum F. D., Imperiale M. J., A Critical Analysis of the Evidence for the SARS-CoV-2 Origin Hypotheses. *J Virol.* **97(4)**, e0036523 (2023). doi: 10.1128/jvi.00365-23. Epub 2023 Mar 28. PMID: 36897089

[11] Sheahan T. P., Sims A. C., Graham R. L., Menachery V. D., Gralinski L.E., Case J.B., Leist S.R., Pyrc K., Feng J.Y., Trantcheva I., Bannister R., Park Y., Babusis D., Clarke M.O., Mackman R.L., Spahn J.E., Palmiotti C. A., Siegel D., Ray A. S., Cihlar T., Jordan R., Denison M.R., Baric R.S., Broad-spectrum antiviral GS-5734 inhibits both epidemic and zoonotic coronaviruses. *Sci. Transl. Med.* **9(396)**:eal3653 (2017). doi: 10.1126/scitranslmed.aal3653. PMID: 28659436; PMCID: PMC5567817.

[12] Kizzmekia S. Corbett, Darin Edwards, Sarah R. Leist & al. SARS-Cov-2mRNA Vaccine Developpement enabled by Prototype Pathogen Preparedness. *BioRxiv* (2020/06/11). doi.org/10.1101/2020.06.11.145920.

3

Interdépendance et résilience dans le vivant : une perspective en biologie de l'évolution¹

Eric Bapteste

Directeur de Recherche au CNRS
UMR 7138-Évolution/Adaptation, Intégration, Réticulation et Évolution
Institut de Biologie Paris-Seine
Sorbonne Université/Campus Pierre et Marie Curie

Abstract

Since Darwin's work, evolutionary biology has evolved considerably. While the traditional lineage approach has made it possible to understand the origins and evolution of living things, it does not account for all the complexity and diversity of life forms. This chapter explores the processes that have produced this diversity, with a focus on interactions within the living world. Beyond studies on species taken separately, it is indeed relevant to study their interactions, the functions they perform within ecosystems and their maintenance, and finally their transformations over time: even if specific species change, the interactions and functions they perform can persist. To use an image by Ford Doolittle, it is the songs (the interactions and their functions) that matter and not only the singers (the species at stake). By using network analysis methods, evolutionary biology thus provides new perspectives on biological dependencies and interdependencies. Four main points are developed in the chapter: the importance of interactions, the contribution of their study in evolutionary biology, the capture of dependencies and interdependencies, and the questions of stability and resilience of the living world.

1. Introduction

Depuis Darwin [1] le travail de biologiste de l'évolution s'est beaucoup transformé. Si l'approche par les lignées a fourni une première manière d'appréhender les origines et l'évolution du vivant, sur la base des parentés, elle ne rend pas compte de tout son foisonnement. Par exemple, le fait qu'il y ait une telle diversité de lignées, chez les virus, chez les bactéries, chez les archées, parmi les animaux, les plantes, et cela à différents niveaux d'échelle spatiale ; le fait que ces lignées sont parfois emboîtées, souvent interconnectées ; et qu'ainsi apparaît un monde d'une grande complexité, dont le biologiste de l'évolution doit rendre compte. Et cela demande d'étendre les modèles de la biologie évolutive. C'est ce que proposent des auteurs majeurs, comme Ford Doolittle, qui estiment que le modèle de l'évolution par sélection naturelle pourrait et devrait être généralisé [2, 3]. Pour lui, il faut aussi considérer l'influence de la sélection naturelle sur les interactions existantes et sur l'émergence de nouvelles interactions.

C'est dans cet esprit que se place ce chapitre qui concerne l'histoire des formes de la vie sur Terre et plus précisément la compréhension des processus qui ont produit la

¹ Ce chapitre est une transcription, effectuée par Eric Chenin (AEIS), de la conférence tenue par Eric Bapteste le 23 novembre 2023 dans le cadre du colloque AEIS. Il a été relu et amendé. Il est publié avec son accord.

Un arbre permet de classer les organismes en fonction de leurs liens de parenté – on peut ainsi déterminer des relations de proximité en fonction de l'ancienneté des ancêtres communs – et cette classification phylogénétique permet aussi de remonter le temps en inférant les caractéristiques qui étaient partagées par ces ancêtres.

Mais l'intérêt de cette approche ne doit pas occulter d'autres manières d'envisager le monde vivant, notamment le point de vue des interactions, qui y sont partout présentes. L'idée de *réseaux d'interactions* [4, 5] est maintenant bien partagée. Nous-mêmes sommes composés de réseaux : nous, individus, avons des gènes qui codent pour des réseaux d'interaction entre molécules, puis des réseaux d'interaction cellulaires, puis des réseaux d'organes... et puis nous appartenons à des réseaux : nous faisons partie de communautés, nous sommes affectés par des virus. Bref, nous contenons des réseaux, nous appartenons à des réseaux, et cette réalité-là, il faut aussi en rendre compte en biologie de l'évolution. Or, ces réseaux, ces interactions, entraînent un certain nombre de dépendances et d'interdépendances entre les acteurs qui sont connectés, à toutes les échelles d'organisation spatiale, du niveau moléculaire au niveau écosystémique. La structure de ces réseaux, leur capacité à évoluer, pourraient nous aider à mieux appréhender les conditions de la stabilité de la vie sur Terre.

3. Les réseaux d'interaction

Les interactions sont partout, entre les organismes et au sein des organismes, même au sein des simples cellules. Au niveau d'un organisme unicellulaire par exemple, on peut déjà mesurer l'ampleur du changement de perspective, lorsqu'on passe de son étude sous l'angle morphologique à son étude sous l'angle des interactions, proche de l'angle des processus.

La figure 2 montre ainsi la bactérie *Escherichia coli* sous l'angle du réseau de régulation entre ses gènes : en rouge, les gènes qui donnent des instructions aux autres gènes, en bleu, ceux qui exécutent.

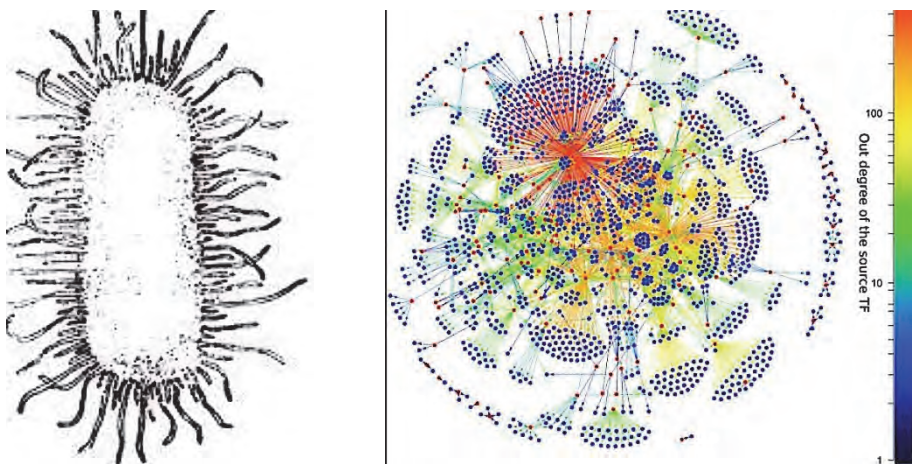


Figure 2. Changement de perspective entre l'angle morphologique (à gauche) et l'angle des interactions (à droite), exemple d'*Escherichia coli* ; ici l'angle des interactions entre gènes régulateurs (points rouges) et gènes régulés (points bleus) [4–7].

Au-delà de l'étude traditionnelle du fonctionnement du vivant, l'angle des réseaux apporte de nouvelles questions : de quoi sont composés ces réseaux, quelles sont leurs structures, contiennent-ils de l'information... Un motif typique dans ces réseaux est la boucle de rétroaction positive entre 3 nœuds du réseau A, B et C, qui permet d'introduire dans les réseaux de régulation un certain nombre de propriétés : si C doit suivre les injonctions de A et de B et que celles-ci sont incohérentes, l'action de C est bloquée tant que cette incohérence demeure : c'est donc une structure qui permet de temporiser le déclenchement d'une action, jusqu'à ce que les deux injonctions soient mises en cohérence.

3.1 Une approche « phyllosystémique »

La biologie de l'évolution essaie d'expliquer comment ces structures se sont mises en place progressivement au cours du temps. Elle essaie d'identifier les principes d'organisation en jeu dans les réseaux biologiques. Ce sont des questions différentes de celles des parentés entre espèces. Dans notre laboratoire, nous développons des méthodes pour inférer l'histoire des réseaux d'interaction, notamment au niveau moléculaire : comment les différentes molécules qui interagissent dans les organismes vivants se sont-elles mises à agir ensemble, et quelles sont les conséquences de ces interactions sur la stabilité et le devenir du monde vivant.

Après la phylogénétique, qui étudie l'évolution et les parentés en travaillant à l'échelle du gène, puis la phylogénomique, qui fait de même à l'échelle du génome, nous voulons retracer l'histoire des systèmes biologiques : nous essayons de faire de la phyllosystémique [8], de raconter l'histoire des milliers de réseaux constitutifs du fonctionnement des organismes. C'est une extension du modèle de Darwin. À partir de l'arbre des espèces qui nous guide, et des réseaux contemporains d'interactions, nous essayons d'inférer les réseaux ancestraux. Par exemple, si telle partie d'une structure du réseau d'interactions d'une espèce contemporaine se retrouve dans une structure similaire du réseau d'interactions d'une espèce contemporaine apparentée, il est probable que leur dernier ancêtre dans l'arbre des espèces possédait aussi cette même partie de structure et l'a transmise à ses descendants (figure 3).

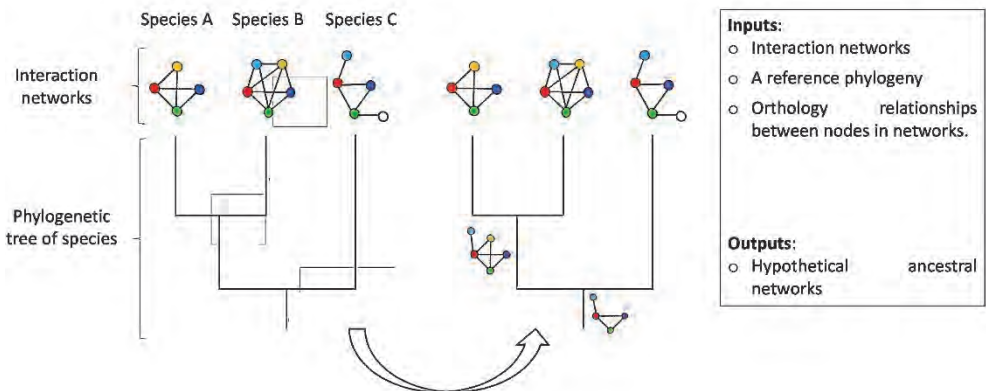


Figure 3. Principe de l'étude « phyllosystémique » : analyser les similitudes et différences entre les réseaux d'interactions chez deux espèces contemporaines apparentées, et inférer le réseau d'interactions chez leur espèce parente [8].

Nous essayons ainsi d'expliquer comment sont survenus les différents réseaux que l'on trouve dans les cellules actuelles. Parmi les réseaux d'interaction que nous étudions se trouvent notamment ceux qui sont impliqués dans le vieillissement dans un grand nombre d'espèces. Ces réseaux d'interaction, qui sont associés à la résilience ou à la dépendance chez les personnes âgées, se sont mis en place progressivement, comme illustré sur le schéma de la figure 4 : certaines structures d'interactions pourraient dater de plus d'un milliard d'années, d'autres de plusieurs centaines de millions d'années ; cette perspective permet de réfléchir à la manière dont des partenariats moléculaires se mettent en place et à quelles fonctions ils servent.

3.2 De la diversité des types d'interactions

Comme déjà dit, des réseaux d'interaction existent au-delà du niveau moléculaire : entre les cellules, entre les organismes. Dans le domaine microbien, il y a entre cellules diverses relations de compétition, de coopération, d'échanges. Même dans le domaine viral, où ces dernières années, des centaines de moyens de communication entre virus ont été découvertes.

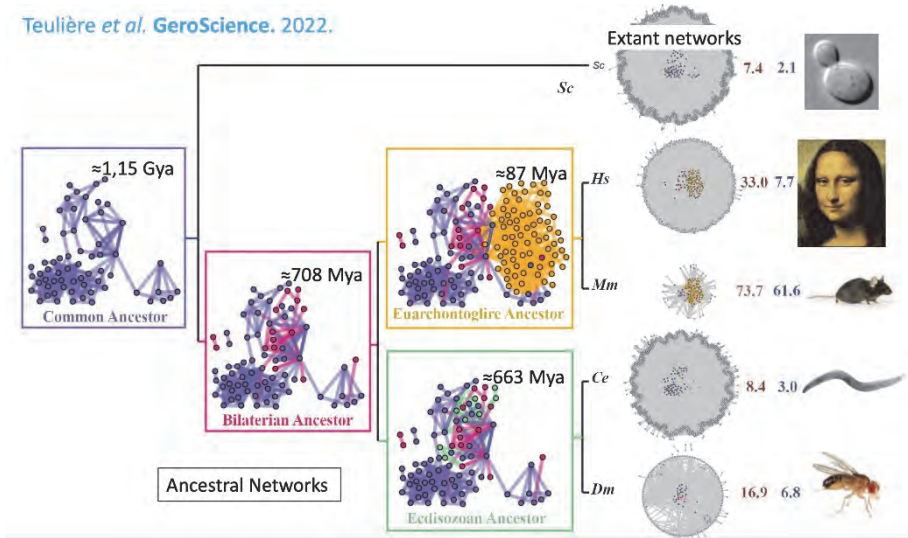


Figure 4. Inférence de l'évolution des interactions entre les protéines associées au vieillissement [9, 10].

Au-delà du niveau d'échelle auquel elles se placent, les interactions se différencient en effet aussi par leurs natures : de l'ordre du contrôle et de la régulation, de l'échange de matériel et d'information, de rôle complémentaire au sein de divers processus, sans oublier la compétition pour la reproduction, la prédation...

Un mode de relations d'interdépendance au sein du vivant est ainsi constitué par ce que l'on nomme les relais métaboliques. C'est le cas de la fixation de l'azote, fondamentale pour les communautés microbiennes : celle-ci implique une série de réactions chimiques qui sont réalisées tour à tour par une succession de microbes d'espèces différentes [11].

3.2.1 Des interactions conduisant à une perte d'autonomie

Les bactéries CPR (Candidate Phyla Radiation) montrent l'exemple d'un mécanisme d'évolution ancré dans des interactions coopératives : ces bactéries, de très petite taille, ont de très petits génomes, et elles perdent régulièrement des instructions génétiques² ; mais elles compensent ces pertes en s'appuyant sur les mêmes instructions, qui ont été conservées dans les autres bactéries avec lesquelles elles interagissent [12–16]. Ce mécanisme coopératif de partages d'instructions génétiques *via* les interactions métaboliques permet aux bactéries, au fil des pertes d'instructions génétiques, en s'accolant les unes aux autres, de se maintenir au sein de conglomerats, au sein desquels aucune n'est plus capable de survivre ni de se reproduire de manière autonome sans la présence des autres. On observe ici un mécanisme de cliquet, au sens d'une évolution à sens unique vers toujours plus de dépendance de chaque cellule individuelle vis-à-vis de ses voisines, sans possibilité de retour en arrière. Dans une telle forme d'évolution, on s'éloigne de la conception simple de la survie du plus apte (le requin doté des plus grandes dents), on assiste plutôt à l'émergence de structures de complexité croissante fondée sur la complémentarité entre les différents acteurs. Comme l'illustre métaphoriquement la figure 5.

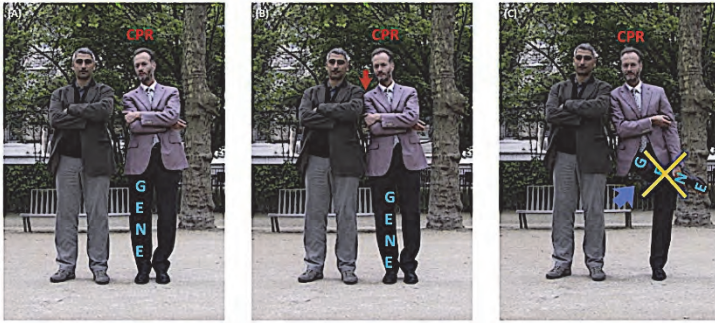


Figure 5. Une illustration métaphorique de l'évolution de la bactérie CPR³ [32].

3.2.2 Des interactions conduisant à un gain de capacité

Il y a cependant aussi des cas de transfert « latéral » de gènes entre voisins [17], par libération d'ADN dans le milieu intercellulaire, qui permet aux bactéries d'acquérir de nouvelles capacités, comme par exemple la résistance à un antibiotique. On sort ici du processus d'évolution collective où les individus régressent en perdant leur autonomie, pour retrouver une évolution individuelle où chacun gagne en capacité. On voit bien la valeur adaptative d'un tel transfert latéral. On peut remarquer qu'à la différence de la conception classique de l'évolution dans le cadre des lignées, ces nouveaux gènes ne sont pas transmis verticalement de parents à descendants le long de l'arbre phylogénétique *via* la reproduction : ils sont transmis horizontalement entre organismes voisins *via* la communication d'ADN au sein du milieu intercellulaire. Et ce nouveau processus d'acquisition de gènes et de capacités est plus rapide, il permet aux bactéries de s'adapter rapidement à leur environnement.

L'effet de ces transferts latéraux contraste avec les attendus des modèles classiques de l'évolution. Dans la conception classique où les lignées divergent depuis un ancêtre

² On peut d'ailleurs remarquer que la probabilité de perdre un nouveau gène est supérieure à celle de regagner un gène perdu antérieurement.

³ Copyright © 2014 Elsevier Ltd. All rights reserved.

commun, chaque lignée évolue séparément et ne mêle pas ses gènes à ceux des autres lignées. Au contraire, dans l'évolution de ce monde microbien où il peut y avoir des échanges entre voisins, certains organismes sont des chimères, avec des gènes qui viennent non pas d'ancêtres communs, mais de leurs voisins.

3.3 Une idée de « co-construction »

Un cas extrême de tels mélanges peut se trouver aux origines des cellules qui composent nos corps, à l'origine des cellules eucaryotes. Il y a un milliard et demi d'années, il y a eu une symbiose entre deux grandes lignées cellulaires : un groupe de bactéries et un groupe d'archées, qui ont donné naissance à un nouveau type de cellule. En termes d'explication de nos origines, nous sommes donc issus d'une multiplicité de parents, et pas seulement d'un ancêtre commun [18–20].

3.3.1 Focus sur l'être humain

Nos corps sont en effet entourés de microbes, abritent des microbes, sont infectés par des virus, et l'impact de ces microbes sur la biologie humaine est en train d'être réévalué. Il y a un certain ratio de cellules humaines voisines de cellules microbiennes, ces dernières dominant même en nombre dans nos corps, qui ne contiendraient que 47 % de cellules humaines. Mais il y a aussi un ratio de gènes humains à proximité des gènes des microbes que nous abritons, et ces microbes contiennent 150 fois plus de gènes que notre propre génome. Les microbes interagissent entre eux, mais aussi avec nos cellules humaines, et ils influent ainsi sur notre biologie. Donc, les microbes, qui ont d'abord été, il y a très longtemps, à l'origine des cellules eucaryotes qui nous constituent, ont ensuite continué, encore de nos jours, à interagir avec nos organismes, avec un double effet, d'une part de sélection des microbes par nos organismes, comme ceux qui constituent notre microbiome intestinal, et d'autre part d'influence réciproque de ces microbes sur notre biologie : il y a donc une co-construction entre ces deux mondes qui cohabitent dans nos corps.

On pourrait illustrer cela en considérant qu'Homo sapiens est en fait un Chosmo sapiens, qu'il réunit des traits proprement humains correspondant à ses propres gènes, avec des traits composites, qui ne sont pas codés exclusivement par nos gènes, mais sont plutôt co-construits par l'expression combinée de nos gènes et de ceux des microbes qui cohabitent avec nos cellules. L'enjeu est alors de déterminer la part des traits de nos organismes qui sont ainsi co-construits. Or, les données actuelles dans ce domaine montrent que cette part est plus importante que celle imaginée au départ : la capacité à maintenir le sang dans nos vaisseaux, la robustesse de nos os, le fonctionnement de notre digestion, de notre système immunitaire, dépendent en partie des microbes que nous abritons.

3.3.2 Et au-delà...

Cette idée s'étend bien sûr au-delà de l'espèce humaine. Il y a de nombreuses recherches sur ce qu'on peut appeler les « organes symbiotiques », chez différentes formes de vie – des animaux, des plantes –, qui sont des organes qui abritent des microbes à l'intérieur d'hôtes, qui remplissent un certain nombre de fonctions pertinentes pour la stabilité, la survie ou la reproduction des hôtes. Par exemple, la capacité à fixer l'azote, chez certaines plantes, la production de toxines, qui permettent à certaines plantes de lutter contre d'autres plantes, la fixation de carbone, ou encore la capacité de certains animaux, comme certaines petites sèches, de produire de la lumière en concentrant

certaines bactéries qui, lorsqu'elles sont réunies dans un même organe, deviennent lumineuses. Toutes ces fonctions sont rendues possibles par les communautés microbiennes qui sont abritées dans les organismes multicellulaires, elles sont décrites sous le vocable d'organes symbiotiques [21–24].

L'origine et l'évolution de ces traits co-construits ne peuvent pas être étudiées de la même manière que celles des traits qui sont codés uniquement par l'ADN propre des organismes, par exemple le fait d'avoir quatre membres, trait pouvant être suivi dans son apparition et sa mise en place progressive sur une lignée le long de l'arbre de l'évolution. Il est nécessaire de considérer, à côté du modèle classique où un ancêtre donne naissance à plusieurs lignées, un autre modèle où différentes lignées fusionnent pour former une nouvelle lignée. Nous avons besoin de développer de nouveaux outils pour décrire l'évolution dans le monde vivant dans toute cette complexité.

Revenons au modèle classique de l'évolution par sélection naturelle. Pour qu'il y ait sélection naturelle, il faut d'abord qu'il y ait variation. Les individus porteurs de ces variations sont nommés des unités de sélection, parce qu'ils peuvent être sélectionnés, du fait qu'ils présentent certains traits. Il faut aussi que la variation dans les traits confère à certains individus une capacité à survivre et/ou à se reproduire différente de celles des autres. Et il faut enfin que ces variations puissent être transmises. Mais au-delà de ce modèle, il nous faut comprendre comment des structures se mettent en place de façon plus ou moins persistantes dans les réseaux d'interactions au cours du temps. Et pour accéder à cette compréhension, il nous faut élargir la notion d'unité de sélection. Autrement dit, sur quelles entités, concrètes ou fonctionnelles, portent la sélection naturelle.

4. It is the Song, not the Singers

L'idée est donc, au départ, de regarder les interactions, comme précédemment illustré dans le cas de la bactérie et son réseau de régulation entre gènes. De même, plutôt que regarder les papillons, porter attention sur les interactions qu'ils ont, au sein de communautés et au-delà même des lignées. Et, en biologie évolutive, plutôt que de suivre des lignées d'ancêtres à descendants, suivre les associations fonctionnelles liées à ces interactions : lorsque les partenaires de ces associations mutent, certains patrons d'interactions peuvent s'en trouver plus fréquents, ou encore se transformer, et ces changements introduire de nouvelles dépendances ou interdépendances.

La figure 6 schématise le premier cas, où 5 espèces sont en présence, A1, A2, B1, B3 et C. Au départ, deux patrons triangulaires d'interactions existent, A2 avec B3 et C, A1 avec B1 et C. Convenons que les flèches représentent des dépendances positives : la survie des individus B1, et celle des individus C, sont favorisées par leurs interactions avec les individus A1. Si quelques individus A1 mutent avec un avantage reproductif transmis à leurs descendants, sans changer ses interactions avec ceux de B1 et de C et les bénéfices qu'ils en tirent, il est clair que la fréquence de ce patron va se développer au détriment de l'autre⁴, et peut-être que les individus C abandonneront peu à peu le patron A2-B3-C dans lequel ils étaient engagés.

⁴ Le patron est de fait une unité de sélection, et a acquis une capacité différentielle à survivre, à durer, à être « re-produit » selon la terminologie introduite par Doolittle [2, 3].

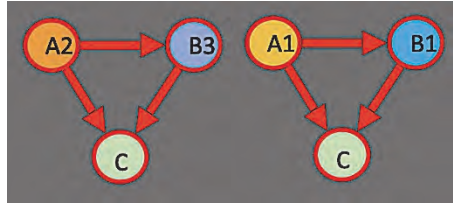


Figure 6. Deux patrons élémentaires d'interaction, dans une communauté de cinq espèces. Les flèches représentent des dépendances positives (par exemple de B3 vis-à-vis de A2).

La figure 7 présente un schéma élémentaire d'un autre cas, celui de transformations allant dans le sens de la complexité. Au départ, vous avez des interactions de type *i* entre individus A1 et individus B1. Ces interactions servent de socle à la promotion d'interactions de type *j* entre individus B1 et individus C. Le réseau simple ainsi constitué favorise l'interaction *k* de C vers A1, fermant donc la boucle et pouvant former, pour les trois espèces concernées, une sorte de cercle vertueux.

De nouvelles unités de sélection que l'on n'attendait pas, peuvent être prédites par les évolutionnistes dans la nature.

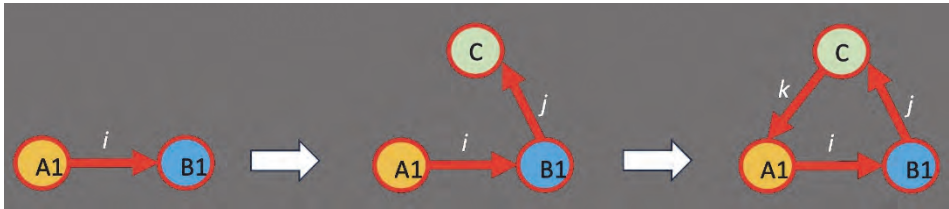


Figure 7. Deux patrons d'interactions simples vers des patrons plus complexes.

4.1 L'exemple des intestins

L'exemple du microbiome intestinal [25–28] des êtres humains illustre bien cette idée de sélection d'associations fonctionnelles. Si cette faune intestinale résultait d'une sélection des microbes les plus adaptés à l'être humain, on pourrait s'attendre à ce que ces différents microbes soient présents approximativement dans les mêmes proportions dans chacun d'entre nous. Or c'est loin d'être le cas, comme le montre le diagramme de la figure 8 partie gauche : en abscisse de ce diagramme, différentes personnes, et en ordonnée, les abondances relatives de différents types de bactéries, chaque couleur représentant l'abondance de l'une d'elles. On constate clairement que nous n'abritons pas les uns et les autres les mêmes espèces dans nos intestins, il y a une forte variation individuelle.

Mais le tableau devient différent lorsque l'on regarde non plus chaque espèce de microbe, mais chaque fonction accomplie globalement par le microbiome intestinal. Dans la figure 8, partie droite, chaque fonction, ou type de fonction, est associée à un groupe de protéines, et donc de gènes, présents dans le microbiome, mais provenant de différentes espèces. Identifiées par des lettres d'une classification officielle⁵ (Q, P, I, H...) l'abondance relative de chaque groupe et donc l'intensité de réalisation de chaque fonction est représentée par une couleur. On constate cette fois-ci que les proportions

⁵ Clusters of Orthologous Groups

restent approximativement les mêmes d'une personne à l'autre. La variation individuelle est nettement moins forte que pour les espèces. Autrement dit, les personnes référencées dans les deux digrammes n'ont pas les mêmes bactéries dans leur corps, mais bien les mêmes gènes bactériens. Tout se passe comme si l'hôte sélectionnait, pour la composition de son microbiome intestinal, non pas des espèces, mais des ensembles de gènes capables d'interagir pour réaliser les fonctions qui lui sont nécessaires. Une forme de sélection dont les unités de sélection ne sont pas les lignées, mais des associations d'interactions.

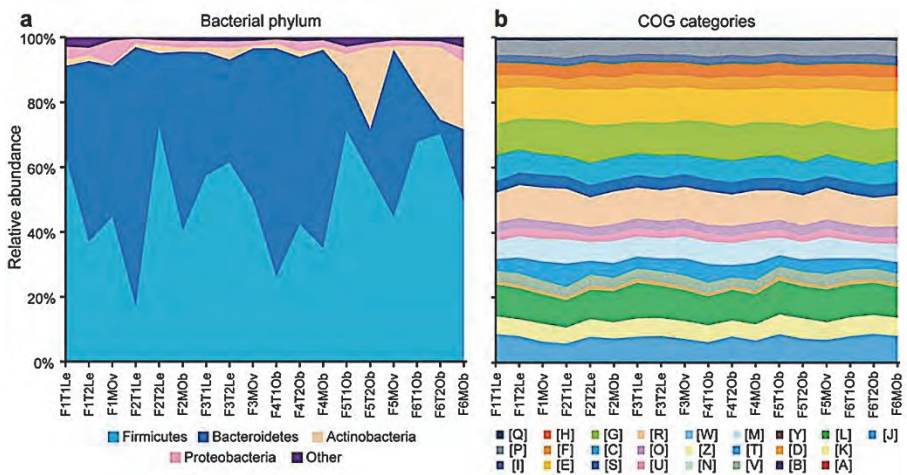


Figure 8. Variations interindividuelles comparées de l'abondance des diverses espèces et de l'abondance de diverses associations fonctionnelles dans le microbiome intestinal humain [29].

4.2 Un mécanisme général ?

Ce qui est observé dans nos intestins pourrait être observé à une échelle bien supérieure, jusqu'à l'échelle des écosystèmes. Lorsque les effectifs de deux espèces en interaction d'un certain type, disons l'espèce A et l'espèce B, deviennent de plus en plus importants et que ces interactions se renforcent en nombre, il se peut qu'il n'y ait là qu'un effet statistique, l'augmentation de la fréquence des interactions n'étant que la conséquence banale de l'augmentation du nombre de partenaires potentiels. Mais il se peut aussi que ce soit parce qu'il y a ces interactions que les effectifs des espèces A et B augmentent, et qu'il y a une forme de sélection qui s'exerce sur ces associations.

De par l'action de cette sélection, certaines associations vont être plus robustes que d'autres : dans la population des associations présentes dans un écosystème, certaines vont durer plus longtemps, elles vont mieux persister – par exemple l'association de A avec B, alors que celle de C avec D, qui avait paru se développer dans un premier temps disparaît. Mais s'il y a certaines interactions qui sont plus robustes, peut-être vont-elles servir de socle à l'établissement d'autres interactions robustes, lesquelles vont à leur tour favoriser le développement des espèces participantes. Et donc par itération de ce processus, que se déploie au fur et à mesure du temps, au sein de l'écosystème, un réseau d'interaction de plus en plus complexe, bénéficiant à tous les « interacteurs » et donc bien adapté, capable de résister, dans une certaine marge, aux fluctuations de l'environnement [30].

Mais il faut envisager aussi, qu'en cas de pressions trop fortes exercées sur l'écosystème, par exemple sous l'effet d'interventions humaines, la robustesse acquise par le réseau en place puisse se fragiliser, les patrons d'interactions évoluer, voire l'ensemble de la structure s'effondrer.

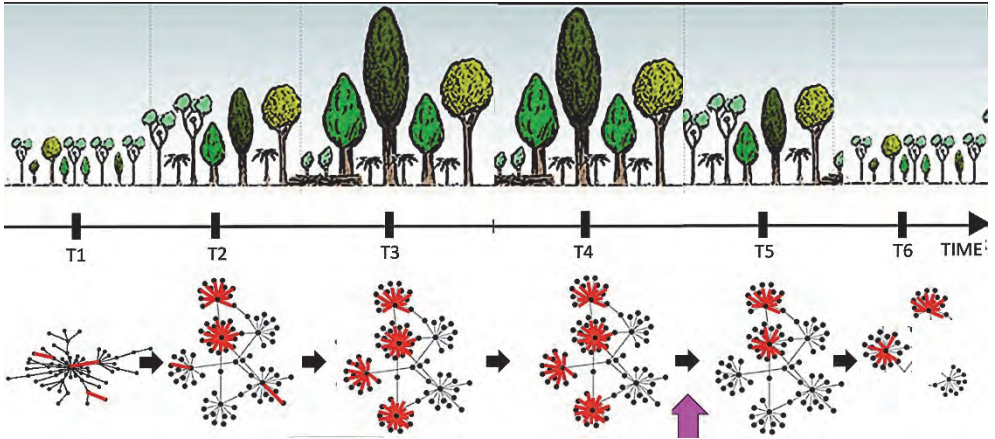


Figure 9. Schéma d'une évolution possible d'un écosystème forestier, sa jeunesse (mise en place d'espèces pionnières), sa maturité, son apogée (phase dite « Climax ») et enfin un effondrement suite par exemple aux interventions de l'Homme. Évolution associée à une complexification, une stabilité puis une désagrégation du réseau des interactions.

4.3 It is the song not the singers

Les évolutions de la structure des réseaux d'interactions sont des phénomènes que l'on peut maintenant observer et mesurer. La figure 9 pourrait laisser croire que tous les nœuds des réseaux restent associés aux mêmes espèces au cours du temps, mais les choses sont plus complexes. On a approché cet aspect lors de l'exemple du microbiome intestinal, dans lequel c'étaient les associations fonctionnelles de gènes qui se maintenaient d'une personne à l'autre, et non le spectre des espèces support. Ford Doolittle [31] a formalisé ce point de vue sur le fonctionnement de la sélection naturelle par un modèle résumé par « c'est la chanson, pas les chanteurs ». La figure 10 présente un schéma qui explicite cette idée. Deux patrons d'interactions sont présentés, dont les structures circulaires de dépendances sont strictement les mêmes. Sauf que l'un des « interacteurs », l'espèce 5 dans le patron de gauche, est remplacé par l'espèce 7. Ce qui compte, ce qui assure la stabilité de l'écosystème, par-delà l'affaiblissement ou même la disparition de l'espèce 5, c'est la persistance de cette dépendance circulaire (les interactions A, B, C, D, E, F) qui assure en retour la persistance des espèces restantes 1,2,3,4,6. Et bien de nouveaux changements d'acteurs (les chanteurs) peuvent avoir lieu plus tard dans le temps, alors que la structure des dépendances (la chanson) va persister.

Ford Doolittle pose la question : quelle est l'origine, comment expliquer la récurrence d'un certain nombre de ce qu'il appelle des chansons dans l'environnement ? N'est-ce pas le produit d'une certaine forme de sélection pour ces chansons, une sélection qui porterait vraiment sur les chansons, puisque les chanteurs peuvent changer. Plusieurs modèles sont développés dans cette approche, que l'on peut consulter dans la littérature concernée.

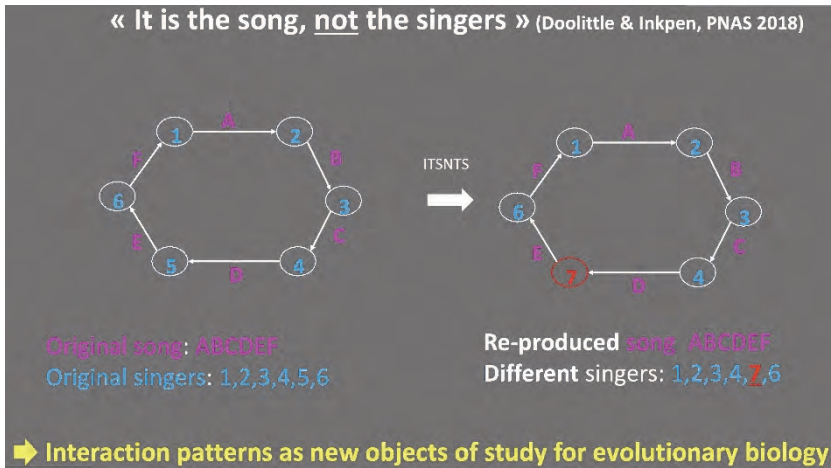


Figure 10. Schéma illustrant la persistance d'une structure de réseau d'interactions par-delà même le changement d'un des interacteurs.

5. En conclusion. It is the Song and the Singers [31]

En développant un cadre analytique qui se consacre aux interactions à de multiples échelles, du niveau moléculaire à celui de l'écosystème, et en examinant comment se mettent en place et évoluent ces dépendances et interdépendances, on peut espérer mieux comprendre la stabilité du monde vivant et sa capacité à évoluer. La robustesse et la résilience des réseaux d'interaction, nous renseignent en effet sur la capacité de durabilité, dans un monde changeant, du vivant que ces réseaux sous-tendent.

Les chercheurs en biologie de l'évolution ont donc deux manières de considérer le vivant. Ils peuvent examiner l'évolution arborescente des lignées phylogénétiques, et s'intéresser à ce que les relations de parenté nous apprennent sur les espèces et sur l'Homme en particulier. Mais cette approche a ses limites : par exemple, les seules relations de parenté phylogénétiques peuvent laisser penser que l'homme et les microbes actuels, très éloignés dans l'arbre de l'évolution, ont peu d'influence mutuelle sur leurs évolutions respectives. Mais les chercheurs peuvent aussi s'intéresser aux réseaux d'interaction, sur lesquels on voit immédiatement qu'humains et microbes, quoique phylogénétiquement éloignés, sont fonctionnellement proches. C'est un changement de perspective radical sur la biodiversité et son fonctionnement : perspective particulièrement pertinente pour étudier sa durabilité. Mieux, on connaîtra les aspects de notre biologie qui sont co-construits, voire éventuellement manipulés par des interactions interspécifiques, mieux on sera armé pour durer au sein du vivant, et donc pour durer tout court.

De tout temps, notre insertion au sein de réseaux biologiques a influé sur notre évolution marquée par la contingence et nous a enrichis de composantes chimériques, et nous avons appris à évoluer dans le cadre de ces interactions. Mais ceci n'est pas propre aux humains : on l'observe aussi chez les plantes et les animaux, qui ont aussi des microbiomes. Or, ces microbiomes communiquent, s'interpénètrent, et donc les interactions d'une espèce avec son microbiome peuvent avoir des impacts sur d'autres espèces. Ce qui constitue, de manière indirecte et sur le temps long, une autre forme

d'interaction, pour ainsi dire élargie.

Cette approche axée sur les interactions nous permet d'appréhender la diversité des liens qui nous rattachent à notre environnement, et d'identifier les facteurs sur lesquels nous pouvons agir pour durer sur notre planète.

Références

- [1] Darwin Charles. On the origin of species by means of natural selection (John Murray Ed., London, 1859).
- [2] Doolittle, W. Ford Phylogenetic Classification and the Universal Tree. *Science* **284**, 2124–2129 (1999).
- [3] Baldauf, S. L., Roger, A. J., Wenk-Siefert, I., Doolittle, W. Ford A Kingdom-Level Phylogeny of Eukaryotes Based on Combined Protein Data. *Science* **290**, 972–977 (2000).
- [4] Costanzo, M., Baryshnikova, A., Bellay, J., Kim, Y., Spear, E., et al. The Genetic Landscape of a Cell. *Science* **327**, 425–431 (2010).
- [5] Baryshnikova, A., Costanzo, M., Myers, Chad L., Andrews, B., Boone, C. Genetic Interaction Networks: Toward an Understanding of Heritability. *Annual Review of Genomics and Human Genetics* **14**, 111–133 (2013).
- [6] Boucher, B., Jenna, S. Genetic interaction networks: better understand to better predict. *Frontiers in Genetics* **4**, 290 (2013). doi:10.3389/fgene.2013.00290. PMC 3865423. PMID 24381582.
- [7] Costanzo, M., Van der Sluis, B., Koch, E. N., Baryshnikova, A., Pons, C., et al. A global genetic interaction network maps a wiring diagram of cellular function. *Science* **353**, 6306 (2016), aaf1420. doi:10.1126/science.aaf1420.
- [8] Watson A. K., Habib M., Baptiste E. Phylsystemics: merging phylogenomics, systems biology, and ecology to study evolution. *Trends Microbiol.* **28**, 176–190 (2020).
- [9] Baptiste E., Huneman P., Keller L., Teulière J., Lopez P., Teeling E. C., Lindner A.B., Baudisch A., Ludington W.B., Franceschi C. Expanding evolutionary theories of ageing to better account for symbioses and interactions throughout the Web of Life. *Ageing Res. Rev.* 2023 Aug; 89:101982. doi: 10.1016/j.arr.2023.101982. Epub 2023 Jun 13. PMID: 37321383 Review.
- [10] Teulière J., Bernard C., Corel E., Lapointe F.-J., Martens J., Lopez P., Baptiste E. Network analyses unveil ageing-associated pathways evolutionarily conserved from fungi to animals. *Geroscience* **45** (2), 1059–1080 (2023). doi: 10.1007/s11357-022-00704-2. Epub 2022 Dec 12.
- [11] Kuypers M. M., Marchant H. K., Kartal B. The microbial nitrogen-cycling network. *Nature Reviews. Microbiology* **16** (5), 263–276 (2018). doi:10.1038/nrmicro.2018.9. hdl:21.11116/0000-0003-B828-1. PMID 29398704. S2CID 3948918.
- [12] Danczak R. E., Johnston M.D., Kenah C., Slattery M., Wrighton K.C., Wilkins M.J. Members of the candidate phyla radiation are functionally differentiated by carbon- and nitrogen-cycling capabilities. *Microbiome* **5** (1), 112 (2017).
- [13] Parks, D., Chuvochina, M., Waite, D., Rinke, C., Skarshewski, A., Chaumeil, P.-A., Hugenholtz, P. A standardized bacterial taxonomy based on genome phylogeny substantially

revises the tree of life. *Nature Biotechnology* 36, 996–1004 (2019).

[14] Parks, D. H., Rinke, C., Chuvochina, M., Chaumeil, P.-A., Woodcroft B. J., Evans P. N., Hugenholtz, P., Tyson G. W. N. Recovery of nearly 8,000 metagenome-assembled genomes substantially expands the tree of life. *Nature Microbiology* 2(11), 1533–1542 (2017).

[15] Hug L.A., Baker B.J., Anantharaman K., Brown C.T., Probst A.J., Castelle C.J., et al. A new view of the tree of life. *Nature Microbiology* 1 (5), April 2016.

[16] Castelle C.J., Banfield J.F. Major New Microbial Groups Expand Diversity and Alter our Understanding of the Tree of Life. *Cell* 172, 1181–1197 (2018).

[17] Jain R., Rivera M. C., Lake J A. Horizontal gene transfer among genomes: The complexity hypothesis. *Pro. Natl. Acad. Sci USA* 96 (7), 3801-3806 (1999).

[18] Brown, J. R., Doolittle, W. Ford, Archaea and the prokaryote-to-eukaryote transition. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 61, 456–502, (1997).

[19] Szathmáry E, Maynard Smith J. The major evolutionary transition. *Nature* 374, 227-232 (1995).

[20] Olson M.V. Molecular Evolution; When Less Is More: Gene Loss as an Engine of Evolutionary Change, *Am. J. Hum Genet.* 64, 18-23, (1999).

[21] Latorre, A., Durban, A., Moya, A., Pereto, J. The role of symbiosis in eukaryotic evolution. In Gargaud, M.; López-García, P., Martin, H. (eds.). *Origins and Evolution of Life: An astrobiological perspective*. Cambridge : Cambridge University Press. 2011, pp. 326–339. ISBN 978-0-521-76131-4.

[22] Martin, W. F., Garg, S., Zimorski, V. Endosymbiotic theories for eukaryote origin. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences.* 370 (1678): 20140330. September 2015. doi:10.1098/rstb.2014.0330. PMC 4571569.

[23] Butterfield, N. J. Early evolution of the Eukaryota. *Palaeontology* 58, 5–17 (2014).

[24] Zimorski, V., Ku, C., Martin, W. F., Gould, S. B. Endosymbiotic theory for organelle origins. *Current Opinion in Microbiology* 22, 38–48 (2014).

[25] Moszak, M., Szulińska, M., Bogdański, P. You Are What You Eat – The Relationship between Diet, Microbiota, and Metabolic Disorders-A Review. *Nutrients* 12 (4), 1096 (2020).

[26] Segata, N., Boernigen, D., Tickle, TL., Morgan, XC., Garrett, WS., Huttenhower, C. Computational meta'omics for microbial community studies. *Molecular Systems Biology* 9, 666 (2013).

[27] Saxena, R., Sharma, V.K. A Metagenomic Insight into the Human Microbiome: Its Implications in Health and Disease. In Kumar, D.; S. Antonarakis (eds.). *Medical and Health Genomics*. Elsevier Science. p. 117 (2016). doi:10.1016/B978-0-12-420196-5.00009-5. ISBN 978-0-12-799922-7.

[28] Guarner, F., Malagelada, J. Gut flora in health and disease. *The Lancet* 361, 512–519 (2003).

[29] Turnbaugh P. J., Hamady M., Yatsunenkov T., Cantarel B. L., Duncan A., Ley E. R., Sogin M. L., Jones J. W., Roe B. A., Affourtit J. P., Egholm M., Henrissat B., Heath A. C., Knight R. & Gordon J. I. A Core gut microbiome in obese and lean twins *Nature* 457, 480–484 (2009)

[30] Baptiste, E., Huneman, P. Towards a Dynamic Interaction Network of Life to unify and expand the evolutionary theory. *BMC Biol.* 16(1), 56 (2018). doi: 10.1186/s12915-018-1531-6.

[31] Doolittle W. F., Booth, A. Its the song, not the singer: an exploration of holobiosis and evolutionary theory. *Biology and Philosophy* 32, 5-24 (2016).

[32] Selosse M.-A., Bessis A., Pozo M. Microbial priming of plant and animal immunity : symbionts as developmental signals. *Opinion* 22(11), 607-613 (2014).

doi : [10.1016/j.tim.2014.07.003](https://doi.org/10.1016/j.tim.2014.07.003)

[https://www.sciencedirect-com.inee.bib.cnrs.fr/science/article/pii/S0966842X14001528?via%3Dihub](https://www.sciencedirect.com/inee.bib.cnrs.fr/science/article/pii/S0966842X14001528?via%3Dihub)

Deuxième partie :

Quels outils pour faire face ?

Cette deuxième partie rassemble quatre contributions consacrées au développement et à l'utilisation d'outils numériques pour faire face à des situations de crise sanitaire, environnementale ou économique.

Les deux premiers chapitres, correspondant aux présentations orales de *Philippe Moingeon* et de *Daniel Krob*, relèvent du domaine de la santé, principalement dans le contexte de la pandémie de Covid-19 : le premier (chapitre 4) s'intéresse à l'accélération de la production de médicaments et de vaccins, dans le cadre d'une médecine personnalisée aujourd'hui en plein essor. Le second (chapitre 5) propose une analyse systémique visant à évaluer les interdépendances entre santé et socio-économie à l'échelle de populations humaines confrontées à une épidémie de grande ampleur.

Le troisième article, signé *Jean-Philippe Bouchaud* (chapitre 6), analyse les conditions d'émergence des crises économiques, notamment de krachs financiers *a priori* inexplicables, ainsi que la possibilité de crises cycliques, telles que l'alternance entre plein emploi et chômage.

Enfin, le quatrième article (chapitre 7), émanant d'*Isabelle Alvarez*, focalise sur des crises environnementales, en particulier sur les processus de pollution – réversibles ou irréversibles – de lacs eutrophes ou oligotrophes, en fonction de politiques de gestion de l'eau plus ou moins soutenables.

Comme dans l'ensemble de l'ouvrage, ces travaux relèvent de disciplines diverses. Ils apportent des connaissances spécialisées qui nourrissent une curiosité intellectuelle interdisciplinaire, tout en restant pour l'essentiel développées de manière indépendante. On notera toutefois, dans le chapitre 5, une tentative d'intégration de points de vue multidisciplinaires, originale au sens où les modèles classiques de dynamique des populations saines ou infectées sont d'habitude mis en œuvre dans un cadre strictement épidémiologique.

Mais c'est, comme souvent, au niveau des méthodes de recherche que l'interdisciplinarité s'exprime le plus clairement. Ainsi, la théorie mathématique de la viabilité présentée au chapitre 7, l'approche de modélisation physicienne et

informatique multi-agents du chapitre 6, l'approche de simulation informatique et systémique dénommée « agile » du chapitre 5, ainsi que la recherche assistée par intelligence artificielle développée au chapitre 4, constituent autant d'outils potentiellement applicables à un large éventail de problématiques de recherche appliquée.

Le chapitre 7 permet de découvrir ou de redécouvrir la théorie de la viabilité, fondée sur une modélisation mathématique non classique. L'idée de contrôle optimal y est abandonnée au profit d'une analyse de la « viabilité » d'un système dynamique. Si l'état du système reste décrit par des variables globales évoluant dans le temps (par exemple l'état d'un lac et la concentration en phosphore en fonction des apports externes), il ne s'agit plus de calculer des trajectoires précises à partir d'un état initial unique en optimisant un critère à court terme. L'objectif est plutôt de caractériser l'espace des évolutions possibles à long terme et d'identifier un sous-ensemble, le « noyau de viabilité », à l'intérieur duquel le système doit demeurer pour respecter des contraintes jugées indispensables à sa survie.

Le chapitre 6 offre quant à lui un panorama des théories de la complexité, dans lesquelles la simulation informatique des interactions entre agents élémentaires fait émerger, à l'échelle macroscopique, des phénomènes inattendus. Ces approches permettent d'expliquer des transitions de phase en physique, des comportements collectifs en sciences sociales ou encore des crises économiques à partir des comportements individuels des agents.

Dans le chapitre 5, c'est une approche d'ingénierie système – telle qu'elle est utilisée notamment dans le domaine militaire – qui est mobilisée pour modéliser la lutte contre une pandémie. Elle repose, là encore, sur des simulations informatiques, où un modèle mathématique classique de type SIRD est discrétisé sur un réseau d'individus afin de pouvoir intégrer d'autres composantes des sociétés humaines, en particulier un coût économique associé aux vies perdues.

Dans ces trois cas, l'objectif premier est de comprendre les mécanismes à l'œuvre et de modéliser des processus, quitte à les schématiser de manière très simplifiée – selon la formule de Keynes citée par l'un des auteurs : « mieux vaut avoir à peu près raison que précisément tort ». La priorité est donnée par les auteurs au raisonnement et à l'intelligibilité des phénomènes. À l'inverse, dans le premier chapitre de cette partie (chapitre 4), la démarche est radicalement différente. Toute modélisation mathématique, informatique ou physique *a priori*, toute représentation explicite des relations de causalité et plus généralement toute formalisation abstraite des processus dynamiques est mise de côté. On entre ici dans le champ de l'intelligence artificielle, fondée sur le développement d'algorithmes d'apprentissage profond. Cette approche, elle aussi applicable à de nombreuses questions de recherche dans toutes disciplines, prolonge ici, en médecine, les méthodes statistiques et les capacités d'apprentissage « profondément humaines » qui y prédominent.

Les quatre approches présentées dans cette partie 2 ont en commun de tirer parti de l'augmentation de la puissance de calcul informatique pour améliorer l'action en période de crise. Toutefois, un autre type de crise menace l'extension de ces méthodes, comme le soulignent les partisans d'une décroissance assumée : celle de la consommation énergétique nécessaire au fonctionnement des infrastructures numériques. Le chapitre 7 mentionne la « malédiction de la dimension » qui affecte déjà les algorithmes d'approximation du noyau de viabilité, et l'espoir de progrès possibles grâce aux méthodes d'apprentissage profond. Mais ces approches basées sur la collecte

et le traitement de volumes massifs de données ne rencontreront-elles pas, elles aussi, des limites fondamentales en matière de coût énergétique ? Ces interrogations renvoient à d'autres parties du présent ouvrage, notamment à celles consacrées aux espoirs suscités par la fusion nucléaire en tant que source potentielle d'énergie quasi illimitée, mais nous pouvons également espérer le développement de nouveaux algorithmes plus économes. Enfin, se pose la question d'un dernier type de crise, plus existentielle : celle liée au recours à des méthodes d'IA certes extrêmement performantes, mais au prix d'un renoncement à toute compréhension théorique, voire mécaniste, des processus sous-jacents. Intelligences humaines et artificielles se trouvent ici au cœur d'un débat très actuel qui annonce l'un des prochains colloques de l'AEIS, consacré à l'usage de l'IA dans un contexte de recherche interdisciplinaire.

4

Intelligence artificielle et nouveaux médicaments : vers une médecine computationnelle de précision

Philippe Moingeon

Université Paris-Saclay, 91190 Orsay, France
Académie nationale de Pharmacie, 75006 Paris, France

Abstract

In the late 2020, as Covid-19 wreaked havoc around the world, the first vaccines developed in just one year demonstrated their effectiveness, thanks to biotechnology and with the assistance of artificial intelligence (AI). The resolution of this health crisis thus highlights how new technologies can deeply transform the design and development of innovative drugs. AI and machine learning enable the construction of predictive models, which are currently used to assist in decision-making throughout the process of drug discovery and development. These computational models are employed to represent the heterogeneity of a disease, identify therapeutic targets, design and optimize drug candidates, evaluate these drugs on virtual patients or digital twins. By combining detailed patient characteristics with the prediction of potential drug candidate properties, AI promotes the emergence of a "computational" precision medicine, allowing to better tailor treatments to patient specificities with the aid of these AI-based computational models.

1. Pourquoi l'industrie du médicament s'intéresse-t-elle à l'intelligence artificielle ?

Aujourd'hui, la mise sur le marché d'un nouveau médicament requiert en moyenne une durée de développement moyenne de 12 ans, ainsi qu'un investissement de plus de 2 milliards de dollars US (Di Masi et al., 2016). Ces délais et ces coûts en croissance continue sont induits par les exigences des agences réglementaires quant au niveau de preuve requis pour démontrer l'efficacité et l'innocuité d'un nouveau médicament (figure 1A). Ce coût moyen est exorbitant car il prend en compte les dépenses occasionnées par les développements arrêtés au cours de l'évaluation chez l'homme des candidats-médicaments. Or, près de 94 % des molécules candidates issues de la phase de découverte sont abandonnées en phase de développement, une attrition très importante expliquée par un manque d'efficacité ou l'induction d'effets indésirables (figure 1B) (Waring et al., 2015). La baisse régulière ces 20 dernières années du retour sur investissement en R et D pour les industriels du médicament a été surnommée la loi EROOM (l'inverse de la loi Moore) (figure 1A) (Ringel et al., 2020).

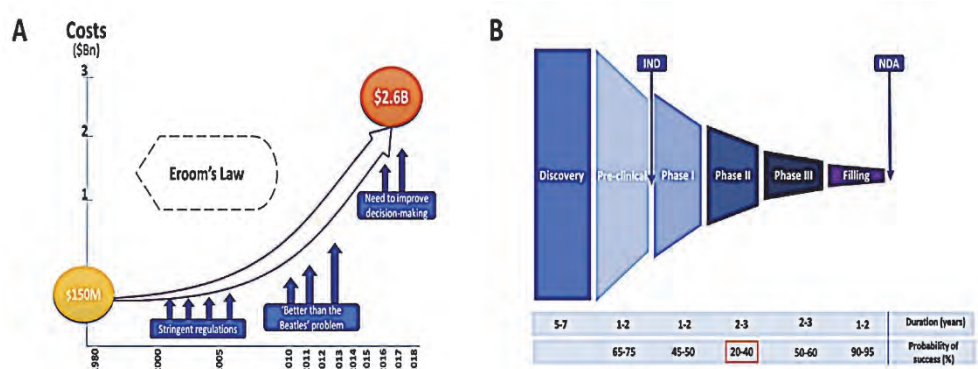


Figure 1. La complexité croissante du développement d'un nouveau médicament : **A)** Les délais et les coûts sont liés aux exigences réglementaires strictes pour démontrer l'efficacité et la sécurité de tout nouveau médicament. La complexité du développement vient également de la nécessité de prouver une efficacité supérieure à celle des médicaments existants (une problématique appelée « meilleur que les Beatles »). La baisse du retour sur investissement des dollars dépensés en R&D pour développer des médicaments a été surnommée loi EROOM, à savoir l'inverse de la loi de Moore, pour traduire sa diminution tous les 9 mois depuis plusieurs décennies ; **B)** Un taux d'attrition très élevé est observé lors du développement des médicaments, avec seulement 6,2 % des médicaments sélectionnés en phase de découverte atteignant finalement les patients. Si l'attrition est continue tout au long du développement, le taux d'échec est particulièrement élevé après les études de phase 2, lorsque des coûts importants sont engagés.

Cet état de fait peut être considéré comme la conséquence de prises de décisions inappropriées au cours de la conception, mais aussi du développement de nouveaux médicaments. Les décisions particulièrement stratégiques comprennent notamment le choix d'une cible thérapeutique appropriée, la sélection d'un candidat médicament pertinent, ainsi que l'identification des patients les plus à même de bénéficier du candidat-médicament (Moingeon et al., 2022). Or la maturité récente de l'IA permet à de multiples niveaux d'améliorer la conception de candidats-médicaments, et d'accélérer leur développement, augmentant ainsi le taux de réussite lors des étapes avancées de l'évaluation chez l'homme, particulièrement coûteuses.

Fondée sur l'intuition prémonitoire du mathématicien anglais, Alan Turing, en 1950, l'intelligence artificielle a pour ambition de développer des machines intelligentes, par exemple sous la forme de réseaux neuronaux artificiels, inspirés par l'architecture et le fonctionnement du cortex visuel des primates (Turing, 1950 ; Ullman, 2019 ; Jean, 2020 ; Haiech, 2020). L'IA se présente comme un ensemble de technologies convergentes qui récapitulent cinq dimensions importantes de l'intelligence humaine, à savoir la perception, l'analyse, l'action, l'apprentissage et depuis l'apparition de ChatGPT, la communication expressive (figure 2).

Avec les avancées de l'apprentissage profond (*deep learning*) au cours des dix dernières années, l'IA est devenue capable d'intégrer des données multimodales en quantités massives, qu'elles soient structurées ou non structurées, pour créer des modèles probabilistes et dynamiques d'un problème ou d'une réalité physique (LeCun et al., 2015). Les données utilisables dans le domaine du médicament sont aujourd'hui générées en abondance par des technologies sophistiquées, recouvrant par exemple le profilage moléculaire multi-omique des patients, l'imagerie médicale à haute résolution, ou les méthodes de caractérisation des molécules médicamenteuses

chimiques ou biologiques (Polton, 2018). L'intégration et l'analyse de ces diverses données grâce à l'IA permettent de bâtir différents modèles prédictifs pour éclairer les décisions importantes dans la conception et la mise au point d'un nouveau médicament (Lavechia, 2019 ; Moingeon, 2022).

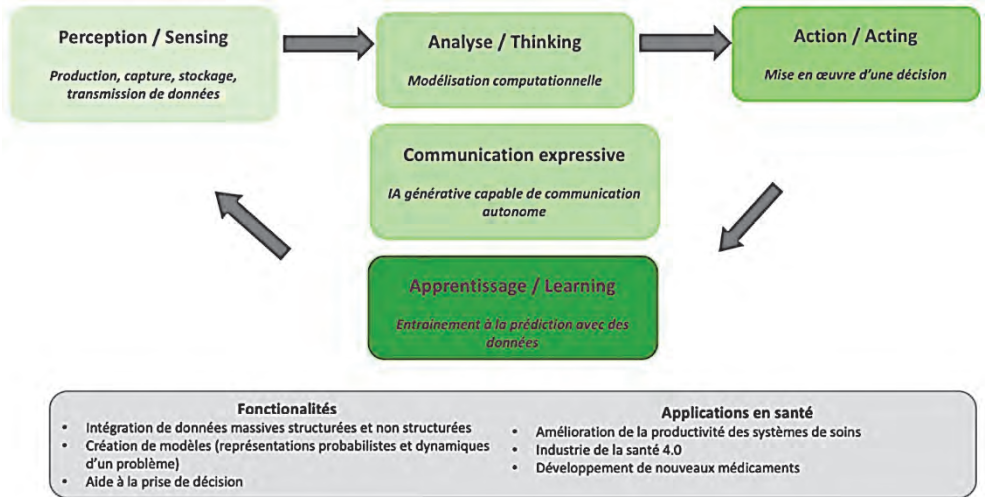


Figure 2. L'intelligence artificielle, une convergence des technologies reproduisant des dimensions de l'intelligence humaine. L'IA récapitule cinq dimensions de l'intelligence humaine à l'aide de la machine. Celle-ci est capable de perception en capturant ou générant des données sur l'environnement. La machine intelligente intègre et analyse ces données pour bâtir des modèles prédictifs. Ces derniers guident les actions humaines, ou permettent à la machine de mettre en œuvre une action appropriée, par exemple à l'aide d'un robot. Les machines intelligentes sont également capables d'apprentissage et plus récemment, de communication autonome avec l'IA générative.

2. Une nouvelle intelligence du médicament : de la résolution de la Covid-19 à la médecine de précision

En 2020, le développement en un an de vaccins et traitements efficaces contre la Covid-19 a été rendu possible grâce aux biotechnologies, avec une contribution de l'IA. Ces vaccins développés en un temps record reposent sur les technologies de l'ARN pour leur conception, les nanotechnologies pour leur formulation, et les biotechnologies pour leur production à grande échelle. L'IA a été cruciale pour analyser les données sur le virus et ses variants, aider à coordonner les mesures de lutte contre la pandémie, modéliser les interactions entre le virus et les mécanismes de défense immunitaire, ainsi que leur dysfonctionnement chez certains patients évoluant vers des formes graves de la maladie.

Cette expérience à l'échelle planétaire invite à évoquer une nouvelle « intelligence du médicament », illustrant la puissante synergie entre des technologies générant des données précises sur la maladie (notamment profilage moléculaire, imagerie médicale haute résolution), les méthodes d'analyse computationnelle basées sur l'IA pour interpréter ces données, et de nouvelles modalités thérapeutiques permettant de cibler les ADN, les ARN et les protéines. La pandémie de Covid-19 a également mis en lumière l'implication de nouveaux acteurs dans l'innovation médicamenteuse, notamment les

agences réglementaires qui ont adapté les règles de l'évaluation clinique chez l'homme pour en raccourcir les délais, ainsi que les dizaines de milliers de patients qui se sont portés volontaires pour tester les candidats vaccins.

Cette évolution vers une nouvelle « intelligence du médicament » repose tout particulièrement sur deux aspects clés : le ciblage précis des processus biologiques altérés et une approche davantage personnalisée du traitement des patients (Moingeon et al., 2022). L'adaptation des traitements aux caractéristiques individuelles des patients a été initiée il y a une vingtaine d'années dans le domaine du cancer, avec des approches thérapeutiques ciblant des mutations spécifiques des tumeurs. Par exemple, le Trastuzumab est un anticorps monoclonal qui s'est révélé très efficace chez certaines patientes atteintes d'un cancer du sein exprimant un marqueur spécifique. Le développement de médicaments ciblés repose sur une connaissance détaillée de la maladie, qui vise notamment à rendre compte de l'hétérogénéité des patients, pour pouvoir implémenter ce que l'on appelle la médecine de précision (Collins et al., 2015). Cette dernière constitue un changement de paradigme majeur, en comparaison de l'approche historique consistant jusque-là à administrer le même traitement pour tous les patients atteints d'une maladie donnée.

Désormais, la médecine de précision propose un traitement qui prend en compte les caractéristiques de chaque individu. Ce concept est aujourd'hui étendu par l'industrie pharmaceutique au-delà de la cancérologie, par exemple aux maladies chroniques immuno-inflammatoires, respiratoires, métaboliques, neuropsychiatriques, qui ont toutes en commun d'être hétérogènes du fait d'une histoire naturelle qui s'étend communément sur plusieurs décennies.

Au total, cette nouvelle intelligence du médicament, combinant les avancées en sciences du médicament avec l'IA, révolutionne la façon dont les maladies sont traitées en ciblant précisément les processus biologiques altérés dans une approche davantage personnalisée.

3. Applications de l'IA à la recherche et au développement de nouveaux médicaments

Schématiquement, on peut distinguer quatre grands types d'applications de l'IA à la recherche et au développement de nouveaux médicaments, avec les finalités respectives suivantes : (i) modéliser les maladies à partir de données de profilage moléculaire obtenues à partir de grandes cohortes de patients, (ii) Identifier parmi les voies moléculaires dérégulées des cibles thérapeutiques pertinentes dans la causalité de la maladie, (iii) concevoir et optimiser des candidats-médicaments interagissant avec ces cibles, et (iv) évaluer *in silico* l'efficacité et l'innocuité des candidats-médicaments retenus (figure 3) (Moingeon et al., 2023a).

La modélisation des maladies a pour premier objectif de comprendre et représenter l'hétérogénéité des patients. À cet effet, des données de profilage moléculaire multi-omiques (génomique, épigénétique, transcriptomique, protéomique, métabolomique, immunophénotypage profond) sont obtenues à partir d'échantillons (sang, biopsie de tissus cibles) de patients en comparaison avec des témoins sains (Tini et al., 2019 ; Gorvel et al., 2022). Ces données moléculaires sont combinées à des données cliniques documentant la progression et la sévérité de la maladie, ainsi que la réponse aux traitements.

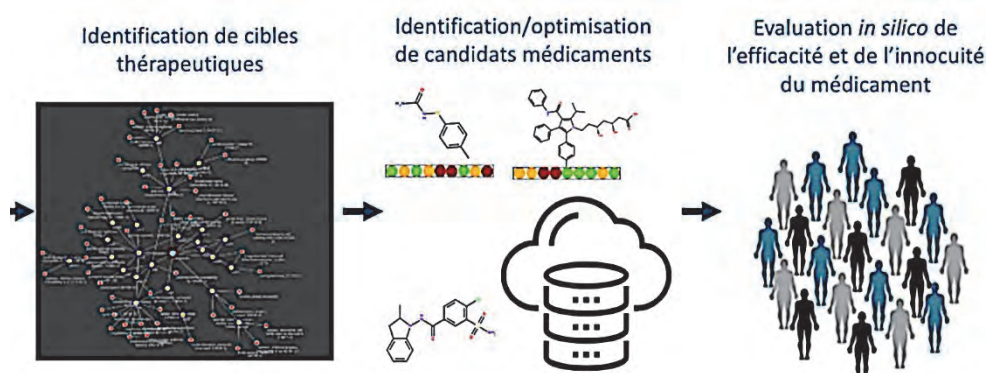


Figure 3. Applications de l'IA à la découverte et au développement de nouveaux médicaments. Pour modéliser une maladie, les technologies multi-omiques de profilage moléculaire combinées à l'IA permettent de caractériser l'hétérogénéité des patients et de les stratifier en sous-groupes homogènes sur la base de leurs caractéristiques biologiques. L'identification de gènes ou de protéines dérégulés dans les différents sous-groupes de patients permet d'identifier des cibles thérapeutiques intéressantes. Des molécules médicamenteuses interagissant avec ces cibles et prédites comme possédant des propriétés désirées sont ensuite identifiées et optimisées par ordinateur. L'IA est également utilisée dans l'évaluation de l'efficacité et de l'innocuité des candidats-médicaments à l'aide de patients virtuels et de jumeaux numériques, simulant ainsi des études cliniques par ordinateur.

Des réseaux neuronaux artificiels sont alors entraînés à partir de ces données massives pour classifier les patients en sous-groupes homogènes qui reflètent l'hétérogénéité de la maladie (figure 3). L'avantage d'une telle stratification moléculaire par rapport aux classifications usuelles basées sur les phénotypes cliniques est qu'elle permet la mise en place de traitements parfaitement ciblés sur des processus biologiques précis, mieux adaptés aux spécificités des différents sous-groupes de patients.

Une deuxième application de l'IA qui découle de la modélisation des maladies est l'*identification de cibles thérapeutiques* pertinentes (Moingeon et al., 2022 ; Pun et al., 2023). À partir d'analyses d'enrichissement de gènes (en utilisant des logiciels tels que *Ingenuity Pathway Analysis* ou *STRING*), chaque sous-groupe de patients est caractérisé en termes de gènes ou de protéines dérégulés par rapport à des sujets sains (figure 3).

Des analyses informatiques de réseaux (*network computing*) permettent ensuite de représenter la maladie dans le sang ou les organes cibles sous la forme d'un système biologique perturbé, fournissant ainsi des hypothèses sur la causalité de cette maladie, particulièrement utiles pour identifier des cibles thérapeutiques intéressantes (Barabasi et al., 2011). Cette sélection de cibles protéiques peut également prendre en compte la prédiction de leur capacité à se lier à de petites molécules chimiques, après modélisation de leur structure 3D à l'aide de l'algorithme AlphaFold, à partir de leurs séquences en acides aminés (Senior et al., 2020).

Les modèles basés sur l'IA sont ensuite mis à contribution pour *identifier les candidats médicaments* capables d'interagir avec la cible sélectionnée, mais aussi pour prédire en parallèle leur activité pharmacologique, ainsi que leur absorption, distribution, métabolisme, excrétion toxicité, solubilité, stabilité (figure 3) (Vamathevan et al., 2019 ; Paul et al., 2021 ; Moingeon et al., 2022 ; Wachter et al., 2024). À partir des premières molécules médicamenteuses sélectionnées, la modélisation par IA est également utilisée pour identifier des modifications de structures chimiques permettant d'obtenir des candidats-médicaments optimisés quant aux propriétés désirées, selon la cible et la

maladie (figure 3). L'intérêt majeur de cette approche computationnelle est qu'elle permet d'explorer un espace de 1 060 molécules médicamenteuses potentielles, tout en réduisant le nombre de candidats à synthétiser et tester dans des études précliniques confirmatoires en laboratoire, qui plus est avec une probabilité accrue de succès.

Enfin l'IA est utilisée dans le cadre d'études cliniques *évaluant les nouveaux médicaments* (Shah et al., 2019). Dans le cadre d'un suivi à distance dans des études dites décentralisées, l'IA est mise à contribution pour intégrer et analyser les données fournies par divers outils numériques, par exemple des capteurs portés par les patients, évitant ainsi à ces derniers de se rendre à l'hôpital. Au-delà de cet apport dans le développement clinique classique, la création de groupes placebos virtuels est une autre application de l'IA qui suscite aujourd'hui beaucoup d'intérêt, notamment dans les études évaluant de nouveaux médicaments dans une maladie rare ou grave, pour lesquelles il est souhaitable de minimiser, voire d'éviter, l'utilisation d'un placebo (Moingeon et al., 2023b). L'évolution d'un tel groupe placebo virtuel peut en effet être modélisée à partir des données de dossiers médicaux de patients réels, atteints de la maladie d'intérêt et qui ont reçu le traitement standard. Par ailleurs, de premières études visent à prédire l'efficacité clinique d'un médicament expérimental à l'aide de modèles *in silico*, basés sur la pharmacologie quantitative des systèmes (QSP), avec des résultats encourageants (Friedrich, 2016 ; Moingeon et al., 2023b). Ces modèles QSP sont construits à partir de données relatives aux processus biologiques perturbés, aux symptômes cliniques et aux caractéristiques du candidat-médicament (affinité pour la cible, pharmacocinétique, biodistribution). Ces différents paramètres sont intégrés sous la forme d'équations mathématiques différentielles pour refléter les interactions dynamiques entre les composants du système, afin de prédire comment le candidat-médicament perturbera ce système (Friedrich, 2016). En combinaison avec l'IA, ces modèles QSP permettent de créer des cohortes de milliers de patients virtuels, sur lesquels il sera possible de prédire l'efficacité de différents médicaments (figure 3). L'apprentissage automatique est ensuite utilisé pour identifier des signatures moléculaires différenciant les patients virtuels prédits comme répondeurs en comparaison avec ceux prédits comme non-répondeurs. Ces patients virtuels peuvent également être mis à profit pour prédire le risque d'effets secondaires, en identifiant des critères de susceptibilité particulière.

À noter, un autre modèle virtuel de représentation de la maladie du patient individuel est le jumeau numérique (Moingeon et al., 2023b). Ces derniers ont été utilisés historiquement par les industries aérospatiale et automobile, ils sont désormais appliqués au domaine de la santé. Dans cette application, ils se présentent classiquement comme des répliques d'un organe donné, par exemple un cœur humain qui bat. Ce modèle construit essentiellement à partir de données d'imagerie médicale permet de répliquer le fonctionnement d'un cœur normal ou pathologique. Parce qu'il contient peu de données biologiques, ce type de jumeau numérique n'est pas adapté pour évaluer *in silico* la performance de molécules médicamenteuses, qui par essence, interfèrent avec des processus biologiques. Le jumeau numérique du cœur humain vivant, développé conjointement par Dassault systèmes et la FDA, s'est toutefois révélé très utile pour certifier des dispositifs médicaux tels que *pacemakers* et *stents* (Moingeon et al., 2023b).

4. Grâce à l'IA, une médecine davantage personnalisée, participative, prédictive et préventive

La médecine de précision est devenue possible grâce à la disponibilité de données en quantité importante qui peuvent, d'une part documenter les spécificités de chaque patient, et d'autre part, prédire les propriétés de milliards de molécules médicamenteuses possibles. Les modèles prédictifs basés sur l'IA évoqués plus haut aident à mettre en adéquation le patient individuel et le candidat-médicament optimal (figure 4). Cette adéquation aujourd'hui réalisée par ordinateur permet d'évoquer l'émergence d'une médecine « computationnelle » de précision (Moingeon et al., 2022).

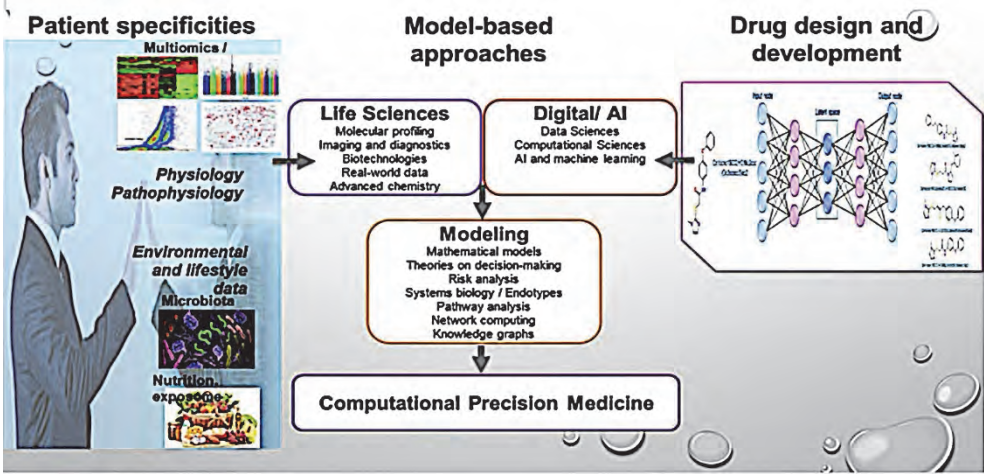


Figure 4. IA et médecine computationnelle de précision. La médecine computationnelle de précision met en relation à l'aide de modèles prédictifs le patient compris dans ses spécificités, et le médicament prédit quant à ses propriétés pharmacologiques. La connaissance détaillée du patient permet d'identifier des cibles thérapeutiques pertinentes et de créer un double virtuel. La connaissance du médicament permet de définir la modalité thérapeutique optimale (petite molécule de synthèse, oligonucléotide, ARN, anticorps monoclonal...) et d'optimiser la structure chimique du candidat-médicament pour qu'elle possède les propriétés souhaitées. La performance du candidat-médicament virtuel peut alors être évaluée sur un patient tout aussi virtuel.

Concrètement, cette dernière se met en œuvre de deux manières : soit sous une forme de médecine stratifiée, soit à travers un traitement véritablement personnalisé. La médecine stratifiée consistant à offrir un médicament adapté à des sous-groupes de patients définis en fonction de caractéristiques partagées sera l'approche à privilégier dans le futur proche. Celle-ci est en effet compatible avec une production du médicament à l'échelle industrielle, dans le respect des nombreux prérequis réglementaires pour garantir une qualité pharmaceutique. Moins fréquemment, la médecine sera véritablement personnalisée, par exemple quand le médicament sera produit à partir de matériaux obtenus chez le patient (par exemple des cellules souches ou des cellules du système immunitaire modifiées en laboratoire avant ré-administration), ou bien dans un cadre de thérapie génique appliquée à des maladies ultra-rares.

L'exploitation de toutes les données de santé grâce à l'IA permettra de mieux comprendre les caractéristiques de chaque être humain, de prédire ses susceptibilités

particulières à de nombreuses maladies. Le patient sera donc à même, dans une approche de plus en plus participative, de devenir un acteur/manager central de sa propre santé. En étant informé de ses risques spécifiques, celui-ci sera davantage responsabilisé dans le suivi de sa santé et dans son hygiène de vie. Par ailleurs, dans ses interactions avec les professionnels de santé, il sera davantage engagé dans les décisions médicales le concernant. Avec de premiers algorithmes prédictifs de l'évolution de la santé de chaque individu, malade ou bien portant, applicables de la naissance à la mort, s'annonce la perspective d'une médecine prédictive. Une telle évolution ne pourra qu'inciter à développer des médicaments qui préviennent la maladie, ou permettant de la traiter à un stade très précoce. Cette évolution du thérapeutique à la prévention sera fortement encouragée dans les décennies qui viennent, eu égard aux possibilités de réaliser par là même des économies substantielles dans les coûts de santé à l'échelle sociétale.

5. Conclusions et perspectives

À la lumière d'avancées récentes, l'IA permet d'accélérer considérablement la découverte de médicaments mieux conçus, présentant une meilleure probabilité de succès au cours des étapes de développement. L'halicine, un antibiotique à large spectre a été identifié en 2020 par l'IA (Stokes et al., 2020). À ce jour, on estime qu'environ 25 médicaments entièrement conçus par l'IA sont entrés en évaluation chez l'homme (Pun et al., 2023), et ce après parfois une phase de recherche de seulement 12 mois de recherche en laboratoire, à comparer aux 5 à 7 ans jusque-là nécessaires pour cette phase de découverte. L'un de ces médicaments est aujourd'hui entré en étude clinique de phase 2 pour commencer à évaluer son efficacité dans la fibrose pulmonaire. Dans le même temps, les modèles prédictifs basés sur l'IA sont désormais appliqués non seulement à la conception de molécules chimiques, mais aussi d'oligonucléotides synthétiques, d'anticorps monoclonaux, de protéines et de peptides, et même de microbiotes à usage thérapeutique.

L'IA accélère considérablement l'émergence d'une médecine de précision computationnelle qui associe une modélisation par ordinateur avec les activités classiques de R et D pharmaceutique pour mieux adapter les médicaments aux caractéristiques des patients (Jayatunga et al., 2022). À mesure de l'acceptabilité par les agences de santé du niveau de preuves de ces modèles fondés sur l'IA, la médecine computationnelle de précision offrira dans les décennies qui viennent des perspectives nouvelles de traitements plus efficaces et plus sûrs dans la majorité des maladies chroniques.

Annexe : Une application concrète de l'IA : la modélisation des maladies auto-immunes

Les maladies chroniques liées à l'hyperactivation du système immunitaire sont très hétérogènes, à la fois en ce qui concerne les mécanismes moléculaires impliqués que la diversité des symptômes observés. Pour développer des traitements plus efficaces et plus sûrs, mieux adaptés à des sous-groupes de patients bien identifiés, des modèles de

ces maladies ont récemment été établis en utilisant des données de profilage moléculaire obtenues avec les technologies omiques. Des données massives et multimodales qui permettent de documenter les processus biologiques perturbés dans le sang et les organes cibles des patients sont collectées dans le contexte d'études cliniques ou de suivi de cohortes, mais aussi à partir de bases de données historiques. En utilisant ces données, une analyse de classification des patients est réalisée par apprentissage automatique, combinant classiquement des méthodes d'apprentissage supervisé et non supervisé de réseaux de neurones afin d'identifier des sous-groupes homogènes de patients. À cette fin, il reste toutefois complexe d'intégrer simultanément toutes les données multi-omiques. Dans une première étape, les patients sont donc classifiés en clusters distincts en se focalisant sur les données transcriptomiques obtenues dans le sang, ces dernières fournissant des informations quantitatives robustes sur l'expression génique, et partant sur les dérégulations biologiques majeures. Ces analyses ont permis de démontrer que des maladies auto-immunes telles que le syndrome de Sjogren ou le Lupus Erythémateux Disséminé recouvrent chacune quatre sous-groupes de patients distincts, selon qu'ils témoignent d'une hyperactivation du système pro-inflammatoire lié aux interférons de type I, combiné ou non à la présence d'autoanticorps et de lymphocytes T ou B activés (Moingeon et al., 2023b). Au sein de chaque cluster identifié, une diversité supplémentaire peut être documentée en introduisant d'autres sources de données multi-omiques et cliniques dans l'analyse. Une telle stratification moléculaire des patients atteints de maladies chroniques complexes fournit donc des hypothèses pour concevoir des traitements adaptés à chaque cluster de patients. Elle aide également à identifier des biomarqueurs sous forme de signatures moléculaires utilisables pour assigner les patients à chacun des clusters. À terme, l'identification de biomarqueurs cliniquement pertinents grâce à l'IA permettra non seulement de classer les patients sur la base des mécanismes moléculaires associés à leur maladie, mais aussi de les catégoriser en termes de pronostic d'évolution de leur maladie, de réponse aux traitements et de risques éventuels d'effets indésirables.

Références

- Barabási A.-L., Gulbahce N., Loscalzo J. Network medicine: a network-based approach to human disease. *Nat. Rev. Genet.* **12**(1), 56-68 (2011).
- Collins, F. S, Varmus, H. A new initiative on precision medicine. *New Engl. J. Med.* **37**, 793–795 (2015).
- DiMasi J. A., Grabowski H. G, Hansen R.W. Innovation in the pharmaceutical industry: New estimates of R&D costs. *J. Health Econ.* **47**, 20-33 (2016).
- Jean A. Une brève introduction à l'intelligence artificielle. *Med Sci* **36**, 1059-1067 (2020).
- Friedrich C. M. A model qualification method for mechanistic physiological QSP models to support model-informed drug development. *CPT Pharmacometrics Syst Pharmacol.* **5**(2), 43-53 (2016).
- Gorvel L., Chretien A. S., Fattori S., et al. Apport de l'intelligence artificielle aux données multi-omiques dans les cancers du sein traités par chimiothérapie néo-adjuvante. *Med. Sci.* **38**, 772–775 (2022).
- Haiech J. Parcourir l'histoire de l'intelligence artificielle, pour mieux la définir et la

comprendre. *Med. Sci.* **36**, 919–923 (2020).

Jayatunga, M.K., Xie W., Ruder L., et al. AI in small-molecule drug discovery: a coming wave? *Nature Rev. Drug Discov.* **21**, 175–176 (2022).

Lavecchia A. Deep learning in drug discovery: opportunities, challenges and future prospects. *Drug Discov. Today* **24**, 2017–2032 (2019).

LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. **521**(7553), 436–444 (2015).

Moingeon P., Kuenemann M., Guedj M. Artificial intelligence-enhanced drug design and development: Toward a computational precision medicine. *Drug Discov. Today* **27**, 215–222 (2022).

Moingeon P. Artificial intelligence-driven drug development against autoimmune diseases. *Trends Pharmacol. Sci* **44**, 411–424 (2023a).

Moingeon P, Chesnel M, Rousseau C, et al. Virtual patients, digital twins and causal disease models: paving the ground for virtual clinical studies. *Drug Discov Today* **28**, 103605 (2023b).

Paul D., Sanap G., Shenoy S., Kalyane D., Kalia K., Tekade R.K. Artificial intelligence in drug discovery and development. *Drug Discov. Today*. **26**(1), 80–93 (2021).

Polton D. Les données de santé. *Med. Sci.* **34**, 449–455 (2018).

Pun F. W., Ozerov I. V., Zhavoronkov A. AI-powered therapeutic target discovery. *Trends Pharmacol. Sci.* **44**, 561–572 (2023).

Ringel M. S., Scannell J.W., Baedeker M., Schulze U. Breaking Eroom's Law. *Nature Reviews Drug Discovery*. **19**(12), 833–834 (2020).

Senior A. W., Evans R., Jumper J., et al. Improved protein structure prediction using potentials from deep learning. *Nature*. **577**(7792), 706–710 (2020).

Shah P., Kendall F., Khozin S., et al. Artificial intelligence and machine learning in clinical development: a translational perspective. *npj Digit Med.* **2**(1):1–5 (2019).

Stokes J. M., Yang K., Swanson K., et al. A Deep Learning Approach to Antibiotic Discovery. *Cell*. **180**(4), 688–702 (2020).

Tini G., Marchetti L., Priami C., Scott-Boyer M.-P. Multi-omics integration-a comparison of unsupervised clustering methodologies. *Brief Bioinform.* **20**(4), 1269–1279 (2019).

Turing A. Computing machinery and intelligence. *Mind* **59**, 433–518 (1950).

Ullman S. Using neuroscience to develop artificial intelligence. *Science* **363**, 692–693 (2019).

Vamathevan J., Clark D., Czodrowski P., et al. Applications of machine learning in drug discovery and development. *Nat. Rev. Drug Discov.* **18**(6), 463–477 (2019).

Wachter R. M., Brynjolfsson. Will Generative Artificial Intelligence Deliver on Its Promise in Health Care? *JAMA* **331**, 61–69 (2024).

Waring M.J., Arrowsmith J., Leach A. R, et al. An analysis of the attrition of drug candidates from four major pharmaceutical companies. *Nat. Rev. Drug Discov.* **214**(7), 475–486 (2015).

Traitement de la crise de la Covid-19 : Vers une approche intégrée dite « agile » basée sur une modélisation systémique¹

Olivier de Weck¹, Daniel Krob², Li Lefei³,
Pao Chuen Lui⁴, Antoine Ruzy⁵, Xinguo Zhang³

¹Institute for Data, Systems and Society, Massachusetts Institute
of Technology, Cambridge, Massachusetts, USA

²Center of Excellence on Systems Architecture Management
Economy & Strategy (CESAMES), Paris, France

³Tsinghua University, Beijing, China

⁴National University of Singapore, Singapore

⁵Norwegian University of Science & Technology, Trondheim, Norway

Abstract

The Covid-19 pandemic has caught many nations by surprise and has already caused millions of infections and hundreds of thousands of deaths worldwide. It has also exposed a deep crisis in modeling and exposed a lack of systems thinking by focusing mainly on only the short term and thinking of this event as only a health crisis. In this paper, authors from several of the key countries involved in Covid-19 propose a holistic systems model that views the problem from a perspective of human society including the natural environment, human population, health system, and economic system. We model the crisis theoretically as a feedback control problem with delay, and partial controllability and observability. Using a quantitative model of the human population allows us to test different assumptions such as detection threshold, delay to take action, fraction of the population infected, effectiveness and length of confinement strategies, and impact of earlier lifting of social distancing restrictions. Each conceptual scenario is subject to 1000+ Monte-Carlo simulations and yields both expected and surprising results. For example, we demonstrate through computational experiments that maintaining strict confinement policies for longer than 60 days may indeed be able to suppress lethality below 1 % and yield the best health outcomes, but cause economic damages due to lost work that could turn out to be counterproductive in the long term. We conclude by proposing a hierarchical Computerized, Command, Control, and Communications (C4) information system and enterprise architecture for Covid-19 with real-time measurements and control actions taken at each level.

¹ Ce chapitre est la traduction, validée par les auteurs de l'article original paru chez Wiley, 22 jul. 2020, DOI : 10.1002/sys.21557. Traduction effectuée par Edith Perrier, AEIS

1. Introduction

La crise de la Covid-19 [1, 2] a pris beaucoup de personnes par surprise. Globalement, la plupart des nations n'étaient pas préparées. De plus, elles ont réagi de manières assez différentes lorsque la pandémie s'est déroulée, comme on peut l'observer par les diverses dynamiques par pays en termes de décès confirmés dus au Covid-19 par million d'habitants [3–5], cf. figure 1. Dans cet article, nous soutenons que l'une des causes profondes de cette impréparation et de cette différence de réaction est due au manque d'outils conceptuels et méthodologiques pour penser la crise comme un système complexe, ce qui a conduit la communauté mondiale à utiliser des approches de modélisation inadéquates. Nous affirmons que l'ingénierie des systèmes est un candidat de premier ordre pour fournir de tels outils. La crise de la Covid-19 devrait être vue comme un problème de contrôle avec retard et incertitude nécessitant une approche basée sur des modèles astucieux et à plusieurs niveaux de l'ingénierie des systèmes.

La crise de la Covid-19 a une portée frappante, tant dans le temps que dans l'espace. Elle aura probablement des impacts pendant une période prolongée, peut-être de 18 mois ou plus, affectant toutes les activités sur Terre, ce qui en fait une crise systémique et non seulement une pure crise sanitaire.

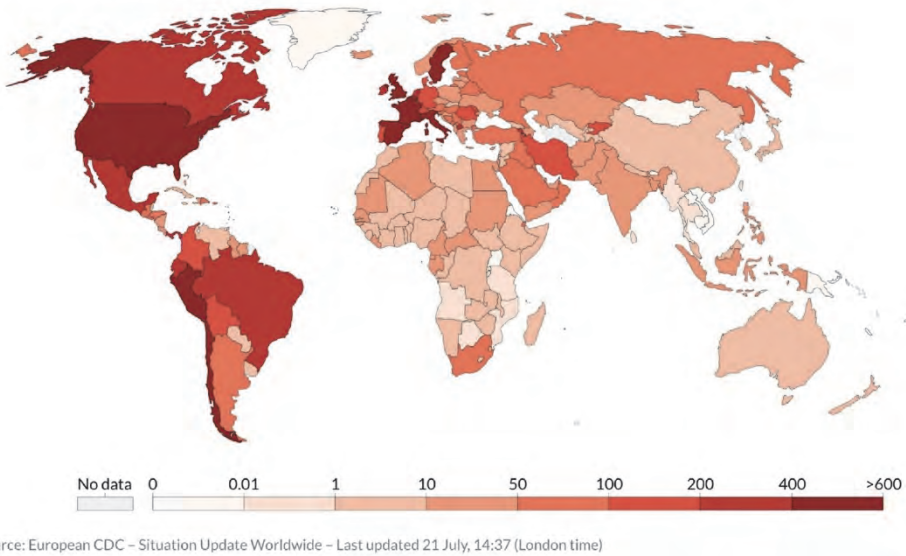


Figure 1. Morts confirmés par millions de personnes au 21 juillet 2020.

L'analogie la plus proche que nous ayons à l'échelle mondiale est la pandémie de grippe H1N1 de 1917-1919 (« grippe espagnole ») qui a tué entre 17 et 50 millions de personnes dans le monde. Ainsi, la gestion de la crise actuelle de la Covid-19 nécessite une approche holistique prenant en compte un système extrêmement complexe, c'est-à-dire la société dans son ensemble.

Un autre aspect important de la crise de la Covid-19 est que la propagation de la pandémie a été très rapide, nécessitant ainsi des prises de décisions rapides. De plus, et nous pensons que c'est une caractéristique structurante de cette crise, le temps

d'incubation de la maladie introduit un délai – estimé jusqu'à deux semaines selon les épidémiologistes [7–9] – entre la mise en œuvre des contre-mesures et l'observation de leurs effets. Cela est aggravé par le fait qu'une fraction significative des porteurs du virus semble être asymptomatique, ce qui cause une grande différence entre le nombre de cas réels et les cas connus ou confirmés [1, 3, 5]. Cela explique pourquoi le problème de surveillance de la crise de la Covid-19 peut être vu comme un problème de théorie du contrôle avec un délai dans la boucle de rétroaction utilisée pour stabiliser la situation, en plus du problème de faible ou de partielle observabilité des véritables états du système. Nous approfondirons ce point plus loin.

D'un point de vue théorique des systèmes, les caractéristiques mentionnées ci-dessus soulèvent plusieurs problèmes difficiles. Le premier, qui est plutôt attendu, concerne la scalabilité : nos méthodes actuelles d'ingénierie et de modélisation des systèmes (voir par exemple [10–17]) peuvent-elles être étendues à un système, ou plus précisément à un système de systèmes [18, 19], aussi grand et complexe que la société humaine dans son ensemble ? Cette question n'est clairement pas facile à résoudre et semble en outre peu abordée par les seuls modèles connus de cette envergure, c'est-à-dire les modèles mondiaux, basés sur les équations généralisées de Volterra, qui ont suivi le travail séminal de Forrester dans les années 1970 [20–22].

Un deuxième problème est causé par l'émergence de solutions locales et partielles, ce qui est significatif puisque la crise de la Covid-19 impacte tous les secteurs de la société, y compris les systèmes médicaux, financiers, de transport, manufacturiers et économiques en général. La société a donc besoin de solutions rapides et innovantes afin de limiter autant que possible les conséquences de la crise. La pression temporelle favorise des solutions locales et partielles, mais aussi une forte coordination entre les acteurs pour éviter des stratégies contradictoires. Une question centrale est donc de savoir comment favoriser l'émergence d'actions locales ascendantes tout en assurant une surveillance et une coordination descendantes de ces actions, avec des boucles de rétroaction courtes. Cela appelle à une approche astucieuse [23–25] sur la méthode *agile*, face à la crise mondiale de la Covid-19.

En énonçant ces problèmes, nous avons fait un choix clair dans cet article : nous croyons fermement à l'utilisation de modèles, et plus précisément de modèles systémiques pour réfléchir et gérer la crise. Les modèles tels que nous les considérons ici ne sont cependant pas des idéaux platoniciens, mais des modèles d'observation qui reposent sur l'observation de la réalité de la crise de la Covid-19, y compris les effets des décisions prises en fonction de ces derniers. Ces modèles visent à capturer la nature systémique de la crise afin de mieux comprendre la situation et de permettre une meilleure communication entre les parties prenantes. À cet égard, les modèles ont deux rôles principaux : d'une part, le calcul concret d'indicateurs clés de performance pour soutenir le processus de prise de décision par des expériences *in silico* ; et d'autre part, un rôle plus métaphorique, celui de nous aider à mieux réfléchir à l'évolution dynamique des systèmes en jeu.

La suite de cet article est organisée comme suit. Dans la section 2, nous discutons des modèles systémiques qui pourraient mieux soutenir la gestion de la crise de la Covid-19. Ensuite, dans la section 3, nous plaidons pour une approche *agile* de la gestion de crise. La section 4 conclut l'article avec plusieurs recommandations.

2. De la crise des modèles aux modèles de crises

2.1 Au-delà de la crise de la Covid-19 : Une crise des modèles

L'impression générale qui se dégage de la vaste et rapidement croissante littérature consacrée à la pandémie de Covid-19 est que cette crise a été d'abord et avant tout analysée comme une crise sanitaire [26, 2]. Les impacts économiques de la crise ont bien sûr été rapidement compris, mais, autant que nous ayons pu l'observer, ils ont plutôt été considérés comme une conséquence inévitable de la crise sanitaire à gérer en second lieu [27]. Cependant, les mesures d'atténuation agressives mises en place dans de nombreux pays étaient et sont à la fois assez efficaces du point de vue de la préservation de la santé (voir, par exemple, [28, 29]) et très inefficaces d'un point de vue économique en raison de leur impact économique global sur toute la société [30, 31]. À cet égard, il n'y a – à notre connaissance – aucune discussion rationnelle dans la littérature scientifique sur ce que pourrait être le meilleur compromis pour minimiser conjointement l'impact sanitaire et l'impact économique de la crise de la Covid-19. Peut-être que la plus grande question éthique autour de tels compromis est qu'elle nécessiterait de donner une valeur économique explicite aux vies humaines, comme discuté par exemple dans [32]. C'est quelque chose qu'aucun gouvernement national ou régional dans le monde n'a apparemment été prêt à faire.

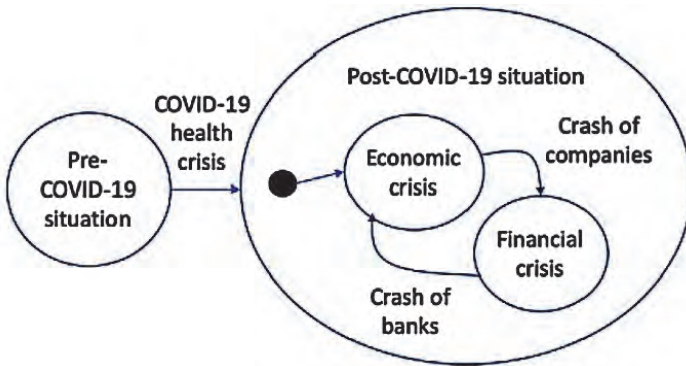


Figure 2. Un scénario catastrophique possible qui pourrait résulter de la crise initiale sanitaire de Covid-19.

Dans un tel scénario futur catastrophique, prolonger la durée du confinement des populations dans les pays occidentaux afin de minimiser l'impact sanitaire à court terme pendant la crise initiale pourrait, par exemple, avoir pour conséquence d'affaiblir gravement la santé de cette même population à moyen et long terme. Ce paradoxe possible est typique dans la théorie du contrôle optimal où la trajectoire optimale de tout système non linéaire ne peut jamais être obtenue par des optimisations locales seules. Pour prendre en compte et éviter ces conséquences paradoxales, il faut choisir une approche systémique pour analyser la crise de la Covid-19, intégrant tous les domaines de connaissances existants dans une compréhension commune de la crise, afin d'obtenir une vision globale, tant dans l'espace que dans le temps et à différentes échelles d'observation possibles, permettant ainsi de trouver l'optimum global pour la société humaine dans son ensemble.

Nous pouvons ainsi constater qu'une autre crise, cachée au sein de la crise de la Covid-19, est une crise des modèles. La communauté mondiale se concentre en effet sur des modèles spécifiques à la santé à court terme pour mieux maîtriser la crise, mais ces modèles sont inadéquats dès que l'on veut aborder la crise dans une perspective à plus long terme et à l'échelle de la société, ce qui nécessite des modèles systémiques.

À cet égard, rappelons qu'un modèle est une abstraction (au sens de la théorie de l'interprétation abstraite) de la réalité, mais pas la réalité elle-même, comme l'exprime, par exemple, la célèbre assertion « Une carte n'est pas le territoire qu'elle représente, mais, si elle est correcte, elle a une structure similaire à celle du territoire, ce qui explique son utilité », popularisée par Korzybski ou le bien connu « Tous les modèles sont faux, certains sont utiles » de Box. Les « modèles » qui ne reflètent pas réellement la réalité dans certaines limites d'erreur ne sont en fait pas des modèles dans cette définition observationnelle et peuvent même avoir des impacts négatifs sur la réalité puisqu'ils conduiront à des décisions ou actions de contrôle erronées. Ces impacts négatifs des « modèles » erronés peuvent bien sûr être amplifiés dans le contexte d'une crise systémique telle que le Covid-19.

Notre point de vue est clairement soutenu par une analyse de la littérature scientifique de 2020 à ce jour. Une recherche du terme « Covid-19 » sur Google Scholar en avril 2020 a révélé qu'à ce moment-là, seulement 10 articles, soit environ 1 %, des 900 articles les plus cités sur le Covid-19 ne discutaient pas principalement des questions de santé (couvrant ici la biologie, l'épidémiologie, la médecine et la politique et gestion de la santé), mais se concentraient plutôt sur les conséquences sociétales et économiques de la crise. De plus, en termes de citations, la plupart de ces 10 articles étaient peu cités : deux ont été cités environ 20 fois, trois environ 10 fois, et les autres moins de 5 fois, alors que le nombre moyen de citations par article était de 15 dans notre échantillon. Seuls très peu d'articles orientés vers la santé, tel [39], discutent également de stratégies mixtes impliquant des considérations économiques ou psychologiques pour lutter contre le coronavirus. Il semble donc que la majorité de l'effort scientifique soit concentrée sur le court terme, sans prendre en compte ce que pourraient être les conséquences sociétales à moyen et long terme de la crise de la Covid-19.

On peut également remarquer qu'il y a probablement une autre crise des modèles médicaux observable en raison de la crise de la Covid-19. Cette autre crise se concentre autour des mérites de l'hydroxychloroquine et de l'azithromycine comme traitement possible de la Covid-19, comme proposé par Raoult et son équipe. Cela a depuis lors été montré comme une proposition qui n'était pas soutenue par une approche méthodologique rigoureuse selon les méthodologistes médicaux. Cependant, la méthodologie statistique médicale apparaît également discutable d'un point de vue modélisation : les modèles basés sur la fréquence utilisés en médecine méthodologique ne peuvent généralement pas avoir d'interprétations probabilistes en raison du manque de grandes séries d'expériences nécessaires pour appliquer la loi des grands nombres ; par conséquent, de tels modèles basés sur la fréquence ne peuvent que trouver des corrélations entre les médicaments proposés et observer les effets sur des séries structurellement limitées en raison des coûts élevés des études cliniques. Mais comme la corrélation n'est pas la causalité, il est simplement impossible, sans aucune compréhension des mécanismes biologiques sous-jacents, de déduire scientifiquement quoi que ce soit de telles études, tant que nous convenons que la science traite des explications

causales, ce qui n'empêche cependant pas d'utiliser des résultats basés sur la corrélation d'un point de vue pratique dès lors qu'ils sont établis de manière solide. Dans cette analyse, le débat autour de la rigueur de l'approche pragmatique et astucieuse suivie par Raoult pourrait simplement être un nouveau débat poppérien opposant différentes méthodes médicales pour aborder une crise sanitaire infectieuse, similaire aux débats qui existaient en physique autour de la théorie aristotélicienne au XVI^e siècle ou de la théorie de l'éther au XIX^e siècle.

On devrait utiliser des modèles qui capturent efficacement la réalité telle qu'elle est et non telle que nous souhaiterions qu'elle soit, si l'on veut prendre des décisions non dominées face à une crise d'une telle ampleur et avoir une chance de la surmonter avec succès.

2.2 Vers un modèle systémique de la crise de la Covid-19

Comme mentionné ci-dessus, il est crucial de construire un modèle d'observation réaliste de la crise de la Covid-19. Nous allons maintenant présenter les principaux éléments de ce modèle systémique.

Ingrédient 1 : Construire un cadre systémique pour modéliser la crise

Adopter une approche systémique nous amène naturellement à construire d'abord un cadre systémique pour modéliser la crise de la Covid-19. La première étape vers cet objectif est de comprendre quels sont les principaux systèmes impliqués ou impactés par la crise. À cet égard, les suivants sont tout à fait évidents :

- l'environnement naturel d'où provient le coronavirus qui a initié la crise,
- le système social, qui contient la population qui est ou peut être infectée par le coronavirus,
- le système de santé qui tente de soigner les personnes infectées par le coronavirus,
- le système de gouvernance qui doit choisir la politique de santé optimale pour faire face à la pandémie,
- le système économique qui peut être indirectement impacté par la crise de la Covid-19.

Notez que l'impact de la crise de la Covid-19 sur le système économique dépend bien sûr de la politique de santé choisie par le système de gouvernance (politique). Si une politique de santé recommande ou force – comme souvent fait – une grande partie de sa population à rester chez elle, cela provoque un double choc, d'abord sur l'offre puisque les acteurs économiques manquant de main-d'œuvre doivent réduire leur production et ensuite sur la demande puisque les personnes qui ne travaillent plus sont généralement moins payées ou pas du tout et consomment donc également moins.

Nous pouvons maintenant esquisser le premier élément de notre cadre systémique générique sur le Covid-19, qui est l'environnement de haut niveau que nous avons modélisé à la figure 3. Cette première vue systémique expose les échanges de matière, de personnes, d'informations et d'argent – plus le coronavirus ici – qui existent entre les principaux systèmes impliqués dans la crise de la Covid-19. Notez que le système global pris en compte ici, c'est-à-dire la société humaine dans son ensemble, y compris son environnement naturel, est un système fermé sur notre planète Terre. Par conséquent, les seuls leviers pour résoudre la crise sont internes à ce système global.

La vue statique de la figure 3 ne montre que l'espace dans lequel la crise de la Covid-19 a lieu. Mais cela ne suffit pas pour modéliser un système : nous devons également considérer son évolution temporelle pour obtenir une image complète à la fois d'un point de vue spatial et temporel. Cela nous amène au deuxième élément de notre cadre systémique général sur le Covid-19, qui traite du cycle de vie de notre système d'intérêt, la société humaine, où nous décrivons ses différents états dans le temps. À cet égard, nous devons maintenant comprendre quels pourraient être les futurs possibles de la société humaine après la crise de la Covid-19, ce qui nous amène à réfléchir en termes de scénarios de cycle de vie, puisque notre avenir est de nature incertaine. Chaque scénario global de cycle de vie peut typiquement être obtenu – en utilisant une ancienne technique remontant aux origines de l'informatique distribuée – grâce à un résultat synchronisé des scénarios de cycle de vie spécifiques à chaque domaine modélisant l'évolution de chacun des principaux systèmes impliqués dans l'environnement de la Covid-19.

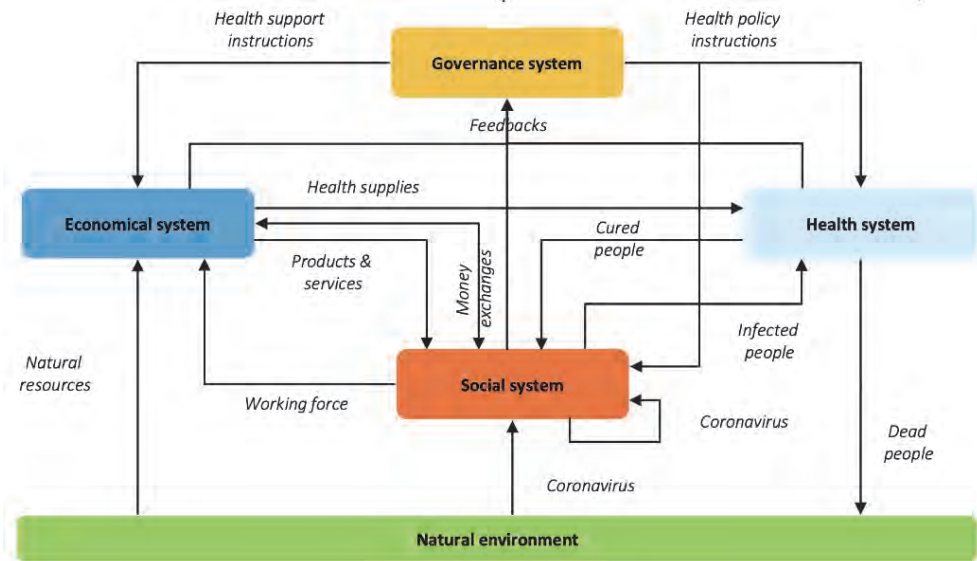


Figure 3. Environnement Covid-19 de haut niveau.

En utilisant cette technique, l'objectif est donc d'être capable de construire des scénarios de cycle de vie réalistes et spécifiques à chaque domaine pour chaque système impliqué dans l'environnement de la Covid-19. Nous nous concentrons d'abord uniquement sur les systèmes social et économique, puisque nous considérons ici la situation qui se produit après la fin de la crise sanitaire de la Covid-19 (voir figure 2). Nous pouvons alors voir que :

- le cycle de vie du système social peut être analysé en premier lieu en termes de richesse et de santé, où ces caractéristiques peuvent être, respectivement, dérivées du cycle de vie du système économique et d'un modèle de propagation épidémique post-crise sanitaire (voir la sous-section suivante) ;
- le cycle de vie du système économique peut être analysé d'un point de vue économique en utilisant des techniques classiques d'analyse d'impact (voir, par exemple [27, 31]).

Dans une approche systémique, nous devons donc construire les différents scénarios possibles de cycle de vie global qui peuvent être obtenus de cette manière (voir la figure 4 pour une illustration de ce processus classique), évaluer leurs probabilités et définir les moyens d'atténuer les pires conséquences. Pour obtenir des modèles plus détaillés, nous devons en outre les affiner en termes d'espace, pour capturer la dimension géographique de la société humaine, et de temps, et pour prendre des décisions de compromis optimales entre l'impact à court et à long terme de la crise de la Covid-19. Notez également que ces scénarios de cycle de vie sont bien sûr fortement dépendants des pays en raison du rôle central du système de gouvernance dans la résolution de la crise de la Covid-19, ainsi que de la susceptibilité de la population qui est une condition initiale.

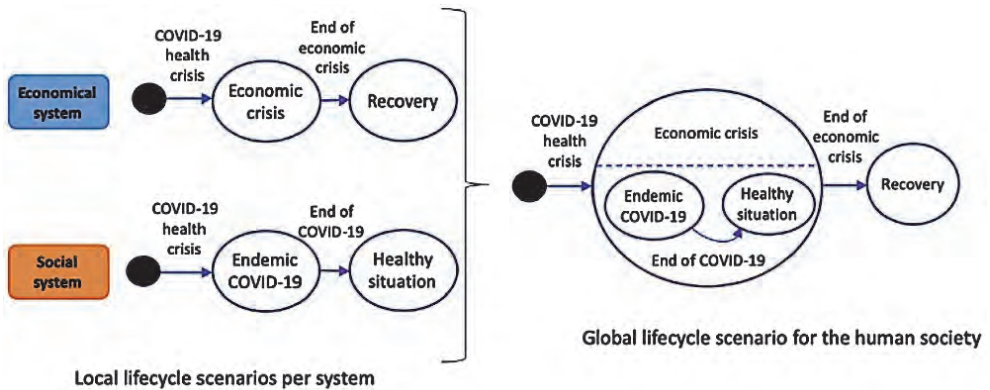


Figure 4. Illustration d'un processus standard pour la construction d'un scénario du cycle de vie global de Covid-19.

Le dernier élément de notre cadre systémique Covid-19 est enfin une déclaration de mission, c'est-à-dire l'exigence de haut niveau concernant la société humaine qui exprime l'objectif que le système de gouvernance veut atteindre. On peut en effet comprendre que le comportement de notre système d'intérêt – la société humaine – sera différent selon que l'on souhaite minimiser l'impact de la crise de la Covid-19 sur le système social, sanitaire ou économique ou trouver le meilleur équilibre entre les impacts sur ces trois systèmes. Il s'agit d'un problème d'optimisation à objectifs multiples pour lequel nous fournissons un exemple de résultat ci-dessous, et que nous avons l'intention d'explorer plus en détail dans un prochain article. Il est donc de la plus haute importance – comme la théorie des systèmes nous le dit [10, 14, 16] – de pouvoir clairement définir la mission à accomplir.

Adopter une approche systémique de la crise de la Covid-19 nécessite de mettre en œuvre notre cadre systémique par pays. Chaque pays a ses propres spécificités, associées à sa propre histoire et culture, qu'il faut prendre en compte dans toute approche systémique : par exemple, la médecine traditionnelle chinoise et les comportements de groupe rigoureux sont spécifiques à la Chine, tandis qu'un système de gouvernance centralisé et des règles de santé peu respectées sont spécifiques à la France, tandis qu'un système de santé hétérogène qui favorise les consommateurs les plus aisés et des lois et politiques différenciées par État sont spécifiques aux États-Unis d'Amérique.

Ingrédient 2 : Modélisation de la propagation d'une épidémie d'une façon réaliste

Un autre ingrédient de notre approche systémique consiste à comprendre la dynamique de la population humaine lorsqu'elle est soumise au stress du coronavirus. La dynamique de tous les autres systèmes impliqués dans l'environnement Covid-19 (voir la sous-section précédente) est en effet fortement gouvernée par cette dynamique : la portée spatiale, la durée et la létalité de la pandémie de Covid-19 sont importantes pour le système de santé et le système économique. Nous allons donc esquisser dans cette sous-section ce qui pourrait être un modèle épidémiologique réaliste de la crise de la Covid-19.

Dans ce domaine, l'épidémiologie nous fournit d'abord les modèles dits compartimentaux qui sont tous issus des travaux pionniers de Kermack et McKendrick [51] qui remontent à 1927. L'idée principale de ces modèles est de décomposer une population soumise à une épidémie en un certain nombre de compartiments discrets, tels que, par exemple, S (pour les personnes susceptibles), I (pour les personnes infectées), R (pour les personnes rétablies) et D (pour les personnes décédées), et de modéliser la propagation d'une épidémie comme un processus de Markov continu contrôlé par des équations d'évolution de type Lotka-Volterra [52, 53, 22, 54].

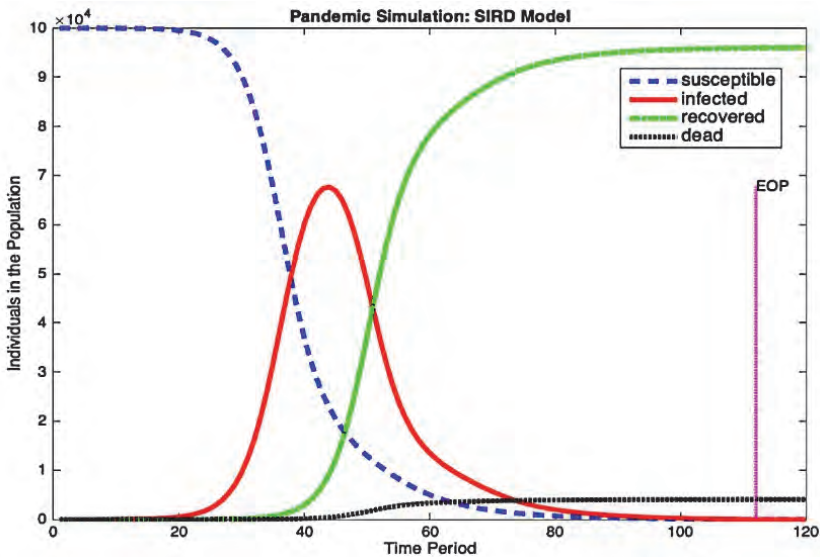


Figure 5. Simulation SIRD avec une moyenne de 10 contacts journaliers, une probabilité de propagation de 2,5 %, une durée de maladie de 14 jours, une létalité de 14 % et pas de contre-mesures.

La figure 5 montre une simulation générique de type SIRD avec une population humaine de 100 000 personnes. SIRD signifie « susceptible-infecté-rétabli-décédé », les quatre principaux compartiments de la population. Dans ce modèle, il faut 20 jours à partir du patient 1 avant que la courbe de l'infection et sa croissance géométrique ne deviennent visibles macroscopiquement. Au jour 38, la moitié de la population est infectée, avec un pic du nombre de personnes infectées au jour 44. La première forte augmentation des décès apparaît avec un délai autour du jour 40. Enfin, il y a une longue traîne due aux infections tardives nécessitant un total de 112 jours pour que l'épidémie se termine (EOP = End Of Pandemic), après quoi environ 4000 individus auront succombé à la maladie.

Ces types de modèles compartimentaux présentent des limitations significatives car ils ne considèrent la population humaine que d’une manière macroscopique, réagissant globalement de manière uniforme à une épidémie, ce qui n’est pas le cas en réalité. De plus, dans un modèle classique de type SIRD, finalement 100 % de la population est infectée, ce qui n’est jamais observé en pratique. Dans la pandémie de Covid-19, on peut également observer des clusters où l’épidémie semble se concentrer de manière récurrente, ce qui suggère plutôt une propagation fractale de l’épidémie, comme mentionné dans un article plus ancien par Jansse et al. en 1999, qui n’a pas semblé avoir été exploré davantage par la communauté épidémiologique. Un tel comportement fractal n’est cependant pas du tout capturé par les modèles compartimentaux classiques de type SIRD. Notez également que, de manière assez surprenante, nous n’avons pas trouvé d’articles scientifiques significatifs étudiant la structure géométrique multiscalaire de la géographie de la pandémie de Covid-19, ce qui suggère également que cette dimension n’a pas encore été analysée en profondeur.

Tableau 1. Exemple de distribution de nœuds dans un réseau social Barabási-Albert.

Degré maximum	Proportion cumulée de nœuds
2	0,05
3	0,43
4	0,62
5	0,73
10	0,91
20	0,975
100	0,999

Afin de mieux intégrer la géographie, qui est l’une des caractéristiques les plus importantes du système de population humaine, nous choisissons une approche par réseau social pour modéliser la propagation de l’épidémie, par exemple, comme dans [56]. Dans une telle approche, la population humaine est modélisée comme un réseau, c’est-à-dire un graphe non dirigé, où chaque nœud du réseau représente un individu ou un groupe de personnes, par exemple, une famille, et chaque arête représente une connexion entre les personnes. Aux fins de notre étude, nous avons utilisé des réseaux générés aléatoirement selon le modèle de Barabási-Albert, qui est censé capturer les caractéristiques les plus importantes des réseaux sociaux réels. Nous rappelons que le modèle de Barabási-Albert génère des réseaux en introduisant des nœuds un par un (après une étape initiale). Un degré d est choisi pour chaque nouveau nœud, qui est ensuite connecté à d’autres nœuds choisis au hasard parmi les nœuds déjà présents dans le réseau. Pour simuler un réseau social, la valeur moyenne du degré d est généralement choisie entre 2 et 3. Le modèle de Barabási-Albert produit des réseaux à échelle libre randomisés dans lesquels la plupart des nœuds ont un degré faible (inférieur à 10), mais certains peuvent avoir un degré très élevé. Afin de comprendre comment une épidémie se propage dans une population ainsi modélisée, nous avons utilisé des réseaux avec 100 000 nœuds et un degré moyen d pour les nouveaux nœuds de 2,1. Avec ces caractéristiques, la distribution des degrés des nœuds dans un réseau social est typiquement distribuée comme montré dans le tableau 1. Les « super-propagateurs » potentiels sont des individus ayant un degré supérieur à 20.

Pour modéliser la propagation d'une épidémie dans ce réseau, nous avons discrétisé un modèle classique de type SIRD. Cela nous amène à représenter l'évolution de l'état de chaque nœud du réseau social qui modélise la population humaine par un automate fini stochastique dont les transitions possibles sont décrites dans la figure 6. Le temps est alors discrétisé et tous les nœuds évoluent simultanément à chaque étape temporelle, ce qui représente une journée calendaire, tout comme dans les automates cellulaires.

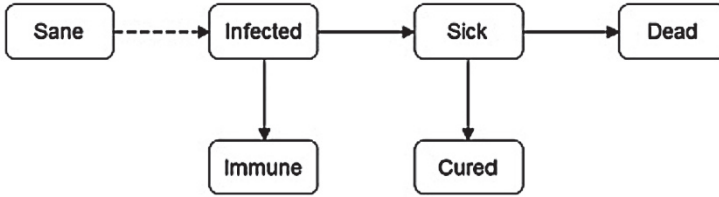


Figure 6. Un automate à états stochastiques pour modéliser l'évolution possible d'un nœud du réseau social.

Les probabilités de transition ont été choisies comme suit afin d'être proches des paramètres de propagation les plus structurants de la Covid-19. Chaque essai de simulation consistait à commencer avec un réseau dans lequel tous les nœuds sont initialement sains, mais l'un d'eux est choisi au hasard et infecté (patient 1), puis à laisser le réseau évoluer selon les lois stochastiques ci-dessus jusqu'à ce qu'il se stabilise. Notez que les expériences informatiques que nous avons menées sur ce modèle n'ont pas pour but de représenter pleinement la "réalité". Une enquête plus approfondie pourrait, par exemple, être réalisée en considérant d'autres distributions probabilistes – typiquement gaussiennes – pour les temps d'incubation et de maladie. Nous pensons cependant que nos expériences peuvent nous donner une meilleure compréhension qualitative de la propagation épidémique, car nous croyons que cette approche par réseau social capture mieux les fondamentaux du système social par rapport aux modèles plus simples de type compartiment. Cela peut donc être utile pour construire des modèles de propagation épidémique plus réalistes, même si cela nécessiterait une quantité très importante de collectes de données et de réglages fins. L'utilisation de traceurs de contacts dans les systèmes de santé est, par exemple, une méthode directe, mais laborieuse, pour reconstruire de tels réseaux sociaux afin d'identifier rapidement les personnes infectées et de les isoler avant qu'elles n'infectent d'autres personnes.

Notre première expérience consistait à simuler des épidémies de plus en plus virulentes en supposant des valeurs croissantes de la probabilité p d'infecter quelqu'un (1000 essais par valeur de p). Nos résultats, décrits dans le tableau 2, montrent un phénomène remarquablement intéressant : pour toutes les valeurs de la probabilité p , seule une fraction infime π de la population est finalement infectée dans la plupart des simulations (moins de 1 personne sur 1000 dans plus de 90 % des cas), ou lorsqu'une proportion significative (supérieure à 1 %) est infectée, la fraction de personnes infectées π dépend de p . En termes plus simples, cela peut être énoncé comme suit : il y a beaucoup de virus circulant dans la population, mais seuls quelques-uns d'entre eux donnent lieu à des épidémies. Les raisons pour lesquelles un virus donne lieu à une épidémie sont intrinsèques au virus lui-même, mais dépendent également de facteurs externes tels que qui est infecté en premier, par exemple une personne avec peu de contacts et un faible degré nodal ou un super-propagateur avec un degré nodal élevé, comme montré dans le tableau 1, ainsi que le comportement de la population qui impacte p . Cela peut expliquer, au moins en partie, pourquoi certains pays ou régions

sont plus touchés que d'autres, ce qui suggère à nouveau une interprétation fractale de la portée géographique d'une épidémie.

Tableau 2. Proportion π de la population qui est infectée, pour différentes valeurs de la probabilité de propagation ρ . La valeur v montre le nombre de simulations (sur un total de 1000) qui conduisent à un certain seuil d'infection de la population

ρ	π	v	π	v
0,005	$\pi < 0,1 \%$	998	$1,7 \% < \pi < 2 \%$	2
0,010	$\pi < 0,1 \%$	983	$21 \% < \pi < 23 \%$	17
0,015	$\pi < 0,1 \%$	959	$43 \% < \pi < 47 \%$	41
0,020	$\pi < 0,1 \%$	945	$58 \% < \pi < 62 \%$	55
0,025	$\pi < 0,1 \%$	908	$70 \% < \pi < 74 \%$	92

Tableau 3. Létalité pour différentes valeurs du seuil de réaction τ et du nombre de jours de confinement γ .

$\tau \backslash \gamma$	0	30	60	90	120	
0,01 %	2,10 %	1,32 %	1,13 %	1,08 %	1,02 %	0,98 %
0,05 %	2,10 %	1,42 %	1,35 %	1,36 %	1,35 %	1,35 %

La deuxième expérience que nous rapportons dans cette section visait à étudier les effets du déconfinement d'une population confinée à qui il a été ordonné de se confiner chez elle. Nous avons ici étudié différentes proportions τ de la population qui deviennent malades avant que l'épidémie ne devienne observable (c'est-à-dire, entre le jour 10 et 20 de la figure 5) et différentes valeurs de la durée γ en termes de jours de confinement. Nous avons considéré qu'il y avait un délai δ de 20 jours avant que le confinement ne soit mis en place et avons pris $\rho = 0,015$. Nous avons également simulé l'efficacité du confinement en réduisant la capacité des arêtes du réseau social à propager la maladie par un facteur $1 - \epsilon$ avec $0 \leq \epsilon \leq 1$. Ce facteur représente le degré d'adhésion de la population aux directives sanitaires pour la distanciation sociale, le port de masques, etc. À chaque étape de la simulation, représentant un jour, un nœud infecté a donc une probabilité $\rho \times (1 - \epsilon)$ d'infecter un nœud sain adjacent. Dans notre expérience, nous avons pris $\epsilon = 0,66$ ($= 2/3$). Nous avons ensuite rapporté les valeurs calculées de la létalité résultante dans le tableau 3. Nous avons supposé que γ est aussi long que nécessaire, ce qui n'est clairement pas réaliste puisque le confinement ne peut pas être maintenu trop longtemps pour des raisons à la fois économiques et psychologiques, mais les résultats montrent la tendance sous-jacente. Chaque mesure rapportée a été obtenue par une simulation Monte-Carlo de 2000 essais.

Comme prévu, plus le confinement est long, moins il y a de décès. Notez cependant que, pour être pleinement efficace, le confinement doit être assez long, plusieurs mois (>90 jours) dans notre expérience virtuelle. La partie la plus intéressante de cette expérience vient cependant de l'observation de la durée totale de l'épidémie. Le tableau 4 montre ces durées pour les mêmes valeurs de τ et γ que dans le tableau 3.

Tableau 4. Durée de l'épidémie en jours pour différentes valeurs du seuil de réaction τ et du nombre de jours de confinement γ .

$\tau \backslash \gamma$	0	30	60	90	120	
0,01 %	243	407	539	361	220	195
0,05 %	243	322	247	192	189	188

Si le confinement est suffisamment long, la létalité diminue considérablement (dans certains cas en dessous de 1 %), mais aussi la durée totale de l'épidémie est raccourcie. Si le confinement n'est pas maintenu assez longtemps, il reste partiellement efficace, en ce sens qu'il réduit la létalité, mais a une conséquence assez paradoxale : la durée de l'épidémie est plus longue que si aucune contre-mesure n'avait été prise. Un confinement court ne prévient pas la propagation significative de la maladie : il ralentit simplement la propagation et évite le pic prononcé de personnes infectées montré dans la figure 5 vers le jour 40, qui semble être sa principale motivation afin de ne pas submerger la capacité du système de santé. Pour cette raison, lorsque la population est déconfinée trop tôt, la maladie est toujours présente et reste endémique.

Les expériences ci-dessus ne prétendent pas représenter pleinement la réalité, mais visent à motiver l'utilisation de modèles de réseaux sociaux pour la modélisation des épidémies. Comme le soulignent Stattner et Vidot, « les modèles de réseau se révèlent être une approche plus réaliste que les modèles simples comme les modèles compartimentaux ou métapopulationnels, car ils sont mieux adaptés à la complexité des relations réelles ». L'une des limitations des modèles de réseau existants est cependant qu'ils ne distinguent pas entre les liens sociaux récurrents avec les membres de la famille et les collègues de travail et les liens occasionnels basés sur des rencontres ponctuelles, comme dans les transports publics ou lors de grands évènements. Ils devraient donc être davantage raffinés et intégrés dans une approche *agile* de gestion de crise basée sur des modèles, tout en tenant compte de leurs limitations.

Ingrédient 3 : Comprendre l'impact économique de l'épidémie

Dans cette section, nous modélisons l'impact potentiel de l'épidémie en fonction des différentes actions du système de gouvernance sur le système économique (voir figure 3). Pour ce faire, nous devons élargir l'analyse précédente en tenant compte non seulement de la létalité en termes de décès (voir tableau 3), mais aussi de la valeur de l'activité économique perdue pendant le confinement. En revenant au modèle SIRD simplifié dans la figure 5, mais en tenant compte maintenant de la fraction de la population ε adhérant réellement au confinement pendant une durée γ , qui est ordonnée avec un certain délai δ après qu'un seuil cumulatif critique τ de la population ait été infecté, nous exécutons un ensemble de simulations. La simulation de base du modèle illustrée dans la figure 5 est considérée comme le scénario 0 sans contre-mesures et elle est progressivement modifiée en utilisant la technique du facteur unique à la fois (OFAT One-Factor-At-a-Time) pour tester un certain nombre d'actions du système de gouvernance, γ compris la réduction du délai δ pour ordonner un confinement, l'augmentation du niveau de rigueur ε du confinement, ainsi que sa durée γ . Le tableau 5 montre les résultats d'un certain nombre d'expériences numériques pour explorer ces compromis en termes de valeur des vies humaines perdues, par rapport au travail productif perdu dans le système économique.

Afin d'estimer l'impact économique de l'épidémie, un certain nombre d'hypothèses ont été faites :

- La valeur moyenne d'une vie humaine perdue est de 1 million de dollars. Il s'agit d'une hypothèse nominale se situant entre la recommandation de trois années de PIB par habitant et par an faite par l'OMS pour évaluer les interventions médicales à la baisse (soit environ 200 000 dollars basés sur les 63 000 dollars de PIB par habitant aux États-Unis en 2018) et la valeur d'environ 8 millions de dollars d'une vie humaine statistique utilisée par des agences gouvernementales américaines telles que la Federal Aviation Administration (FAA) à la hausse.
- Les dommages économiques sont la somme des heures de travail perdues par les personnes infectées qui ne peuvent pas travailler pendant leur maladie, plus la valeur du travail perdu par tous les individus susceptibles et rétablis pendant un éventuel confinement. Par souci de simplicité, nous supposons un salaire horaire de 28 dollars (moyenne américaine en 2018) et que la population est complètement improductive pendant un confinement.
- Nous ne tenons pas compte des impacts secondaires des fermetures prolongées, tels que la faillite des entreprises et la disparition permanente des emplois (voir scénario à long terme dans la figure 2).

Tableau 5. Analyse de scénarios avec le modèle SIRD pour estimer les dommages économiques et humains totaux. n , nombre de contacts quotidiens, ρ probabilité d'infection, τ , fraction de la population infectée déclenchant le confinement, ε , fraction de la population adhérant au confinement, δ , délai pour le début du confinement, T , durée de l'épidémie, nombre total de morts, travail perdu en millions \$M, et dommages totaux incluant nombre de vies humaines et travail perdu en billions \$B, N , population totale, 100 000.

Scénario $N = 10^5$	n	ρ %	τ %	ε	δ jours	γ jours	T jours	Total morts	Perte Travail M\$	Dommages Totaux B\$
0	10	2,5	100	0	0	0	112	4060	312	4,38
1	10	2,5	0,01	0,66	20	30	179	4080	852	4,93
2	10	2,5	0,1	0,66	10	30	309	3989	950	4,95
3	10	1,5	0,05	0,66	20	60	286	3994	2106	6,1
4	10	2,5	0,05	0,8	5	30	334	3975	954	4,94
5	10	2,5	0,05	0,835	5	30	223	524	696	1,22
6	10	2,5	0,05	0,85	5	30	114	160	675	0,86
7	10	2,5	0,05	0,9	5	30	61	66	672	0,74
8	10	2,5	0,05	0,835	10	30	366	2904	858	3,76
9	10	2,5	0,05	0,835	15	30	312	3284	858	4,14
10	10	2,5	0,05	0,835	20	30	261	3505	806	4,31
11	5	2,5	0,05	0,835	20	30	88	190	674	0,86
12	5	1,25	10	0,835	20	30	201	1959	766	2,73

En perturbant le modèle de diverses manières reflétant la large gamme de réponses politiques que nous observons dans différents pays pendant la pandémie de Covid-19, voir figure 1, nous pouvons générer des résultats très différents, non seulement en termes de mortalité, mais aussi en termes de dommages économiques totaux.

Dans le scénario de base 0, nous ne prenons aucune contre-mesure et la majeure partie des 4,38 milliards de dollars de perte totale est due aux décès de 4 % de la population. Les 312 millions de dollars de travail perdu sont dus à l'incapacité de la population infectée et malade à travailler pendant sa maladie, qui est supposée durer 14 jours. C'est le genre de situation que nous nous attendrions à voir dans un pays dont le gouvernement est soit incapable, soit réticent à intervenir dans la crise.

Les scénarios 1 à 3 mettent en place un confinement partiel ($\epsilon = 66\%$) après un délai de 10 ou 20 jours après avoir reconnu le début de l'épidémie et le confinement dure soit 30, soit 60 jours. Les résultats ne sont pas satisfaisants, car les dommages totaux dépassent le cas de base où aucune action n'est entreprise. Ce résultat est dû au fait qu'un tiers de la population ne respecte pas le confinement et continue d'être infecté, rendant la maladie endémique. Un confinement partiel prolongé de 60 jours avec seulement 66 % d'efficacité, comme le montre le scénario 3, est le pire des cas et entraîne à la fois un nombre élevé de décès (environ 4 000) ainsi que des dommages économiques élevés totalisant 6,1 milliards de dollars en raison de la fermeture prolongée, qui est finalement inefficace. Ce scénario est représentatif de la situation générale aux États-Unis à la mi-2020. Dans les scénarios 4 à 7, nous raccourcissons le temps de réaction pour déclencher le confinement après seulement cinq jours (action rapide du gouvernement) et nous augmentons progressivement la rigueur du confinement à 90 % (application stricte par le gouvernement). Il s'avère que ces actions sont très efficaces, donnant lieu à un scénario optimal 7 avec seulement 66 décès, une durée épidémique courte de 61 jours et seulement 740 millions de dollars de dommages, principalement en raison du confinement strict, mais court de 30 jours auquel participent 90 % de la population. Cela empêche essentiellement l'épidémie de fleurir et éteint rapidement la maladie. La trajectoire du scénario 5, entraînant une létalité d'environ 0,5 %, est montrée dans la figure 7. Cela peut refléter la situation dans des pays qui ont reconnu le danger posé par la Covid-19 tôt et ont pris des mesures rapides et fortes (par exemple, la Chine).

Afin de comprendre s'il s'agit du temps de réaction rapide ou de la rigueur du confinement qui est le plus important pour minimiser les dommages économiques, nous maintenons la durée ($\gamma = 30$ jours) et une efficacité critique du confinement ($\epsilon = 83,5\%$) tout en permettant des délais croissants δ de 5 à 20 jours, reflétant une hésitation gouvernementale croissante à déclencher un confinement. Malheureusement, les scénarios 8 à 10 montrent que ce n'est pas une stratégie recommandée, entraînant entre 2900 et 3500 décès et des dommages totaux compris entre 3,7 et 4,3 milliards de dollars. La raison en est que, bien que le confinement soit rigoureux, il commence trop tard et l'épidémie est déjà hors de contrôle. Seules entre 500 et 1000 vies (0,5 % à 1 %) peuvent être sauvées par rapport au scénario « ne rien faire ». Cette situation rappelle l'évolution de la Covid-19 dans certains pays européens tels que la France, où un confinement strict a été institué, mais relativement tard après que le virus se soit déjà propagé à une fraction substantielle de la population. Enfin, les scénarios 11 et 12 montrent comment les dommages économiques peuvent être limités, même lorsque le confinement est à la fois tardif et court ($\delta = 20$ jours, $\gamma = 30$ jours). Dans ces deux scénarios, les conditions initiales sont différentes car soit la population est peu dense (scénario 11) avec seulement 5 contacts quotidiens moyens au lieu de 10

(par exemple, le Canada), soit la population est déjà habituée à porter des masques faciaux (scénario 12), réduisant ainsi la probabilité d'infection de 2,5 % à 1,25 %, comme cela peut être le cas dans certains pays asiatiques tels que le Japon.

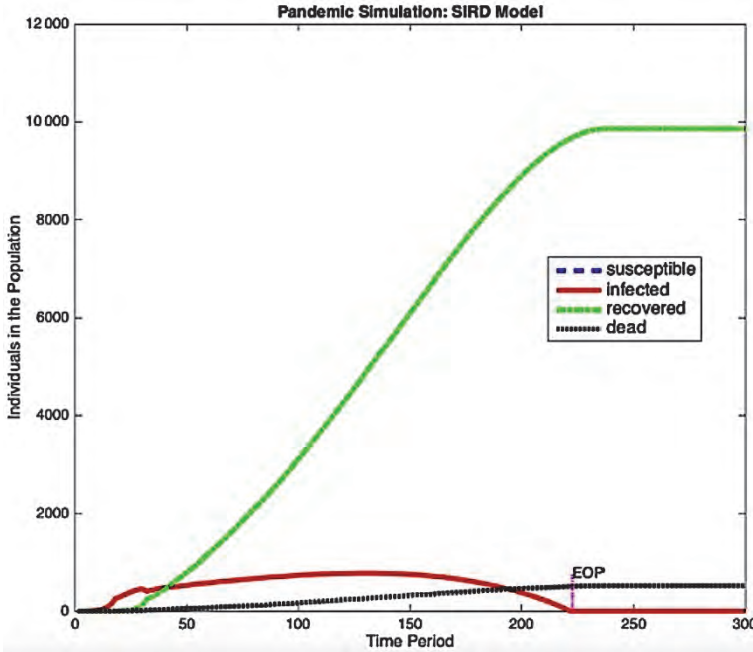


Figure 7. Simulation d'une épidémie pour le scénario 5 avec un confinement de 30 jours (83,5 % d'adhérence) déclenché à partir de 5 jours.

L'analyse économique montre que les conditions initiales, la rapidité de la réponse et la rigueur de la réponse par le système de gouvernance sont cruciales pour déterminer le résultat. Les figures 8 et 9 montrent respectivement le contraste frappant entre le ratio de pertes humaines (décès) et les pertes économiques en travail perdu pour les scénarios 0 (ne rien faire) et le scénario 5 (réponse rapide et forte du gouvernement).

Il existe effectivement un compromis entre les décès et le travail perdu, car dans le scénario 5, la perte économique due au travail perdu est de 696 millions de dollars et elle dépasse la perte économique du scénario 0 de 312 millions de dollars. Cependant, en regardant les pertes totales, y compris la valeur des vies humaines perdues (évaluées à 1 million de dollars chacune), le scénario 5 n'encourt que 27,8 % des pertes du scénario de référence « ne rien faire ». Pour qu'un gouvernement justifie le scénario 0 par rapport au scénario 5, il devrait implicitement évaluer une vie humaine perdue à moins de 108 600 dollars – soit environ 10 % de la valeur nominale – ce qui est la différence marginale de la perte économique du travail divisé par la différence de vies perdues à cause de l'épidémie. Cela peut être le cas dans des pays comme le Brésil (PIB par habitant de 8 921 dollars en 2018) qui ont mal répondu à la pandémie. Nous notons que les modèles de politique qui reposent sur l'affirmation explicite d'une valeur économique de la vie humaine pour justifier l'action gouvernementale seront toujours contestés et controversés. Cependant, sans inclure de tels modèles économiques dans le modèle systémique global de la société, il n'est pas possible de justifier une quelconque politique, qu'elle soit interventionniste ou non.

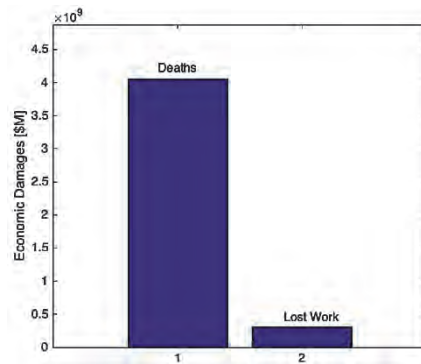


Figure 8. Pertes économiques pour le scénario 0 d'un total de 4,38B\$ dû à 4 % de létalité.

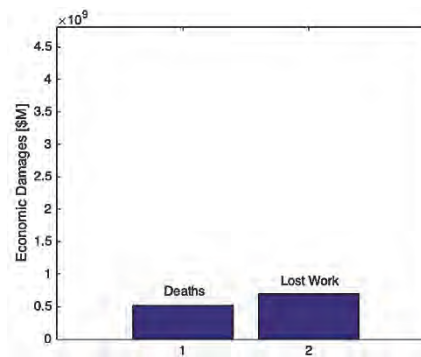


Figure 9. Pertes économiques pour le scénario 5 d'un total de 1,22B\$ dû à 0,5 % de létalité.

3. Vers une approche *agile* de la crise

Dans la section précédente, nous avons identifié une profonde crise des modèles mise en évidence par la pandémie de Covid-19 et proposé d'atténuer ce problème en construisant un modèle systémique de la crise. Dans cette section, comme il est bien connu dans toute discipline scientifique, la solution d'un problème dépend fortement de la clarté et de la rigueur avec lesquelles le problème est formulé. Nous allons donc consacrer cette courte section à l'énoncé du problème que nous devons résoudre dans le contexte de la crise Covid-19.

3.1 Formuler le problème à résoudre

Une première caractéristique de la crise Covid-19 est son impact mondial sur la société humaine. Cette crise peut donc être considérée comme une défaillance de cause commune – au sens de la théorie de la sécurité des systèmes – pour tous les principaux systèmes formant la société humaine. Si nous adoptons une approche de sécurité, le premier problème à résoudre est donc d'atténuer les impacts de la crise sur les systèmes vulnérables composant la société humaine, c'est-à-dire les systèmes sociaux, sanitaires et économiques, comme le montrent les résultats de l'analyse systémique de la section 2.2/ingrédient 1.

Une deuxième caractéristique de la crise Covid-19 provient de la nécessité de prendre en compte les retards importants de rétroaction. À cet égard, un premier type de retard vient du fait qu'il est la plupart du temps trop tard pour déployer des actions d'atténuation afin de limiter la propagation de l'épidémie lorsque des nombres significatifs d'infections sont observés quelque part, car les effets de ces actions ne seront observables que deux semaines plus tard. Cela a été clairement démontré dans le tableau 5 des scénarios 8 à 10. De plus, un deuxième type de retard totalement différent provient du fait que se concentrer sur les impacts sanitaires à court terme de la crise peut entraîner des problèmes à long terme de nature économique, ce qui oblige à arbitrer entre les conséquences à court et à long termes d'une action donnée.

Enfin, une dernière caractéristique de la crise Covid-19 est l'incertitude. En raison de la nature mondiale de la crise et de la période de temps relativement courte sur laquelle elle est concentrée, l'incertitude est partout. Les données cliniques sur l'infection sont en permanence partielles, donc difficiles à interpréter. La compréhension de la structure réelle du réseau social est difficile à saisir. La nature exacte et l'ampleur de l'impact sur le système économique sont difficiles à évaluer. Les données précises sur les capacités sur lesquelles s'appuyer peuvent être délicates à obtenir. Dernier point, mais non le moindre, la crise se traduit également par une quantité massive, hétérogène et souvent contradictoire de données dans lesquelles les signaux vraiment intéressants peuvent être faibles ou cachés.

Synthétisant ces trois caractéristiques de la crise, le problème à résoudre dans notre contexte peut maintenant être clairement énoncé : comment atténuer de manière optimale les conséquences à court et à long terme de la pandémie de Covid-19 sur la société humaine, en tenant compte des délais et des incertitudes spécifiques à cette crise ?

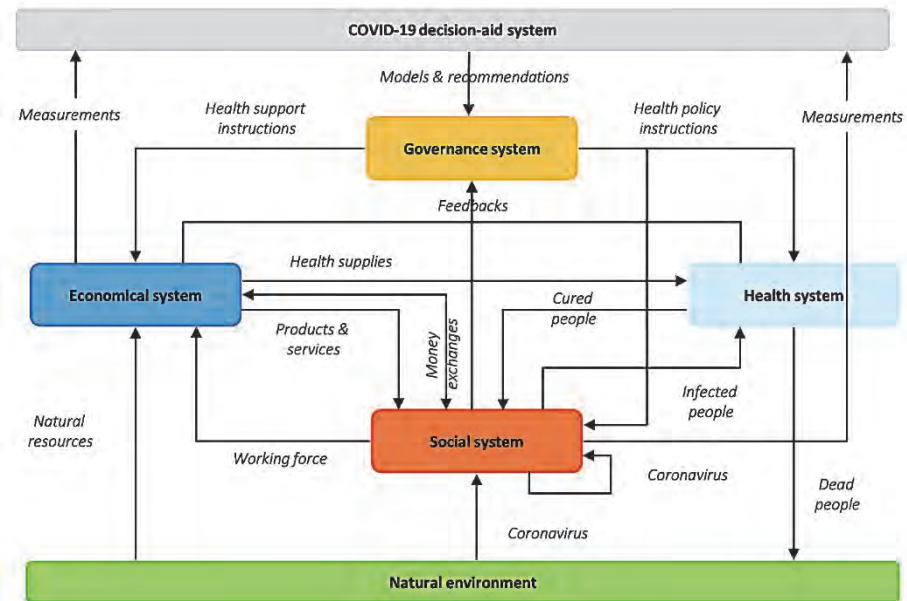


Figure 10. Environnement de haut niveau pour le Covid-19 intégrant un système d'aide à la décision spécifique qui reste encore à concevoir.

On peut remarquer que cette déclaration est un problème typique de contrôle – au sens de la théorie du contrôle – intégrant ici retard et incertitude, ce qui peut être abordé

par de nombreuses techniques existantes. Par conséquent, l'objectif devrait être de concevoir un nouveau système qui puisse soutenir cet objectif de contrôlabilité. Basé sur le principe de contrôle en boucle fermée, qui est le seul permettant d'atteindre un comportement cible donné au fil du temps, un tel système d'aide à la décision Covid-19 (représenté comme le cadre gris en haut de la figure 10) devra mesurer l'état actuel des principaux systèmes formant la société humaine afin de fournir des actions de rétroaction efficaces sur le système social *via* le système de gouvernance, le seul légitime pour prendre des décisions et des actions de contrôle. La figure 10 illustre comment un tel système d'aide à la décision pourrait être intégré dans l'environnement Covid-19 de haut niveau.

3.2 Une réponse possible : Un système astucieux d'aide à la décision pour le Covid-19

Il existe au moins un domaine où la prise de décisions sous des incertitudes structurelles sur un champ géographique sous-jacent est bien connue depuis longtemps dans l'histoire humaine, à savoir le domaine militaire. Architecturer un système d'aide à la décision pour la Covid-19 en utilisant le schéma architectural typique d'un système de Commandement, Contrôle, Communications et Information (C4I) (voir [65, 66]), utilisé dans le domaine de la défense, semble donc assez naturel, tout comme il est souvent utilisé dans un contexte d'ingénierie de système de systèmes [18, 19]. Cela nous amène à proposer une organisation pour un système d'aide à la décision Covid-19 basée sur les trois couches hiérarchiques suivantes, qui correspondent à trois niveaux naturels d'abstraction associés à un champ géographique donné (qui peut être soit les niveaux international, national et local, soit les niveaux pays, région et ville en pratique), exactement comme les systèmes C4I sont organisés :

- la couche stratégique est l'endroit où une conscience situationnelle globale est nécessaire pour maîtriser la crise sur un champ géographique de grande échelle donné : sa mission est de surveiller la crise à un haut niveau et d'élaborer des décisions stratégiques basées sur une vision d'ensemble, alimentée par des informations tactiques ;
- la couche opérationnelle est destinée à maîtriser la crise sur un champ géographique de moyenne échelle donnée : il s'agit donc d'un système distribué qui doit capturer et synthétiser des informations tactiques et prendre des décisions opérationnelles sur leur base en accord avec les décisions stratégiques supérieures ;
- la couche tactique est destinée à maîtriser la crise sur un champ géographique local : il s'agit donc encore une fois d'un système distribué qui doit capturer et synthétiser des informations de terrain et prendre des décisions tactiques sur leur base en accord avec les décisions opérationnelles supérieures.

Notez que cette architecture illustrée à la figure 11 doit être comprise comme une architecture d'entreprise hiérarchique, qui définit comment un système organisationnel, soutenu par des systèmes d'information appropriés et des modèles systémiques comme discuté précédemment, doit être organisé et se comporter.

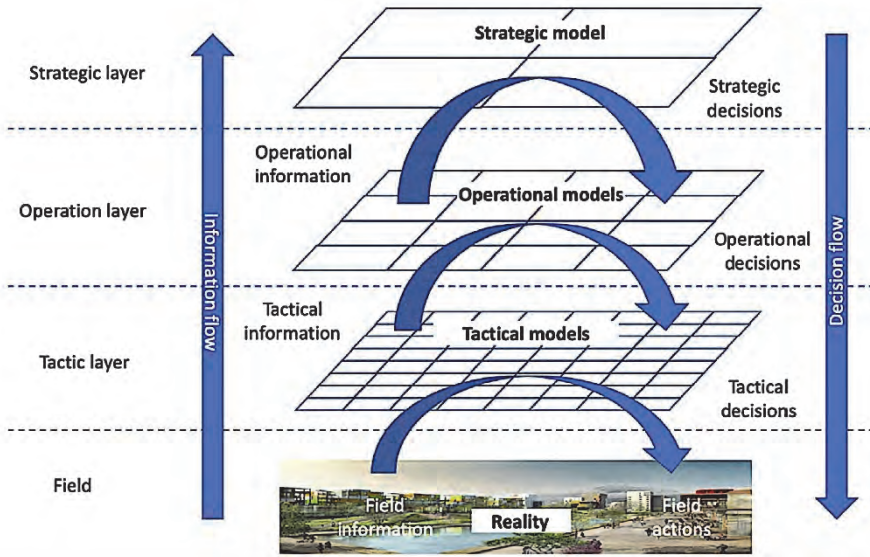


Figure 11. Proposition de couches d'une architecture-systèmes générique pour un système d'aide à la décision Covid-19.

L'idée principale qui la sous-tend est le principe de subsidiarité : les décisions doivent être prises aussi près que possible du niveau le plus approprié pour leur résolution. Ce principe signifie en particulier qu'un niveau supérieur doit éviter de prendre des décisions trop intrusives à un niveau inférieur afin de laisser chaque niveau local entreprendre toujours les actions les plus appropriées en fonction des conditions locales réelles qu'il peut observer, tout en suivant en même temps les orientations globales lorsqu'elles sont localement pertinentes. Cela est crucial dans la sphère militaire, mais encore plus dans le contexte de la crise Covid-19 où la rapidité de prise de décision est fondamentale en raison de la latence de la propagation épidémique comme vu à la section 2.

Notez également qu'il faut capturer des signaux faibles d'importance systémique à chaque niveau de l'architecture proposée : pour illustrer ce point, le fait qu'un officier de police soit infecté dans une certaine zone est, par exemple, un signal faible typique puisque nous pouvons en déduire qu'il existe une certaine probabilité que toute la force de police dans la zone concernée soit ou sera infectée, au moins dans un futur proche (puisque le nombre de contacts quotidiens ou degré nodal des officiers de police peut dépasser $n > 10$, voir les tableaux 1 et 5).

Proposer le schéma architectural hiérarchique précédent n'est cependant bien sûr pas suffisant pour spécifier comment un système d'aide à la décision pour la Covid-19 doit fonctionner. À cet égard, le premier point est d'organiser le modèle systémique que nous avons esquissé à la section 2.2 selon la hiérarchie que nous venons de présenter et qui est utilisée pour organiser le système d'aide à la décision proposé. Ainsi, un tel modèle ne doit pas être monolithique, mais constitué d'une série de modèles interreliés décrivant la société humaine et la propagation épidémique – en utilisant la décomposition de la société, la modélisation des réseaux sociaux et les paramètres économiques présentés dans la dernière section – à chaque niveau de la décomposition géographique sous-jacente aux couches de l'architecture des systèmes de notre système d'aide à la décision Covid-19. Ces modèles de système doivent être complétés

par des indicateurs systémiques clés, également structurés selon la même hiérarchie, qui permettront aux décideurs à chaque niveau de voir à chaque moment quel est l'état actuel et possible à court, moyen et long terme des différents systèmes formant la société humaine dans leur champ de responsabilité. Des exemples typiques peuvent être :

Nombre d'hôpitaux, de lits et de ventilateurs utilisés par les patients atteints de la Covid-19 pour le système de santé ; nombre d'entreprises fermées, de travailleurs mis en congé, d'heures de travail perdues et de baisses de salaires, de demandes de chômage ou de sous-emploi pour le système économique.

Notez que ces modèles systémiques jouent un rôle fondamental en raison de la latence de la crise Covid-19. Ils doivent être utilisés à chaque niveau de l'architecture d'aide à la décision que nous proposons afin de guider les décideurs, en anticipant les conséquences des décisions prises sur les indicateurs systémiques clés choisis pour suivre la crise. Des actions de contrôle optimales avec des techniques de retard peuvent bien sûr également être utilisées ici afin de trouver ce qui pourrait être les meilleures stratégies de mitigation, telles que le port de masques, la distanciation sociale, les tests ou le confinement partiel ou total, à chaque niveau [67, 64]. La Covid-19 est en effet un phénomène totalement nouveau pour lequel on ne dispose généralement pas de beaucoup de données similaires passées : un modèle systémique réaliste, alimenté en permanence par des données de terrain et recalibré et modifié en permanence pour capturer le plus précisément possible la réalité de la crise, peut donc jouer un rôle important pour soutenir les meilleures décisions possibles dans le contexte d'une crise complexe et en évolution rapide. Notez également qu'une proposition similaire – au moins dans son principe de base – a été proposée par Zhang et al., mais dans le contexte d'une épidémie classique [60].

Enfin, mais non des moindres, le système d'aide à la décision Covid-19 que nous avons esquissé ici doit se comporter de manière « agile », au sens de l'agilité dans le développement logiciel ou industriel (voir [68–71, 24]). Un problème en suspens est d'avoir un processus de plan, faire, vérifier et agir qui puisse s'adapter rapidement à une réalité en évolution rapide. L'agilité permet de résoudre ce problème en structurant de manière très rigoureuse les processus d'analyse, de décision et d'action, tout en offrant une grande flexibilité à tous les acteurs impliqués, ce qui sont deux caractéristiques obligatoires pour faire face à une crise complexe comme la Covid-19. En pratique, un processus d'aide à la décision Covid-19 *agile* doit typiquement être organisé autour de rituels astucieux réguliers – gérés à différentes échelles de temps (par exemple, quotidiennement et hebdomadairement) et différents niveaux de synthèse – où les principaux scénarios, vues et indicateurs doivent être partagés et remis en question régulièrement à chaque niveau de l'architecture d'aide à la décision choisie. L'objectif ici est de fournir régulièrement une synthèse de la situation actuelle de la crise aux acteurs concernés afin de leur permettre de gérer leurs missions avec la meilleure compréhension possible de la situation et des conséquences de leurs actions.

4. Conclusions

Dans cet article, nous attirons l'attention sur l'importance fondamentale d'avoir des modèles systémiques réalistes pour gérer et atténuer une crise systémique de l'ampleur de la crise Covid-19. Nous avons également esquissé ce qui pourrait être une

approche *agile* à utiliser dans ce type de crise. Notre objectif n'était bien sûr pas de proposer une solution définitive, ce qui est probablement impossible. Nous pensons néanmoins que les idées contenues dans cet article sont des contributions précieuses qui peuvent être intéressantes dans le contexte de la crise Covid-19, d'autant plus que la crise sanitaire sous-jacente sera probablement endémique pendant une certaine période (au moins 200-300 jours selon la plupart de nos simulations) et couplée à des résultats économiques à court et moyen terme. Bien qu'il y ait des impacts économiques dus à des actions d'atténuation fortes telles que les confinements mandatés (provoquant une perte d'activité économique), la perte de valeur due aux décès humains, avec un taux de létalité estimé à 4 %, dépasserait de loin les pertes économiques. Nous avons montré que cela dépend fortement de la valorisation moyenne d'une vie humaine, qui est en soi une question très controversée.

Il y a bien sûr de nombreux aspects détaillés du système de support décisionnel Covid-19 proposé qui nécessitent des détails et des élaborations supplémentaires. Nous nous sommes concentrés sur la question du retard et de la rigueur de l'action dans le système global de contrôle de l'épidémie dans cet article. Cependant, à mesure que nous en apprenons davantage sur la nature particulière de ce coronavirus, la question de l'observabilité de la société humaine (tests) peut par exemple être encore plus importante.

Nous voudrions enfin souligner le fait que l'ingénierie des systèmes a un rôle important à jouer dans le contexte de la Covid-19, car elle peut permettre la collaboration nécessaire entre les différentes disciplines – telles que la biologie, l'économie, l'ingénierie, l'épidémiologie, la finance, la géographie, la gestion des politiques de santé, l'immunologie, la logistique, la fabrication, la médecine, la sécurité, la sociologie, les systèmes urbains, et bien d'autres – qui apportent toutes une pièce au puzzle complexe posé par la crise mondiale de la Covid-19.

Références

- [1] Chinese Center for Disease Control & Prevention (CCDC). The Epidemiological Characteristics of an Outbreak of 2019 Novel Coronavirus Diseases (Covid-19) – China. 17 Feb., 2020. <https://weekly.chinacdc.cn/en/article/id/e53946e2-c6c4-41e9-9a9b-fea8db1a8f51>. Accessed July 21, 2020.
- [2] World Health Organization. Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (Covid-19). WHO; 2020. www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/who-china-jointmission-on-covid-19-final-report.pdf
- [3] CSSE. Covid-19 Dashboard by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins. Center for Systems Science and Engineering (CSSE), Johns Hopkins University. 2020. Accessed July 21, 2020. <https://gisanddata.maps.arcgis.com/apps/opsdashboard/index.html#/bda7594740fd40299423467b48e9ecf6>. Accessed July 21, 2020.
- [4] Roser M, Ritchie H, Ortiz-Ospina E, Hasell J. Statistics and Research Coronavirus Pandemic (Covid-19). Our World in Data, 2020. <https://ourworldindata.org/coronavirus>. Accessed July 21, 2020.
- [5] World Health Organization. Coronavirus Disease 2019 (Covid-19) situation reports. www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus2019/situation-reports/.

Accessed July 21, 2020.

[6] Barry JM. The site of origin of the 1918 influenza pandemic and its public health implications. *J Transl Med.* 2004;2(1):3. <https://doi.org/10.1186/1479-5876-2-3>

[7] Huang C, Wang Y, Li X, et al. Clinical features of patients infected with 2019 novel coronavirus in Wuhan, China. *Lancet* 2020;395(10223):497-506.

[8] Zhang J, Litvinova M, Wang W, et al. Evolving epidemiology and transmission dynamics of coronavirus disease 2019 outside Hubei province, China: a descriptive and modelling study. *Lancet* 2020; 20(7):793-802. [https://doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30230-9](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30230-9)

[9] Zhu N, Zhang D, Wang W, et al. A novel coronavirus from patients with pneumonia in China, 2019. *NEngl J Med.* 2020;382(8):727-733.

[10] CESAMES. CESAM: CESAMES Systems Architecting Method A Pocket Guide. CESAMES; 2017:134 pp.

[11] de Weck O. Strategic Engineering – Designing Systems for an Uncertain Future. MIT; 2006.

[12] Maier MW, Rechtin E. The Art of Systems Architecting. CRC Press; 2002.

[13] Ramo S, St Clair RK. The Systems Approach: Fresh Solutions to Complex Problems through Combining Science and Practical Common Sense. Commons Lab| Case Study Series 2. Anaheim, CA : TRW Inc.; 1998.

[14] Sage AP, Armstrong JE Jr. Introduction to Systems Engineering. Wiley; 2000.

[15] Severance FL. System Modeling and Simulation – An Introduction. Wiley; 2001.

[16] Sillitto H. Architecting Systems – Concepts, Principles and Practice. College Publications; 2014.

[17] Zeigler BP, Praehofer H, Kim TG. Theory of Modeling and Simulation Integrating Discrete Events and Continuous Dynamic Systems. Academic Press; 2000.

[18] Luzeaux D, Ruault JR, Wippler JL. Complex System and Systems of Systems Engineering. ISTE Ltd. and Wiley; 2011.

[19] Ring J, Madni A M. Key challenges and opportunities in ‘system of systems’ engineering. In 2005 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, vol. 1, pp.973-978. IEEE, 2005.

[20] Forrester JW. World Dynamics. Productivity Press; 1971.

[21] Meadows D, Randers J, Meadows D. The Limit to Growth. Earthscan; 2004.

[22] Volterra V. Fluctuations in the abundance of a species considered mathematically. *Nature.* 1926;118:558-560.

[23] INCOSE. Agile systems engineering. www.incose.org/ChaptersGroups/WorkingGroups/transformational/agile-systems-se. Accessed July 21, 2020.

[24] Krob D. CESAF: cESAM Engineering Systems Agile Framework. 10th International Conference on Complex Systems Design & Management 2019, Invited talk, Paris; 2019.

[25] Woodcock H. The Agile Manifesto Reworked for Systems Engineering. INCOSE UK, ASEC Conf., 2012.

[26] Walker PGT, Whittaker C, Watson O, et al. Report 12 : The Global Impact of Covid-19 and Strategies for Mitigation and Suppression, Imperial College Covid-19 Response Team,

Imperial College. March 26, 2020. www.imperial.ac.uk/media/imperial-college/medicine/mrcgida/2020-03-26-Covid19-Report-12.pdf

[27] McKibbin WJ, Roshen F. The Global Macroeconomic Impacts of Covid-19: Seven Scenarios. CAMA Working Paper No. 19/2020. 2020 : 45pp.

[28] Anderson RM, Heesterbeek H, Klinkenberg D, Déirdre Hollingsworth T. How will country-based mitigation measures influence the course of the Covid-19 epidemic? *Lancet*. 2020;395(10228):931-934.

[https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(20\)30567-5](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(20)30567-5)

[29] Armstrong M. Covid-19 cases per million inhabitants : A comparison. Statista. April 8, 2020. www.statista.com/chart/21176/covid-19infection-density-in-countries-most-total-cases/. Accessed July 21, 2020.

[30] International Monetary Fund. Confronting the crisis: priorities for the global economy. April 2020. www.imf.org/en/News/Articles/2020/04/07/sp040920-SMs2020-Curtain-Raiser. Accessed July 21, 2020.

[31] Strauss-Kahn D. L'être, l'avoir et le pouvoir dans la crise, *Politique Internationale* (to appear) www.leclubdesjuristes.com/letre-lavoir-et-le-pouvoir-dans-la-crise/. Accessed July 21, 2020.

<https://www.leclubdesjuristes.com/archives-cdj/letre-lavoir-et-le-pouvoir-dans-la-crise-par-dominique-strauss-kahn-2836/> Accessed February 2023

[32] Herby J. We pay minimum five times as much for a life year

with the corona measures than we normal do. CEPOS, March 3, 2020. <https://www.cepos.dk/media/4701/we-pay-minimum-five-times-as-much-for-a-life-year-with-the-corona-measures-than-we-normally-do.pdf>

[33] Marwedel P. *Embedded System Design*. Kluwer; 2003.

[34] Bellman R. *Adaptive Control Processes: A Guided Tour*. Princeton, NJ : Princeton University Press; 1961.

[35] Cousot P, Cousot R. Abstract Interpretation: A Unified Lattice Model for Static Analysis of Programs by Construction or Approximation of Fixpoints. *Conference Record of the Fourth ACM Symposium on Principles of Programming Languages*. Los Angeles, CA:ACM Press; 1977:238-252 <https://doi.org/10.1145/512950.512973>

[36] Korzybski A. *Science and sanity – an introduction to non-Aristotelian systems and general semantics*. The International Non-Aristotelian Library Pub. Co. ; 1933 : 747-761.

[37] Box GEP. All models are wrong, but some are useful. *Robustness in Statistics*. 1979;202(1979):549.

[38] Harzing A-W. *The Publish or Perish Book*. Melbourne : Tarma Software Research Pty Ltd; 2010.

[39] Haushofer J, Metcal JE. *Combining Behavioral Economics and Infectious Disease Epidemiology to Mitigate the Covid-19 outbreak*. Princetone, NJ: Princeton University; 2020.

[40] Gautret P, Lagier JC, Parola P, et al. Hydroxychloroquine and azithromycin as a treatment of Covid-19: results of an open-label non-randomized clinical trial. *Intl J Antimicrob Agents* March 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2020.105949>

[41] Dahly D, Gates S, Morris T. *Statistical Review of Hydroxychloroquine and Azithromycin as a Treatment of Covid-19: Results of an Open-Label Non-Randomized Clinical Trial*. March

23, 2020. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3724167>

[42] Babu AN. Clinical Research Methodology and Evidence-Based Medicine: The Basics. Anshan Ltd ; 2007.

[43] Feller W. An Introduction to Probability Theory and Its Applications. Vols. I and II. Wiley; 1966.

[44] Fassbender M. Clinical trial cost is a fraction of the drug development bill, with an average price tag of 19 M\$. Outsourcing Pharma, Sep. 26, 2018. www.outsourcing-pharma.com/Article/2018/09/26/Clinical-trial-cost-is-a-fraction-of-the-drug-development-bill. Accessed July 21, 2020.

[45] Popper K. Conjectures and Refutations: The Growth of Scientific Knowledge. London and New York: Basic Books; 1962.

[46] Koyre A. Galileo Studies. Branch Line; 1977.

[47] Greenwood R, Hanson SG, Lin LJ. Reflexivity in Credit Markets. California Institute of Technology, Preprint, April 2019.

http://www.its.caltech.edu/%7Ejin/GHJ_Paper_FINAL_20190403.pdf

[48] Ackerman F, Nadalwith A, Benetti C, Gallagher KP, Salas C. The Flawed Foundations of General Equilibrium: Critical Essays on Economic Theory. London : Routledge; 2004.

[49] Choi Y, Douady R. Financial Crisis Dynamics: Attempt to Define a Market Instability Indicator. Quant Finance. 2012 ;12(9):1351-1365.

[50] Alur R, Dill DL. A theory of timed automata. Theor Comput Sci. 1994;126(2):183-235.

[51] Kermack WO, McKendrick AG. A contribution to the mathematical theory of epidemics. Proc R Soc A 1927;115(772):700-721. <https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0118>

[52] Capasso V. Mathematical structure of epidemic systems. Springer Verlag; 1993.

[53] Lotka AJ. Elements of Physical Biology. Williams & Wilkins Company; 1925.

[54] Vynnycky E, White RG, Eds. An introduction to infectious disease modelling. Oxford University Press; 2010.

[55] Jansse HK, Oerding K, vanWijland F, Hilhorst HJ. Lévy-flight spreading of epidemic processes leading to percolating clusters. Eur Phys J B. 1999;7:137-145.

[56] Stattner E, Vidot N. Social network analysis in epidemiology: Current trends and perspectives. Research Challenges in Information Science, Gosier; 2011:1-11. hal-00624364

[57] Berge C. The Theory of Graphs and Its Applications. Wiley; 1964.

[58] Albert R, Barabási AL. Statistical mechanics of complex networks. Rev Mod Phys. 2002;74(1):47-97. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.47>

[59] Wolfram S. Statistical mechanics of cellular automata. Rev Mod Phys. 1983;55(3):601-644.

[60] Zhang Z, Wang H, Wang C, Fang H. Cluster-based epidemic control through smartphone-based body area networks. IEEE Trans Parallel Distrib Syst. 2015;26(3):681-690.

[61] Rausand M, Hoyland A. System Reliability Theory – Models, Statistical Methods & Applications. Wiley; 2004.

- [62] Sontag E. *Mathematical Control Theory: Deterministic Finite Dimensional Systems*. 2d ed. Springer Verlag; 1998.
- [63] Ackermann J. *Uncertainty and Control*. Proc. of an International Seminar organized by Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DFVLR), Germany; 1985.
- [64] Marshall E. *Control of Time-Delay Systems*. Peter Peregrinus Ltd.; 1979.
- [65] Alberts DS, Hayes RE. *Understanding Command and Control*. Washington, DC : US Department of Defense CCRP Publication Series; 2006.
- [66] United States, Joint Chiefs of Staff. *Doctrine for Command, Control, Communications, and Computer (C4) Systems support to Joint Operations*. Vol.6. Joint Chiefs of Staff, 1995.
- [67] Gul Z, Kang YH, Jung IH. Optimal treatment of an SIR epidemic model with time delay. *Biosystems*. 2009;98(1): 43-50.
- [68] Agile Manifesto. *Agile Manifesto*. <http://agilemanifesto.org/>. Accessed July 21, 2020.
- [69] Dingsoyr T, Nerur S, Balijepally V, Moe NB. A decade of agile methodologies:towards explaining agile software development. *J Syst Softw*.2012;85(6):1213-1221.
- [70] Douglas BP. *Agile Systems Engineering*. Morgan Kaufman ; 2015.
- [71] Dawber TR, Gilein MD, Meadors MD, Moore FE Jr. National Heart Institute, National Institutes of Health, Public Health Service, Federal Security Agency. *Epidemiological Approaches to Heart Disease: The Framingham Study*. Joint Session of the Epidemiology, Health Officers, Medical Care, and Statistics Sections of the American Public Health Association, 78th Annual Meeting in St. Louis,MO, Nov. 3, 1950.
- [72] Gordon T, Kannel WB. Multiple risk functions for predicting coronaryheart disease: the concept, accuracy, and application. *Am Heart J*. 1982;103:1031-1039.

6

Crises économiques : un point de vue de physicien¹

Jean-Philippe Bouchaud

Professeur à l'École Normale Supérieure
Membre de l'Académie des Sciences

Président et directeur de la recherche de Capital Fund Management (CPM), Paris

Abstract

This chapter addresses economic crises from the perspective of physics. Considering the history of finance, it argues that many crises, such as the 1929 crash or the 2008 crisis, have no obvious explanation. These events seem to be unrelated – or only partially related – to the economic reality of the moment. Instead, they suggest an intrinsic instability of financial markets. This observation extends to the economic dynamics themselves, as seen, for example, through the fluctuations in growth rates in the United States. Therefore, traditional economic models, which assume rational agents and efficient markets, must be criticized. The core of the problem is a good understanding of collective dynamics and their ability to generate endogenous crises. Statistical physics, by integrating a multitude of agents, their behaviors and interactions, and analyzing through phase diagrams, the diversity of emerging collective phenomena that can result, inspires models that have proven their worth in many fields. Some examples are recalled. Such approaches also offer new perspectives in Economics. Thus, the chapter develops a multi-agent model in which the agents – businesses, households, a Central Bank – are not rational in the sense of classical models: they do not act based on an optimization calculation but make their decisions based on simple and plausible heuristic rules. This model, in the presented version, explores the possibility of endogenous cycles of economic crises (periods of unemployment and full employment) based on two determining parameters: the ease of dismissal and the permitted debt rate.

1. Introduction : de nombreuses crises sans explication

Quand on regarde l'histoire de la finance ou de la micro-économie, il apparaît qu'elle est ponctuée d'un très grand nombre de crises sans explication évidente.

1.1 Sur les marchés financiers

Par exemple, le Krach de 1929 (figure 1) où la bourse de New York s'effondre sans crier gare après une montée spectaculaire, après une bulle, mais le déclenchement de cette crise n'est pas clairement identifié. Ce n'est pas à cause d'une catastrophe particulière intervenue ce jour-là.

¹ Ce chapitre est la transcription, effectuée par Edith Perrier (AEIS), de la conférence tenue par Jean-Philippe Bouchaud le 4 avril 2022 dans le cadre des sessions mensuelles de AEIS. Il a été relu et amendé. Il est publié avec son accord.



Figure 1. Le Krach de 1929 [1].

De nombreux Krachs sont de cette nature, 1987, 1962 dont plus personne ne parle. En 2010, il y a un évènement dans la journée, très spectaculaire, que les gens ont mis sur le compte de la finance haute-fréquence, mais qui s'est produit sans cause particulière. En fait, de tels évènements extrêmes surviennent en permanence dans les marchés financiers, on se souvient des très gros et on oublie les plus petits ; de nombreux mini-krachs de cette nature se produisent régulièrement sans lien avec un évènement ou un contexte qui pourrait en rendre compte.

Ce regard empirique sur le cours des marchés financiers donne donc l'impression qu'ils sont intrinsèquement instables et qu'ils ne traduisent que partiellement la réalité économique. Cette constatation va à l'encontre de la théorie financière dominante pour laquelle ces marchés reflètent une réalité sous-jacente, fondamentale, de façon fidèle : s'il ne se passe rien dans cette réalité sous-jacente, il ne devrait rien se passer non plus sur les marchés financiers.

1.2 Au-delà même des marchés financiers

Ce même type de constat semble se répéter quand on regarde plus généralement l'économie, la finance n'étant qu'un élément de cette dernière : un certain nombre de crises économiques sont sans causes plausibles, par exemple celle de 2008. À l'origine de cette crise, on évoque les subprimes, mais les subprimes sont un petit caillou dans les chaussures de l'économie américaine, petit caillou qui n'aurait pas dû conduire à une crise de la nature et de l'ampleur de celle observée. La figure 2 présente un indicateur d'un sentiment de risque, le TED spread. C'est une jauge de méfiance interbancaire, de la facilité avec laquelle les banques acceptent ou non de se prêter de l'argent. On y constate que cette jauge de méfiance a une explosion très rapide à l'automne 2008, explosion qui ne peut être associée de façon claire avec un évènement extérieur ; il y a bien sûr la chute de Lehmann Brothers, mais cette chute elle-même n'est que la suite d'évènements plutôt endogènes qu'exogènes.

On peut élargir la focale. Par exemple, si l'on analyse l'évolution de l'économie américaine depuis les années 50, on observe un taux de croissance de 3 % par an ; mais ce n'est qu'une moyenne, avec des fluctuations importantes, en fait du même ordre que

cette moyenne, $\pm 3\%$: d'une année sur l'autre l'économie s'emballe ou au contraire entre en récession, et souvent, à nouveau, pour des raisons qui ne sont pas comprises. Donc de la même façon que les marchés financiers, l'économie semble en prise à une agitation spontanée, de nature plus endogène qu'exogène.

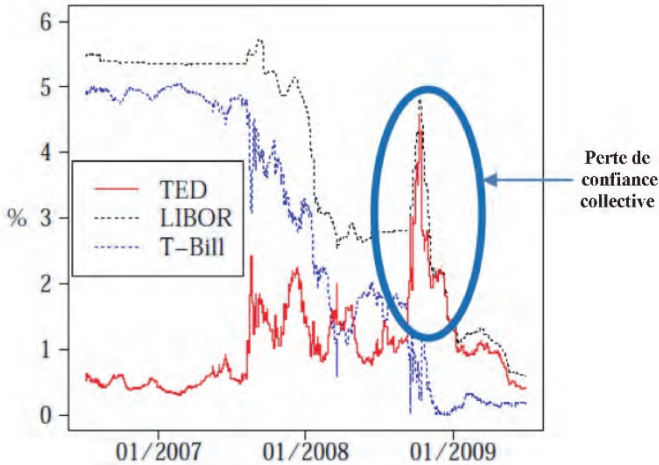


Figure 2. Crise de 2008 : évolutions comparées du TED (jauge de méfiance interbancaire), du LIBOR (London Interbaank Offered Rate) [2].

1.3 Des modèles en défaut ?

Le problème est que les modèles économiques traditionnels et toujours dominants partent d'une représentation de l'être humain dans laquelle les agents économiques se comportent d'une façon rationnelle. À partir d'un certain nombre d'hypothèses supplémentaires, on en arrive à l'idée que les marchés financiers sont « efficaces », c'est-à-dire toujours proches d'une « valeur fondamentale ». Cette valeur fondamentale, que l'on a du mal à définir, est censée cependant caractériser une réalité économique sous-jacente, les marchés ne faisant que révéler cette réalité sans l'affecter.

De la même façon, les économies sont censées être en permanence à l'équilibre, autour d'un point de fonctionnement optimal ; ce point de fonctionnement étant lui-même potentiellement déplacé par des chocs exogènes transitoires, les fluctuations économiques étant alors uniquement de nature exogène.

Il existe évidemment des chocs exogènes, la Covid en particulier est celle qu'on a actuellement tous en tête puisque récemment il y a eu une crise de cette nature ; il peut y avoir une catastrophe naturelle, un tremblement de terre à Tokyo par exemple, qui détruit des infrastructures et conduit réellement à une modification de l'équilibre économique. Mais dans un très grand nombre de cas, on a l'impression que l'économie fluctue même quand il ne se passe rien.

1.3.1 Des modèles classiques sur la défensive

Redisons-le cependant : le modèle des marchés efficaces est celui de nombre d'économistes ; citons par exemple Eugene Fama [3]. Autrement dit, pour lui, les marchés ont anticipé la crise économique qui arrivait indépendamment d'eux : ce n'est pas l'inverse, ce n'est pas la crise économique qui a été provoquée par la chute des marchés.

Autre exemple illustré par une citation de Robert Lucas, prix Nobel d'économie en 1993. En 2003, cinq ans avant la crise de 2008, alors que tout se passait bien, il peut affirmer que [4], la science économique est arrivée à maturité et elle a résolu le problème majeur qui est la prévention des dépressions... Si bien qu'en 2009 juste après la crise de 2008, il dédouane la théorie économique en affirmant que [5], *The 2008 crisis was not predicted because economic theory predicts that such events cannot be predicted*.

1.3.2 Le besoin de nouveaux modèles

Cette affirmation est cohérente : les marchés financiers censés refléter toute l'information disponible, savoir les prix, ne peuvent prédire ce qui n'est pas dans les prix ; on ne peut pas reprocher aux économistes de ne pas avoir prédit un événement que les marchés eux-mêmes n'ont pas prédit. Mais elle est symptomatique du problème d'une partie de la science économique ; elle souligne selon nous une déficience de la théorie elle-même : même si on ne peut pas prédire le moment de l'apparition de cette crise, la théorie doit pouvoir expliquer pourquoi, quels mécanismes endogènes sous-jacents rendent cette imprévisibilité possible : ces mécanismes devraient y être beaucoup mieux documentés, analysés, catalogués.

Le besoin d'avoir de nouveaux modèles de la survenue des crises financières et économiques a d'ailleurs bien été perçu, comme en attestent les deux citations suivantes. La première est une citation de Barak Obama qui, en janvier 2009, quelques mois après le déclenchement de la crise, faisait état de son incompréhension [6] : *Our workers are no less productive than when this crisis began. Our minds are no less inventive, our goods and services no less needed than they were last week*. Rien dans le monde "matériel" des forces productives n'a changé, et pourtant tout a changé. Comment est-ce possible ? L'autre citation est celle de Jean Claude Trichet, des paroles prononcées lors d'une conférence s'étant tenue à Francfort en 2010 [7] : *Models failed to predict the crisis and seemed incapable of explaining what was happening [...]. In the face of the crisis we felt abandoned by conventional tools*. Les modèles utilisés par les banques centrales n'avaient absolument rien à dire sur la crise de 2008 en train de se produire, et les outils des banquiers centraux semblaient inadaptés à la situation qu'ils voyaient se dérouler sous leurs yeux.

1.3.3 Les modèles classiques : une approche trop simplificatrice ?

Essayons donc d'analyser ce qui pêche dans les modèles classiques, et qu'une approche de physique statistique pourrait contribuer à corriger.

Il est naturel de décrire le fonctionnement de l'économie par l'interaction d'agents représentatifs, dont les comportements sont fixés à l'aide d'hypothèses simplificatrices. Mais l'approche classique simplifie énormément : pour condenser, disons qu'elle remplace la diversité des acteurs, soit celle des humains, des entreprises, des institutions par un tout petit nombre d'« agents » chacun d'eux représentant à lui seul toute une catégorie, par exemple le ménage moyen, la firme moyenne. Et chacun de ces agents représentant uniques d'une catégorie et censés être rationnels, calculant l'optimum de son intérêt présent et futur pour déterminer ses actions.

Or cette vision est excessivement simplificatrice. L'ensemble des acteurs est extrêmement hétérogène. Tous ces acteurs sont de plus très imparfaitement rationnels, soumis à des biais comportementaux et cognitifs très importants. Notre monde est hypercomplexe, et cette notion de rationalité est en fait difficile à définir, car on ne connaît pas l'avenir : on n'est pas capable d'attribuer une probabilité aux événements futurs, et il est même impossible de les lister ; tout peut survenir, c'est l'histoire des

cygnes noirs². Et surtout, caractéristique sur laquelle il faut insister, tous les acteurs sont en interaction forte les uns avec les autres : autrement dit : ce que vous faites va influencer mon action, et ce indépendamment de savoir si cette action est rationnelle ou non. Ces influences mutuelles entre agents hétérogènes peuvent conduire à des effets inattendus et parfois considérables.

2. De l'individu au Collectif. Du microscopique au macroscopique

Le collectif n'est pas qu'un ensemble d'individus. Une idée qui en physique est très bien documentée. Il est utile de rappeler ici un passage d'un article célèbre (*More is different* [8]) de Phil Warren Anderson, prix Nobel de physique en 1977³ : *The behavior of large assemblies of interacting individuals (particles) cannot be understood as a simple extrapolation of the properties of isolated individuals (particles). Instead, entirely new, unanticipated behaviors may appear and their understanding requires new ideas and methods.*

2.1 Dans le monde du Vivant

Un des exemples bien connus illustrant cette affirmation est le vol d'étourneaux, représenté en figure 3. Ces étourneaux qui individuellement volent très mal, arrivent collectivement à former une espèce de super organisme, de « super oiseau », dont un des buts est de faire peur aux rapaces qui pourraient les attaquer.

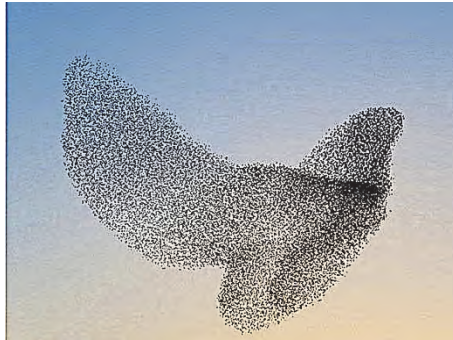


Figure 3. Image d'un vol d'étourneaux [Pinterest].

De grandes populations de lucioles qui flashent de façon synchronisée constituent un autre exemple. Un phénomène très spectaculaire, comme le mentionne le mathématicien Steven Strogatz dans l'un de ses ouvrages⁴ : « *For 300 years, Western*

² Le cygne noir, la puissance de l'imprévisible (Nassim Taleb), une théorie selon laquelle on appelle *cygne noir* un certain événement imprévisible qui a une faible probabilité de se dérouler (appelé « événement rare » en théorie des probabilités) et qui, s'il se réalise, a des conséquences d'une portée considérable et exceptionnelle.

³ Avec Nevill Mott et John Hasbrouck van Vleck, pour leurs travaux sur la structure électronique des systèmes magnétiques et désordonnés

⁴ Sync : The Emerging Science of Spontaneous Order, Steven Strogatz, Hyperion, 2003, 338p

travelers to Southeast Asia have been returning with tales of enormous congregations of fireflies blinking on and off in unison, in displays that stretched for miles along the riverbanks... How could thousands of fireflies orchestrate their flashing so precisely and on such vast scales? For decades, no one could come up with a plausible theory. A few believed there must be a maestro, a firefly that cues all the rest. Only by the late 60's did the pieces of the puzzle begin to fall into place... ».

Comment ces synchronisations à grande échelle peuvent-elles se mettre en place, à moins que ce ne soit qu'un effet subjectif s'imprimant dans le cerveau de l'observateur, ou bien qu'il y ait un « chef d'orchestre » sur lequel tous les individus se règlent dans leur comportement ? Toutes ces explications auxquelles certains ont pensé sont fausses, il s'agit bien d'une coordination totalement décentralisée.

Mais il y a bien d'autres exemples. Le fonctionnement de notre cerveau, et notamment la mémoire, la conscience, sont le résultat de phénomènes collectifs liés aux interconnexions entre neurones. De façon plus proche de ce qui nous intéresse ici, car concernant des collectifs d'humains, figurent l'émergence de la « Ola » dans les stades, les mouvements de foule et les paniques, les retournements d'opinions, les crises.

2.2 En physique

La physique statistique a acquis sur les phénomènes collectifs de son propre domaine, au cours du XX^e siècle, un regard très précis. Elle permet de comprendre que des effets collectifs surprenants peuvent apparaître à partir de briques élémentaires banales en interaction. L'exemple canonique est celui de l'eau qui devient glace. Phénomène bien connu, mais dont on a tendance à oublier qu'il est tout de même, en un sens, miraculeux ; car ce sont les mêmes molécules H₂O qui, quand on passe de 0° Celsius + à 0° Celsius – passent d'un collectif qui est bleu et liquide au-dessus de 0° Celsius à un collectif blanc et solide au-dessous. Alors que rien ne change au niveau des objets élémentaires, tout se passe au niveau de leurs interactions. Un tel *diagramme de phase* est commun à une grande partie des substances. Il sépare plusieurs phases liées à des états collectifs différents qui se transforment les uns dans les autres autour de lignes de transition. Il existe en physique un grand nombre de domaines sièges de tels effets collectifs : le magnétisme, la supraconductivité, même la rigidité des corps solides – le fait qu'appuyer sur une table ne la fait pas s'effondrer⁵.

2.3 Des mécanismes communs

L'idée à laquelle les physiciens en sont venus est que tous ces phénomènes collectifs, biologiques, sociaux ou physiques se produisent par des mécanismes similaires et donc que les mêmes approches, celles de la physique statistique, peuvent être utilisées pour en rendre compte, en notant que quel que soit le domaine concerné, le passage du microscopique au macroscopique est absolument non trivial ; il peut y avoir des objets microscopiques très simples qui engendrent une réalité macroscopique extrêmement complexe, mais aussi, à l'inverse, des objets microscopiques compliqués qui au niveau macroscopique se comportent collectivement de façon très simple. Pour résumer, il y a une déconnexion entre la complexité microscopique et la complexité macroscopique.

⁵ Phénomène collectif qui n'a rien d'évident et sur lequel Phil Warren Anderson avait beaucoup réfléchi.

En économie, puisqu'il va s'agir ici d'économie, il existe ainsi des modèles où les agents sont tous rationnels, mais dont le collectif, *i.e.* le comportement collectif, pourra être qualifié de totalement irrationnel, n'appartenir à aucun agent rationnel digne de ce nom. Inversement, il peut exister des agents irrationnels se comportant collectivement de façon rationnelle. C'est d'ailleurs cette possibilité qui permet à certains économistes de continuer à défendre le modèle de l'agent rationnel en affirmant oui, c'est vrai, au niveau individuel nous ne sommes pas rationnels, mais au niveau collectif tout se passe « comme si » nous l'étions.

3. Les interactions, base de l'émergence d'un collectif

Le caractère de phénomènes sociaux humains accessible par des méthodes de la physique est encore illustré par l'analyse des dynamiques de foules qui manifestent une transsubstantiation de l'individu dans la masse, de la disparition de l'individu dans le collectif.

Une foule peut ainsi devenir tellement dense qu'elle va former, de façon très impressionnante, un corps élastique : les individus perdent leur autonomie, et interagissent de façon involontaire, mais extrêmement forte avec leurs voisins : ils sont comprimés par leurs voisins et l'ensemble de ces corps comprimés les uns sur les autres se comporte comme un milieu élastique cohérent. Et ce milieu élastique peut être parcouru par des ondes de pression propageant de proche en proche. Ces ondes de pression peuvent être meurtrières : elles compriment les corps avec une telle puissance que les gens étouffent et meurent. Ce sont bien au départ des mouvements individuels aléatoires qui créent ces ondes, mais ces ondes de pression une fois créées n'appartiennent plus à aucun individu. Aucun d'entre eux ne peut plus avoir d'influence sur le corps collectif dans son ensemble. De nombreuses études ont été faites sur l'émergence d'ondes de pression dans de tels contextes et sur la mesure de leur force. Par exemple celle de Dirk Helbing et al. en 2007 [9].

Toujours dans la perspective d'un rapprochement avec la physique, les phénomènes ferro-magnétiques apportent également des pistes de réflexion. Ce qui se passe dans ces phénomènes, est bien connu : chaque aimant élémentaire interagit avec ses voisins, en ayant tendance à imposer sa propre direction. Il s'en suit l'apparition de corps aimantés, c'est-à-dire de régions où tous les aimants élémentaires pointent dans la même direction.

Un tel mécanisme est universel : c'est dans l'interaction avec les « voisins », entendu au sens large, que réside souvent la clé de la mise en place d'un ordre macroscopique, collectif. Ainsi pour les nuées d'oiseaux ou les bancs de poissons, l'existence d'une boucle de rétroaction, en gros « j'imité ceux qui vont m'imiter ». Chaque poisson tend à nager dans la même direction que ses voisins, qui eux-mêmes s'orientent en observant leurs voisins, dont ce poisson fait partie. Si la situation est telle que la force des interactions au sein de cette boucle est faible, alors aucun ne s'influence vraiment, chacun agit comme il le souhaite et le collectif agit sans cohérence d'ensemble. Si au contraire les interactions sont suffisamment fortes, si chacun influence ses voisins qui eux-mêmes influencent leurs voisins, etc., tout se passe comme s'il existait des influences à longue portée – entre spins, poissons, oiseaux, lucioles, etc., structurant un ensemble d'actions cohérentes extrêmement étendu. Entre ces deux types de comportement collectif, entre ces deux « phases », il existe en général une frontière

nette qui les sépare, caractérisable en termes de paramètres. Le « diagramme de phase » bien connu en physique des transitions solide/liquide/gaz (cf. figure 4), dessine ces frontières dans l'espace des paramètres et constitue ainsi un outil essentiel pour caractériser un collectif.

3.1 Une interaction simple : l'imitation

Pour en revenir maintenant aux êtres humains, et à l'objet d'étude de la science économique, il est nécessaire de rappeler un fait essentiel : les êtres humains sont des animaux sociaux avec une forte propension à s'imiter les uns les autres. Ainsi le grand mathématicien Henri Poincaré pouvait-il écrire : *Quand des hommes sont rapprochés, ils ne décident plus au hasard et indépendamment les uns des autres ; ils réagissent les uns sur les autres. Des causes multiples entrent en action, elles troublent les hommes, les entraînent à droite et à gauche, mais il y a une chose qu'elles ne peuvent détruire, ce sont leurs habitudes de moutons de Panurge.*

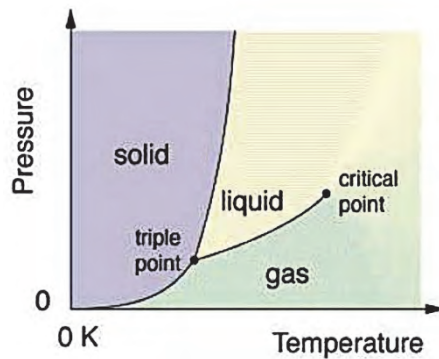


Figure 4. Exemple d'un diagramme de phase, le diagramme Solide/Liquide/Gaz [12].

Si l'on suppose que les agents individuels sont rationnels et qu'ils prennent leurs décisions sans prendre en compte ce que font les autres, on peut imaginer qu'à l'échelle agrégée les erreurs individuelles se compensent et s'annulent globalement. Si au contraire leurs rapports sont pris dans des interactions les conduisant à s'imiter systématiquement les uns les autres, les erreurs ne vont pas se compenser, elles vont au contraire s'additionner et conduire à des comportements collectifs qui peuvent être inattendus.

Il existe de nombreux exemples qui illustrent parfois jusqu'à la caricature cette tendance aux comportements panurgiques, cette attirance très forte pour imiter ce que font les autres, cette envie de faire partie d'une foule, cet emballement de l'imitation : l'affaire des cadenas d'amour du pont des arts à Paris. En quelques semaines à peine, de façon très impressionnante, le pont est passé d'un état où il n'y avait quasiment aucun cadenas à un état où il en était couvert. Si bien que la puissance publique a dû intervenir pour des raisons de sécurité, en enlevant les grillages qui leur servaient de lieu d'accrochage. Ou encore l'explosion du nombre de petites filles appelées « Stéphanie » suite à la naissance en 1965 d'une Stéphanie princesse de Monaco.

3.2 La contagion de pensées similaires ; l'exemple de la perte de confiance

Il y a aussi les paniques bancaires : à partir du moment où les gens se mettent à penser que les autres vont récupérer leur argent avant eux, ils vont essayer d'y aller avant ; la panique va se déclencher et les images peuvent être très spectaculaires, comme sur la figure 5. Même s'il n'y a aucune raison pour que la banque fasse défaut, il suffit que les gens soient convaincus que cette banque puisse faire défaut pour qu'en effet des foules se massent devant et conduisent la banque à la faillite.



Figure 5. Image d'une panique bancaire [Berlin, 13/07/1931- Bundesarchiv/Georg Pahl/CC-BY-SA. Wikimedia Commons].

En 2008, que s'est-il vraiment passé ? Qu'exprime la figure 2 donnée au début de ce chapitre ? Notre hypothèse, qui a été aussi celle d'économistes comme Ben Bernanke, président de la FED à l'époque [10], est celle-ci. Peut-être que le système bancaire n'était pas intrinsèquement si fragile que l'on a pu l'imaginer. Mais qu'est apparue une situation où personne ne savait ce qui se passait, ou encore que tout le monde imaginait qu'il se passait quelque chose. Plus précisément peut-être, je ne perds pas confiance pour une raison particulière, je perds confiance car je pense que tu perds confiance ; la perte de confiance se fait de façon autoentretenue, la confiance collective peut être détruite en quelques heures. Notre hypothèse est bien que ce phénomène de perte de confiance n'est dû à rien de matériel, rien n'a besoin d'être détruit matériellement pour que la confiance apparaisse ou disparaisse.

Ce phénomène de perte de confiance autoentretenue peut conduire à des extrêmes difficiles à concevoir en temps normal et pourtant bien connus : les processus d'hyperinflation, l'effondrement des assignats pendant la Révolution Française, celui du Mark allemand dans les années 1920, ou le sort de la monnaie du Zimbabwe de 2000 à 2009.

4. Simuler numériquement les dynamiques collectives possibles

Comment donc appréhender ces phénomènes collectifs, alors qu'ils sont souvent inattendus, voir totalement contre-intuitifs, que l'on n'aurait pas pu les imaginer avant qu'une expérience ne les révèle. Existe-t-il des méthodes pouvant se substituer à l'expérience et permettant d'anticiper ce qui peut se produire ? La réponse à cette question est la simulation numérique en modélisation économique, ainsi que le rappelait en 2008 Marc Buchanan, journaliste scientifique au New York Times, juste après le déclenchement de la crise : en substance, *la simulation numérique est l'équivalent, pour notre imagination, du télescope pour notre vision : elle permet d'entrevoir des « cygnes noirs »*. L'appel par ce journaliste à l'analogie du télescope se rattache au fait qu'avant que Galilée n'ait perfectionné sa lunette, dans le contexte de l'époque il était quasi-impossible d'imaginer ce qu'il allait observer.

4.1 Les simulations multi-agents

Quand on parle de simulation numérique, il s'agit ici de simulation multi-agents⁶. Création et mise en œuvre au sein d'un ordinateur d'un monde virtuel d'agents interagissants, monde représentant des éléments simples de la réalité et la manière dont ils agissent les uns sur les autres. Un exemple montre bien ce dont il s'agit, et aussi comment un procédé contre-intuitif peut s'avérer efficace. C'est la simulation de la manière dont un certain espace peut se vider de ses occupants (figure 6), que ce soit un silo rempli de grains de sable ou une grande place de manifestants. Les simulations montrent la formation de « voûtes » aux sorties (figure 6 A) : les grains (ou les personnes, c'est le même processus) se bloquent les uns les autres, chacun « voulant » sortir en même temps. Alors qu'un obstacle placé devant la sortie (figures 6 B et C) va organiser le flux autour de lui et faire en sorte que le blocage soit évité.

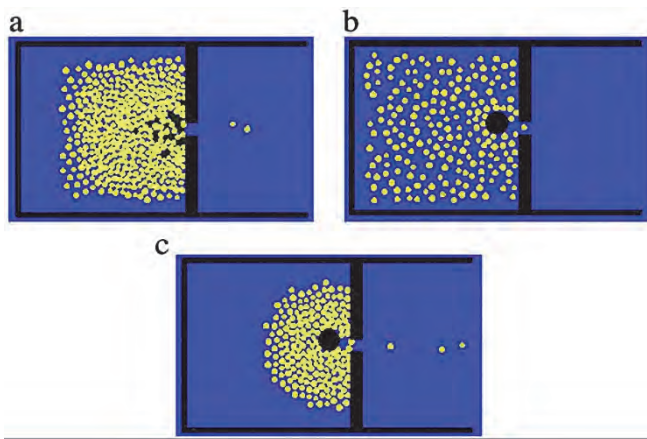


Figure 6. Simulation de mouvements d'une foule voulant sortir d'urgence d'un certain espace [18].

⁶ Agents-based simulations, particles-based simulations, cellular automatas... il existe différentes expressions plus ou moins équivalentes variant selon le domaine concerné, physique statistique, comportement des matériaux, flux routiers, proliférations bactériennes, propagations d'épidémie, dynamiques d'opinion, etc.

Pour revenir à l'économie, un des premiers modèles d'agents a été développé par Thomas Schelling, un économiste conscient des problèmes liés au passage du microscopique au macroscopique, de la micro-économie des décisions individuelles à la macro-économie. Il a essayé d'expliquer les phénomènes de ségrégation dans les villes. Une adaptation de son modèle très simple [11] met en œuvre des agents qui souhaitent habiter dans des quartiers ni trop denses, ni trop vides, et prennent leurs décisions de changement de résidence et d'emménagement en rapport avec cette « fonction d'utilité » (disons marquant la préférence pour un quartier à demi-rempli), dans une situation où il y a suffisamment de place dans la ville pour que l'optimum pour chacun puisse matériellement être réalisé. La simulation montre que le système évolue sur le long terme vers une sorte d'équilibre qui n'est pas du tout l'optimal désiré : il y a toujours des quartiers complètement vides et des quartiers surchargés. Il y a déconnexion – c'est ce que Schelling cherchait à montrer – entre ce que veulent les individus et ce qui se passe à l'échelon collectif. On peut reformuler ce modèle de Schelling en termes de physique statistique : des physiciens l'ont bien montré : ce qui se passe est équivalent à la transition liquide gaz évoquée précédemment.

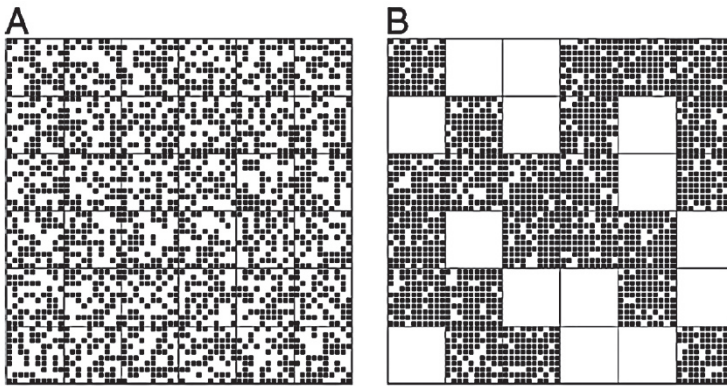


Figure 7. Le modèle de Grauwint et al. Adaptation du modèle de Schelling, avec des agents dont la fonction de satisfaction résidentielle individuelle est maximale lorsque leur quartier est à moitié plein. Lorsque les agents prennent leurs décisions de changement de résidence uniquement sur la base de cette fonction d'utilité, assortie d'un léger aléa, la dynamique conduit inexorablement la ville de la configuration gauche (A), celle qui est ou proche d'être celle de l'optimum collectif, à la configuration droite (B), qui est au contraire une configuration très insatisfaisante. La simplicité du modèle permet aux auteurs de faire des calculs de probabilité sur les diverses configurations possibles et de montrer que la configuration A est un équilibre (de Nash) instable [10].

La théorie d'Adam Smith posait que les acteurs économiques, en suivant leur intérêt propre, produisait une société collectivement optimale. C'est la théorie de la « main invisible » du marché. L'exemple précédent montre que laisser les gens faire ce qu'ils veulent peut aboutir à des configurations sociales non-optimale : la « main invisible » est alors en défaut. Mais l'exemple de Schelling s'inscrit dans un contexte très spécifique. Revenons maintenant au problème posé au début de ce chapitre, comment évaluer la possibilité de crises économiques endogènes ? Qu'apporte l'approche agent à la résolution de ce problème ? Pour y répondre, nous avons donc construit un modèle prototype qui, sans pouvoir rivaliser encore avec les modèles se voulant prédictifs utilisés par les économistes, ouvre déjà des pistes.

4.2 Un modèle d'agents montrant la possibilité de crises économiques endogènes

Pour explorer la possibilité de crises économiques endogènes et les mécanismes qui peuvent y conduire, notre équipe a développé un modèle multi-agents en plusieurs versions, *Mark 1*, *Mark 1+* [12]. La version simplifiée, *Mark 0*, est déjà très instructive. Ces modèles comportent trois types d'agents, les entreprises, les ménages et une Banque centrale⁷. Cette dernière gère les encours des entreprises et des ménages, accepte sous réserve les endettements éventuels des entreprises et fixe le taux d'intérêt. Contrairement à ce que suppose la théorie classique, ces agents ne sont pas « rationnels » au sens où ils agiraient en fonction d'un calcul d'une optimisation à long terme. Ce qui les guide dans leurs décisions sont des règles heuristiques, simples et plausibles qui peuvent être critiquées comme étant *ad hoc*, mais ce choix est assumé.

Les entreprises ajustent leur main-d'œuvre, leur production, leurs prix, leurs salaires, par rapport au chiffre d'affaires réalisé. Si par exemple elles constatent que l'offre est supérieure à la demande, elles vont réduire leur offre, baisser leurs prix, etc. Face à cette nécessité d'ajuster leur production, elles embauchent ou au contraire licencient. Le modèle va être caractérisé par un certain nombre de paramètres. Un de ces paramètres est le rapport, notons le R , entre la propension à embaucher, et la propension à licencier, toutes choses étant égales par ailleurs. $R > 1$ signifie que les entreprises embauchent plus facilement, ou plus vite qu'elles ne licencient, du fait par exemple de l'existence d'un frein au licenciement. D'autres paramètres interviennent dans leur existence ; parmi ceux qui s'avèrent décisifs dans la dynamique du modèle figure un seuil de fragilité bancaire, à partir duquel la Banque centrale ne leur fait plus confiance et donc à partir duquel elles font faillite : savoir lorsque leur endettement dépasse un certain multiple M de la masse salariale (ou de leur chiffre d'affaires). Ces faillites ouvrent plusieurs possibilités, une possibilité de rachat par une autre entreprise « saine », une disparition pure et simple, ou la création d'une nouvelle entreprise. Ces possibilités sont contrôlées par différents paramètres de probabilité. Leur mise en œuvre effective dépend de l'état général de l'économie lui-même (la fragilité financière des autres entreprises, notamment), la Banque Centrale assurant les transferts financiers impliqués (répartition de la dette et de l'éventuel refinancement entre les firmes et les ménages) selon des règles déterminées.

Les ménages consomment une fraction c de leur ressource, somme de leur salaire et de leur épargne du moment. Leur comportement d'achat est également réglé par des heuristiques, comme par exemple celle où ils s'adressent préférentiellement aux entreprises les moins chères.

Les simulations conduites sur ce modèle, avec différentes valeurs des paramètres, permettent de construire un diagramme de phase à l'image de ceux de la physique. On s'aperçoit en effet que beaucoup de changements peuvent être apportés au niveau microscopique, au détail des règles du jeu et aux valeurs des paramètres (cf. figure 8) sans qu'ils entraînent de changement qualitatif dans la dynamique macroscopique de

⁷ Dans le prototype Mark 0, seules les entreprises sont différenciées en une multitude d'agents. Les ménages sont regroupés en un agent unique, raison pour laquelle les auteurs qualifient leur modèle d'« hybride ». L'agent « Banque centrale » n'y existe que de façon virtuelle, à travers les règles assurant la conservation de la masse monétaire et régissant le financement des dettes des entreprises et la gestion des faillites. Mais cela ne change rien à la nature des conclusions.

l'économie, autrement dit sans changer le diagramme de phase. Ce dernier est très robuste par rapport à ces règles, c'est ce que l'on peut appeler le « miracle » de l'émergence.

Le diagramme de ce modèle prototype mobilise deux paramètres déterminants : la facilité de licenciement (par rapport à l'embauche) R et le taux permis d'endettement (par rapport au chiffre d'affaires M). Il met en évidence, dans ce plan $[R, M]$, quatre phases (figure 8) :

- $R < 1$, une phase d'effondrement : il est plus facile (ou moins coûteux) de licencier que d'embaucher, des firmes licencient, mettant les gens au chômage, les ménages concernés ne peuvent plus consommer, les firmes continuent à devoir licencier, une boucle négative se met en place et le niveau de chômage atteint rapidement 100 %.
- $R > 1$, avec un taux d'endettement permis M suffisamment élevé : les firmes au contraire embauchent plus vite qu'elles ne licencient et comme elles ont le droit de s'endetter, elles s'endettent, investissent et s'améliorent, refont de l'argent, une boucle positive s'instaure, conduisant au plein emploi.
- $R > 1$, mais avec un taux d'endettement permis M faible : certaines entreprises disparaissent avant d'être remplacées par de nouvelles et se met en place un niveau de chômage résiduel.
- Enfin $R > 1$, mais avec un taux d'endettement permis M ni trop faible, ni trop grand. Cette quatrième phase est une vraie surprise : il a fallu s'assurer que ce n'était pas un défaut du code, mais un phénomène en conséquence réelle des heuristiques de comportement en place. C'est une phase de *crises endogènes* : s'y succèdent des périodes où l'économie va bien, le niveau de chômage est très bas, séparées par des baisses brutales d'activité et des pics de chômage. Rien pourtant ne provoque de l'extérieur – par exemple d'un agent ad hoc qui simulerait des événements particuliers – de telles crises régulières. Une dynamique de l'économie que l'on ne pouvait réellement prévoir avant de la constater sur la simulation.

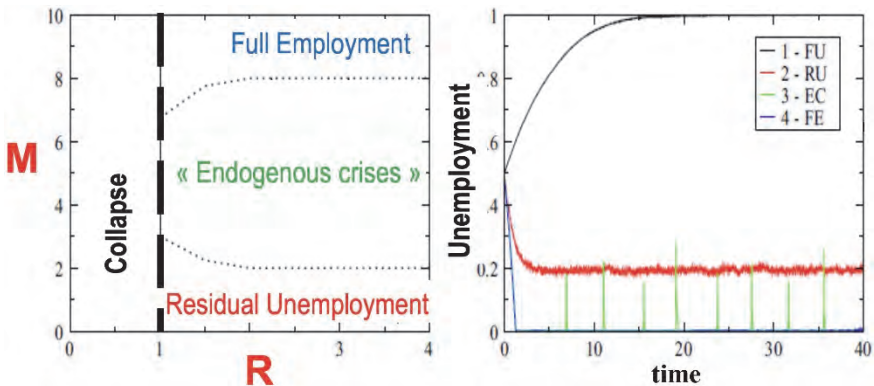


Figure 8. Diagramme de phase du modèle Mark 0 et dynamique de l'emploi global dans les quatre phases identifiées [19].

Alors, comment interpréter – *a posteriori* – ce qui se passe dans cette répétition de séquences activité/chômage ? Le cœur du phénomène réside dans les règles de gestion des faillites, sans cependant que les valeurs de leurs paramètres, qui régissent la répartition de la charge entre les autres entreprises et les ménages, changent vraiment les choses. C'est bien la fragilisation soit des ménages soit des autres entreprises par la

faillite de l'une d'entre elles qui est en cause et qui instaure une boucle de rétroaction négative. Dans cette phase de crises endogènes, cette boucle négative va déclencher une avalanche de faillites, laquelle va être suivie d'une vague de nouvelles créations d'entreprises.

Ces alternances peuvent être plus précisément comprises par un modèle sous-jacent : un modèle simplifié, mais analytique, de cette réalité virtuelle produite par la simulation multi-agents. À l'image des modèles mathématiques de synchronisation introduits par Kuramoto [13, 14] et appliqués notamment aux réseaux de neurones dans le cerveau, ou encore aux lucioles. Ce modèle analytique rend bien compte des oscillations observées en reproduisant exactement ces vagues de faillites synchronisées.

Ce qu'il faut retenir ici, c'est qu'il s'agit d'une situation générique ; dans des états hors équilibre au sein de réseaux, tels ici les réseaux de firmes, des dynamiques propres à chaque nœud peuvent se synchroniser, conduisant à des effets de crises sans cause, qui sont complètement absentes des modèles économiques traditionnels où les économies sont à l'équilibre et où rien ne peut se passer de façon spontanée.

Les modèles classiques ont aussi pu être mis en question par les conséquences économiques observées de la crise de la Covid. Prenons comme exemple les modèles DSGE, qui font l'hypothèse de l'existence d'un seul équilibre. Ce qu'ils prévoient, lorsqu'une telle perturbation externe et temporaire apparaît, c'est une baisse simultanée de l'offre et de la demande, et donc une chute du PIB, suivie cependant d'un retour plus ou moins rapide à l'équilibre initial. Certes, en fonction de l'amplitude de la chute initiale, la dynamique du retour « à la normale » est différente, mais à terme, une fois la perturbation passée, la situation de départ se rétablit.

Les modèles d'agents ouvrent plus largement le champ des dynamiques possibles, en admettant l'existence d'équilibres multiples [15]. Le même modèle peut prévoir le retour à l'état d'avant (dynamique en « U »), ou bien une reprise dite en « L » où l'économie ne revient pas à l'état initial, mais se stabilise autour d'un nouvel état d'équilibre. Ce nouvel équilibre préexistait dans le modèle comme état possible, comme état « latent », de la même manière que l'état liquide et l'état solide peuvent co-exister dans un modèle microscopique du comportement des molécules d'eau.

5. Conclusion/Perspectives

Nous croyons fermement que l'établissement du diagramme de phase des ABM est une première étape cruciale, ainsi qu'une compréhension qualitative de la manière dont les phénomènes collectifs se produisent, avant toute tentative d'étalonnage ou de prédictions plus quantitatives.

Les expériences de pensée assistées par ordinateur ont en elles-mêmes une valeur réelle : si nous ne sommes pas capables de donner un sens aux phénomènes émergents dans un monde dont nous fixons toutes les règles, comment pouvons-nous espérer réussir dans le monde réel ? Les ABM révèlent en effet souvent l'existence de cygnes noirs, c'est-à-dire de lignes de discontinuité au-delà desquelles des instabilités apparaissent, alors que la plupart des modèles économiques/financiers classiques sont aveugles à de tels scénarios.

Tester la robustesse globale du diagramme de phase par rapport aux changements de règles heuristiques est un moyen de s'assurer de la plausibilité de tels scénarios. En outre, l'exploration des diagrammes de phase des ABM en haute dimension devrait bénéficier énormément de l'identification des directions dites « rigides » dans l'espace des paramètres, en suivant la méthodologie suggérée par Sethna, voir [16,17].

Une approche qualitative basée sur des scénarios est souvent le mieux que l'on puisse faire lorsqu'il s'agit de systèmes complexes, sauf pour les prédictions à relativement court terme.

Une telle approche est toujours utile pour aider à la construction d'une intuition fidèle et de récits inspirants décrivant les mécanismes pertinents. Ceux-ci ne sont souvent même pas présents dans les modèles DSGE – par exemple, comment peut-on réellement décrire la dynamique de l'inflation lorsque les marchés sont toujours à l'équilibre et que la négociation salariale et le pouvoir de marché sont absents ?

En effet, les scénarios potentiellement catastrophiques (comme l'hyperinflation ou la contagion de faillites) devraient être au centre des préoccupations des décideurs politiques et des gestionnaires de risques, plutôt que de calibrer un mauvais modèle à la deuxième décimale. Comme Keynes l'a souligné il y a longtemps, il vaut mieux avoir à peu près raison que précisément tort.

Références

- [1] Bone, James. "The beginner's guide to stock markets". *The Times. London*. Archivé de l'original le Mai 25, 2010. Imprimé le janvier 29, 2012.
- [2] Baily, Martin Neil ; Elliott, Douglas J. (Juin 15, 2009). *"The U.S. Financial and Economic Crisis: Where Does It Stand and Where Do We Go From Here?"*. Brookings Institution.
- [3] NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2024. Fri. 11 Oct 2024. <https://www.nobelprize.org/prizes/economic-sciences/2013/fama/facts/>
- [4] Lucas R., *Macroeconomics Priorities*. Presidential Address fait au "One-hundred fifteenth meeting de la American Economic Association", janvier 4, 2003, Washington, DC.
- [5] Lucas R., World Economic Forum. *Could the 2008 financial crisis have been predicted and avoided?* 7 Nov 2018.
- [6] Obama B., President Barack Obama's Inaugural Address 21 1 2009, The White House.
- [7] Trichet J.-P., European Central Bank, Président. "Reflections on the nature of monetary policy non-standard measures and financial theory"
<https://www.ecb.europa.eu/press/key/date/2010/html/sp101118.en.html>
- [8] Anderson, P. W. More is different. *Science* **177**, 393-396 (1972).
- [9] Helbing, D., Johanson A., Al-Abideen, H. Dynamics of crowd disaster: An empirical study *Phys. Rev. E* **75**, 046109 (2007).
- [10] Bernanke, B. S., Geithner, T. F., & Paulson Jr, H. M. (2019). *Firefighting: the financial crisis and its lessons*. Penguin.
- [11] Grauwin, S., Bertin, E., Lemoy, R., Jensen, P., Competition between collective and

individual dynamics *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2009 Dec 8;106(49):20622-6. doi: 10.1073/pnas.0906263106. Epub 2009 Nov 23.

[12] Gualdi, S., Tarzia, M., Zamponi, F., Bouchaud, J.-P., Tipping points in macroeconomic Agent-Based models, *Journal of Economics Dynamics and Control* **50**, 29-61 (2015).

[13] Kuramoto, Yoshiki (1975). H. Araki (ed.). *Lecture Notes in Physics, International Symposium on Mathematical Problems in Theoretical Physics*. Vol. 39. Springer-Verlag, New York. p. 420.

[14] Gualdi, S., Bouchaud, J. P., Cencetti, G., Tarzia, M., & Zamponi, F. (2015). Endogenous crisis waves: stochastic model with synchronized collective behavior. *Physical review letters*, *114*(8), 088701.

[15] Sharma, D., Bouchaud, J. P., Gualdi, S., Tarzia, M., & Zamponi, F. (2021). V-, U-, L-or W-shaped economic recovery after Covid-19: Insights from an Agent Based Model. *PloS one*, *16*(3), e0247823.

[16] Quinn, K. N., Abbott, M. C., Transtrum, M. K., Machta, B. B., & Sethna, J. P. (2022). Information geometry for multiparameter models: New perspectives on the origin of simplicity. *Reports on Progress in Physics*, *86*(3), 035901.

[17] Naumann-Woleske, K., Knicker, M. S., Benzaquen, M. & Bouchaud, J. P. (2022). Exploration of the Parameter Space in Macroeconomic Models. *Handbook of Complexity Economics*.

[18] Bonabeau E. (2002) Agent-Based Modeling : Methodes and techniques for simulating human systems. *PNAS* 99(3).

[19] Bouchaud J.P. (2021) De la physique statistique aux Sciences sociales, "Equilibre général" vs. "Modèles d'agents" Cours Collège de France.

https://www.college-de-france.fr/media/jean-philippe-bouchaud/UPL993303874527415782_Bouchaud_CDF_cours5.pdf

La théorie mathématique de la viabilité au service de la gestion durable

Isabelle Alvarez

Mathématiques et Informatique Appliquées – Paris Saclay, INRAE
Institut des Systèmes Complexes Paris-Ile de France

Abstract

Mathematical Viability theory (Aubin, 1991) studies the compatibility between a dynamical system and a set of constraints. In this framework it is possible to define concepts related to sustainability, such as robustness or resilience, and to study the relation between them. Regarding the modeling of sustainability problems in this framework, it allows to avoid trade-off between short- and long-term issues, or between various dimensions of sustainability. Even though it is linked to optimal control and set-valued analysis, viability theory proposes a change of perspective with respect to optimization. Before asking questions in terms of objective to be optimized, we are interested in the definition of desirable states and admissible means to maintain the system there. Viability theory studies the consequences for the evolution of the system. Several examples are presented to explain the interest of the approach beyond the mathematical theory itself.

1 Viabilité et durabilité en quelques mots

1.1 Qu'est-ce que la « durabilité » ?

L'expression « développement durable » du rapport Brundtland [1] était nouvelle : « le développement durable est un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». Mais la préoccupation ne l'était pas vraiment. Le club de Rome avait déjà produit en 1972 un rapport sur les limites à la croissance (Rapport Meadows [2]), qui pointait le problème d'une croissance économique qui croît encore plus rapidement que la croissance démographique et exponentiellement dans un monde fini. Mais le souci de la « durabilité » n'est pas l'apanage de notre époque. Dans son *Histoire Naturelle*, Pliny l'ancien s'interroge sur l'épuisement de la terre en ressources métalliques¹ et sur les ravages que l'avidité inflige à la terre. Il ne s'agit pas d'une critique de l'enrichissement en soi, mais de l'appât du gain, de la démesure et de ses conséquences. En France, on peut citer l'ordonnance de Brunoy de 1346, promulguée par Philippe VI de Valois, roi de France : « Les maîtres des eaux et forêts enquerront et visiteront toutes les forez et bois et feront les ventes qui y sont,

¹ « Nous suivons toutes les veines de la terre, et, vivant sur les excavations que nous avons faites, nous nous étonnons que parfois elle s'entrouvre ou qu'elle tremble ! (...) En se laissant aller à l'imagination, que l'on calcule combien il faudra de siècles pour mettre fin à ces travaux qui l'épuisent, et jusqu'où pénétrera notre cupidité ! » [3].

en regard de ce que lesdites forez se puissent perpétuellement soustenir en bon estat » [4]. Il apparaît aussi que la préoccupation de l'environnement et de sa restauration est possible même en période de crise et quand le dommage est inévitable. La défense de Paris pendant la guerre de 14-18 en donne une illustration. La réalisation de tranchées nécessitait des coupes dans la forêt de Sénart. Le général commandant le Grand Paris a demandé aux agents des Eaux et Forêts de venir identifier les arbres à préserver de manière que la forêt puisse se reconstituer après la guerre [5]. Cette démarche a été couronnée de succès puisqu'il a fallu un travail d'archéologie pour identifier les talus traversant certaines zones de la forêt comme étant les vestiges des tranchées de 1915 [6].

Ces exemples nous montrent que la préoccupation de « durabilité » n'est pas récente et n'est pas liée à un état d'abondance, mais plutôt à l'analyse et à la volonté des acteurs. Toutefois, depuis 1987, la notion est très présente. Le développement « durable » comprend des contraintes de long terme pour l'économie, l'environnement et la société.

1.2 Qu'est-ce que la théorie mathématique de la viabilité ?

La théorie mathématique de la viabilité a été proposée par J.-P. Aubin [7] dans les années 1990, pour rendre compte de la compatibilité intrinsèque entre un système dynamique et un ensemble de contraintes dans l'espace d'état. Cette approche se veut en rupture avec l'optimisation intertemporelle. Dans l'épigraphie de son livre, Aubin souligne que le choix des critères de l'optimisation intertemporelle doit nous amener à nous interroger (les critères étant nécessairement subjectifs). Partant du constat que pour un système dynamique, toutes les évolutions ne sont pas possibles ou souhaitables, Aubin considère que l'état du système doit obéir à des contraintes : les contraintes de viabilité. L'objectif de la théorie de la viabilité est de permettre la sélection d'évolutions viables, qui vérifient ces contraintes à chaque instant.

En tant que théorie mathématique, la viabilité fait suite à des travaux réalisés dans les années 1990 en contrôle optimal, théorie des correspondances et systèmes non linéaires. L'originalité repose sur la définition de contraintes de viabilité, la vérification des contraintes en temps infini et sur des stratégies viables générales. De plus, l'accent est mis sur des hypothèses de travail les plus faibles possibles : les ensembles de contraintes sont fermés. Ils n'ont pas besoin, en général, d'être convexes, ou compacts. Pour les dynamiques en temps continu, cela a permis à la théorie de la viabilité de proposer des solutions dans des conditions où le contrôle optimal ne le pouvait pas. De plus, un algorithme d'approximation des noyaux de viabilité avec preuve de convergence est disponible [8]. Même s'il souffre de la malédiction de la dimension (complexité exponentielle avec la dimension), il offre la possibilité de calculer des approximations de noyaux de viabilité dans le cas général, ce qui est un avantage indéniable pour cette méthode.

2 La théorie de la viabilité à partir d'un exemple

La théorie de la viabilité propose une manière différente de réfléchir à la gestion des systèmes dynamiques, c'est pourquoi nous illustrons la démarche à partir d'un exemple simple : le problème de l'eutrophisation des lacs.

Une étude de viabilité suppose de disposer d'un modèle dynamique du problème, et de pouvoir définir l'ensemble des états dans lequel on souhaite que l'état du système

demeure (c'est l'ensemble de contraintes de viabilité). Il s'agit donc entre autres de pouvoir définir les variables qui décrivent le problème, de décrire l'évolution de ces variables (la dynamique du système), d'identifier les moyens d'action (les contrôles) et de connaître leur effet sur la dynamique. Le phénomène d'eutrophisation est décrit dans la suite, ainsi que la formulation du problème de viabilité.

2.1 L'eutrophisation des lacs

Le mécanisme de l'eutrophisation des lacs est bien connu. Il est causé par l'accumulation des nutriments (essentiellement le phosphore et l'azote). Cela entraîne le développement rapide de plantes et d'algues qui appauvrissent le milieu en oxygène dissout, provoquant une perte de biodiversité, la mort de nombreuses espèces, et le développement de bactéries qui peuvent rendre l'eau toxique. L'eau devient turbide, potentiellement malodorante et toxique. L'eutrophisation a des effets négatifs sur la qualité de l'eau qui impactent les écosystèmes, la biodiversité, l'utilisation de la ressource, le tourisme, etc. Tous les étés, des mairies sont obligées de prendre des arrêtés d'interdiction de baignade dans les étangs eutrophes du fait de la présence de cyanobactéries. Ce phénomène est très répandu sous toutes les latitudes, raison pour laquelle il est étudié depuis longtemps. Il est maintenant très bien décrit. On dispose de nombreuses données, analyses et indicateurs fiables [9]. Ces études ont donné lieu à des travaux de modélisation qui permettent de bien comprendre le phénomène [10]. En particulier, on sait que, pour chaque lac, il y a une concentration de phosphore total à ne pas dépasser. En revanche la mesure de la concentration P en phosphore total du lac ne suffit pas à expliquer le comportement du lac comme le montre la figure 1. L'évolution du lac à une concentration de P donnée dépend aussi du niveau des apports de phosphore dans le lac, noté L . Ces apports de phosphore proviennent en général des engrais agricoles et des eaux usées. La dynamique suit une loi de type pseudo-sygmöide, où b , m et q sont des paramètres qui dépendent de la configuration du lac et qui sont obtenus par calibration à partir de mesures :

$$\frac{dP}{dt} = -bP(t) + L(t) + r \frac{P(t)^q}{m^q + P(t)^q} \quad (1)$$

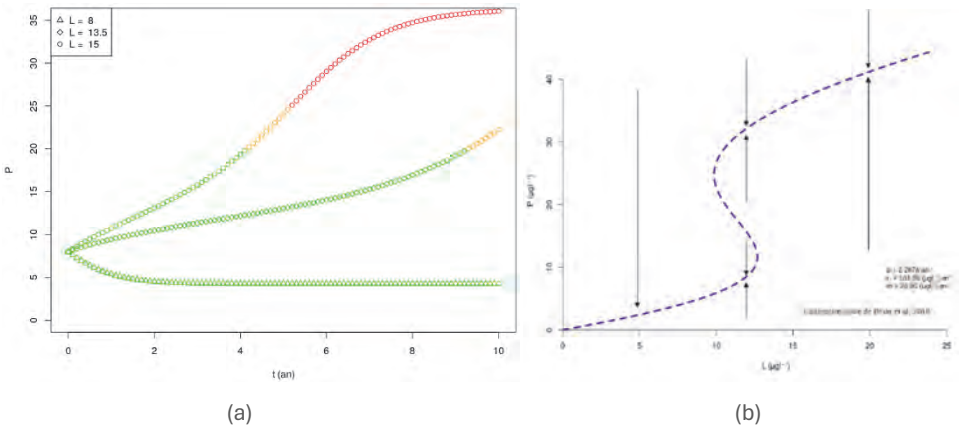


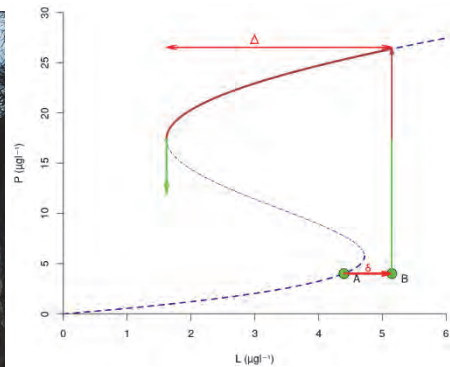
Figure 1. Évolution de l'état du lac en fonction des apports annuels de phosphore. Paramètres de la dynamique : $b = 2,2676 \text{ an}^{-1}$, $r = 101,96$ et $m = 26,9$ en $\mu\text{g l}^{-1} \text{ an}^{-1}$, $q = 2,222$. (a) 3 trajectoires issues de la même concentration initiale ($P = 8 \mu\text{g l}^{-1}$). En rouge des états eutrophes. (b) Équilibres de la dynamique du lac en fonction des apports L . Les flèches indiquent l'évolution de P à L constant.

Il s'agit d'un modèle qui simplifie le fonctionnement du système réel, mais qui permet de simuler le comportement du lac, et de prédire son évolution. Ce modèle peut servir de base de travail à l'étude de viabilité. Schématiquement, il décrit que l'évolution de la teneur en phosphore total diminue avec les pertes (avec un paramètre b), par exemple par les infiltrations ou les émissaires du lac. Elle est augmentée des apports et par le relargage des sédiments (avec un maximum r , et des caractéristiques de non-linéarité q et m).

Suivant les lacs, la dynamique peut présenter un comportement d'hystérésis : un petit apport supplémentaire de phosphore peut faire passer rapidement le lac d'un état oligotrophe à un état eutrophe. Le retour à un état oligotrophe demandera des efforts de réduction des apports beaucoup plus importants que la cause initiale ayant entraîné l'eutrophisation. C'est le cas quand la courbe des équilibres présente deux branches d'équilibres stables, comme sur la figure 2b. C'est la raison pour laquelle la lutte contre l'eutrophisation des lacs est difficile, comme l'illustre le cas du lac Dianchi (figure 2a). Un très grand nombre de moyens ont été mis en œuvre pour lutter contre l'eutrophisation depuis 1986 [11]. D'une part, la majeure partie des sources de pollution ponctuelles a été réduite : épuration des eaux usées de la ville de Kunming, obligation de traitement des déchets des mines de potasse (qui auparavant étaient déversés dans les affluents du lac), restrictions des activités industrielles les plus polluantes, relocalisation des industries agro-alimentaires (interdiction de l'aquaculture, déplacement de plus de 5 millions de volailles). Les sources diffuses ont été réduites : restriction d'utilisation des engrais, interdiction des cultures florales et maraîchères sur un large périmètre et en ville. D'autres actions ont été entreprises : des rivières ont été détournées pour contribuer à la baisse de la concentration en phosphore par un apport d'eau saine, et surtout, plus de 10 millions de m^3 de sédiments ont été dragués. Grâce à l'ensemble de ces actions, la concentration totale de phosphore dans le lac a enfin commencé à baisser.



(a)



(b)

Figure 2. Eutrophisation des lacs et hystérésis. (a) Lac Dianchi en 2007. Le lac est eutrophe et fait l'objet de politiques suivies de lutte contre l'eutrophisation. Crédit Photo : I. Emitchan, CC BY 2.5. (b) Hystérésis : une faible augmentation des apports δ amène le lac de l'état d'équilibre A oligotrophe à l'état B. Le lac n'est plus à l'équilibre et évolue vers la branche supérieure des équilibres (eutrophes). Le lac ne peut revenir à un état oligotrophe que par une diminution des apports de Δ , beaucoup plus importante que δ .

2.2 Poser un problème d'eutrophisation en termes de viabilité

2.2.1 Définir l'ensemble de contraintes, les moyens d'action et le modèle

Le problème d'eutrophisation développé ici est inspiré de [12]. On considère ensemble un lac et les exploitations riveraines du lac et de son affluent. Les pratiques agricoles et d'autres activités peuvent entraîner une pollution par les phosphates, ce qui expose le lac à des problèmes d'eutrophisation. On considère qu'un comité rassemblant les parties prenantes étudie le problème. Pour modéliser la situation, on retient de la section précédente que les variables qui permettent de décrire le comportement du lac, du point de vue de l'eutrophisation, sont la concentration P de phosphore total et les apports en phosphore L . On considère que la surveillance du lac permet de modéliser la dynamique du lac suivant l'équation (1) (en calibrant les paramètres) et de fixer la limite P_{max} de concentration du phosphore total à ne pas dépasser. Pour permettre la poursuite ou le développement des activités agricoles ou autres, il est nécessaire d'accepter un niveau minimal L_{min} d'apport de phosphore dans le lac. Ces deux seuils définissent l'ensemble de contraintes de viabilité du lac et des exploitations riveraines, que l'on peut voir sur la figure 3a.

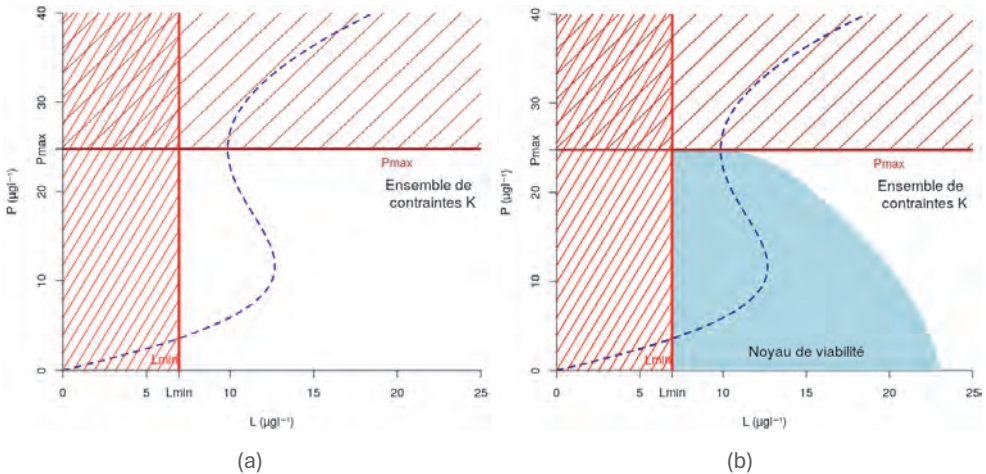


Figure 3. Ensemble de contraintes et noyau de viabilité pour le problème du lac et des exploitations riveraines modélisé par le système (3) (avec les paramètres de la figure 1). (a) Ensemble de contraintes de viabilité (en blanc). La zone hachurée en rouge ne respecte pas la contrainte minimale sur les apports. La zone hachurée en marron ne respecte pas la contrainte maximale de concentration en phosphore total. Valeurs des seuils : $L_{min} = 6,9 \mu g l^{-1}$ (soit 25 t), $P_{max} = 24,8 \mu g l^{-1}$. (b) Noyau de viabilité (en bleu). Dans le noyau de viabilité, il est toujours possible de maintenir le lac dans l'ensemble de contraintes. En dehors du noyau ce n'est pas possible, soit le lac deviendra eutrophe, soit les exploitations ne pourront plus exercer leur activité.

L'ensemble de contraintes représente l'ensemble des états souhaitables dans lequel on souhaite conserver le lac. On considère ici que les moyens d'actions disponibles (par exemple la dépollution des affluents, la mise en place de zones humides et de bassins de rétention, les changements de pratiques agricoles, etc.) peuvent se ramener à contrôler la variation des apports :

$$\frac{dL}{dt} = u \in U = [u_{min}, u_{max}] \quad (2)$$

Un modèle simplifié du lac et des exploitations riveraines peut être formulé en

considérant que les équations (1) et (2) gouvernent l'évolution des états du lac. Le problème de viabilité est alors résumé par le système (3) :

$$(S) \begin{cases} \frac{dL}{dt} = u \in U = [u_{min}, u_{max}] \\ \frac{dP}{dt} = -bP(t) + L(t) + r \frac{P(t)^q}{m^q + P(t)^q} \\ (L(t), P(t)) \in K = [Lmin, +\infty[\times [0, Pmax] \end{cases} \quad (3)$$

2.2.2 Noyaux de viabilité et bassin de capture

Résoudre le problème de viabilité du lac et des exploitations riveraines consiste à rechercher les états à partir desquels les évolutions gouvernées par le système 3 restent indéfiniment dans l'ensemble des états souhaitables. L'ensemble de tous ces états *viables* est le *noyau de viabilité*. La figure 3b montre le noyau de viabilité pour le problème (3), en considérant comme paramètres de contrôle $u_{max} = -u_{min} = 3,15$ (soit 50 % des écarts moyens des apports entre deux années consécutives, voir [13]).

Le noyau de viabilité regroupe les états à partir desquels il est possible d'évoluer indéfiniment dans l'ensemble de contraintes. La figure 4a montre le noyau de viabilité du problème du lac pour le système (3) et les paramètres de la figure 1. À partir d'un état du noyau de viabilité, même si toutes les évolutions ne sont pas viables, il en existe au moins une qui reste indéfiniment dans l'espace de contraintes (donc dans le noyau de viabilité). En revanche, à partir d'un état qui n'est pas dans le noyau de viabilité, toutes les évolutions sont condamnées à quitter l'ensemble de contraintes en temps fini. Dans ce cas, le *bassin de capture du noyau de viabilité* donne des informations utiles : il regroupe les états à partir desquels il est possible de rejoindre le noyau de viabilité en temps fini. La figure 4b montre le bassin de capture du noyau de viabilité (qui est dans cet exemple l'espace tout entier).

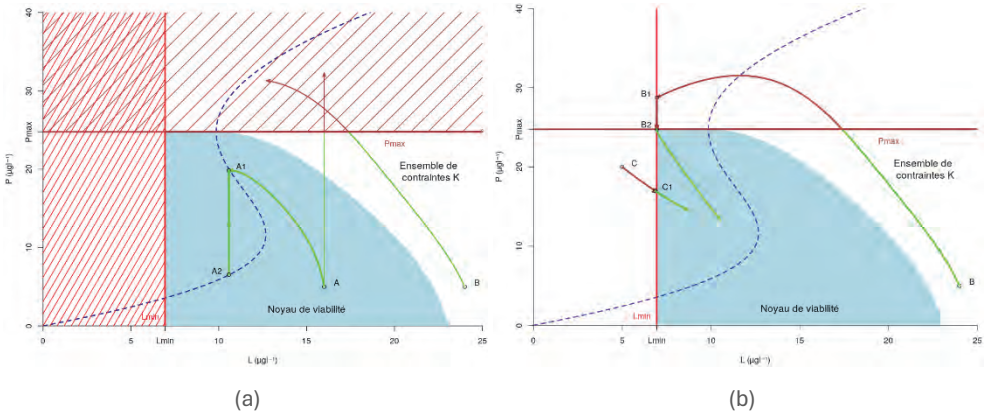


Figure 4. Évolutions dans le noyau de viabilité et son bassin de capture pour le problème du lac et des exploitations riveraines (système (3) avec les paramètres de la figure 1 et contraintes de la figure 3a). (a) A est dans le noyau, on peut trouver au moins une évolution qui y reste indéfiniment : jusqu'en A1 avec un contrôle $u = -0,6$ (faible réduction des apports), puis avec $u = 0$ (apports constants) jusqu'en A2 (équilibre oligotrophe). B n'est pas dans le noyau : la trajectoire représentée est la plus efficace (réduction maximum des apports avec $u = u_{min}$), elle quitte l'ensemble de contraintes. (b) Les états B et C sont dans le bassin de capture (en blanc) du noyau de viabilité. Au départ de B, avec l'effort maximal de réduction des apports jusqu'en B1, puis avec un effort nul, l'évolution du lac rejoint le noyau de viabilité en B2, il est ensuite possible d'augmenter les apports en réduisant P. Au départ de C, l'effort d'augmentation maximal des apports permet de rejoindre la frontière du noyau de viabilité en C1, et de poursuivre dans le noyau.

Si l'état du lac n'est pas dans le noyau de viabilité correspondant aux moyens $U = [u_{min}, u_{max}]$ que l'on s'est donné, mais qu'il est dans le bassin de capture, il existe au moins une évolution permettant de rejoindre le noyau de viabilité en temps fini, donc de rester dans l'ensemble de contraintes indéfiniment par la suite. Cependant le temps de crise (pendant lequel le système n'est pas dans l'ensemble de contraintes) peut être jugé trop long, ce qui implique de se donner des moyens d'action supplémentaires. Par exemple, dans le cas du lac Dianchi, plusieurs moyens de réduire les apports ont été expérimentés avec une montée en puissance (traitement de volume d'eaux usées auparavant déversées dans le lac de plus en plus important, assainissement des affluents, etc.).

Le modèle (3) montre un comportement de lac irréversible pour certains paramètres, ce qui correspond à des observations réelles (voir les exemples cités dans [10]). Cela signifie qu'il peut exister des lacs devenus eutrophes pour lesquels même une durée indéterminée avec des apports nuls ne fait pas chuter la concentration en phosphore suffisamment pour ramener le lac à un état oligotrophe. La figure 5a montre le comportement du lac à partir d'un état qui n'est ni dans le noyau de viabilité ni dans son bassin de capture. Même quand les apports de phosphore deviennent nuls, la concentration en phosphore total dans le lac continue d'augmenter jusqu'à rejoindre un équilibre eutrophe. Il n'est pas possible dans cette configuration de ramener le lac dans un état oligotrophe : les moyens d'actions qui agissent sur les apports sont inopérants. Il est nécessaire de recourir à des contrôles qui agissent directement sur la concentration de phosphore dans le lac. Dans le cas du lac Dianchi, des rivières d'eau saine ont été détournées pour diminuer directement cette concentration (ce qui peut être modélisé par une augmentation du paramètre b). Plus efficacement, les sédiments ont été dragués en grande quantité. Du point de vue du modèle, cela revient à modifier les paramètres de la pseudo-sigmoïde (r , q et m), ce qui modifie la dynamique et la courbe des équilibres. Il est ainsi possible, en modifiant les caractéristiques du lac, de transformer un lac « irréversible » en un lac « réversible » qui pourra retrouver un état oligotrophe.

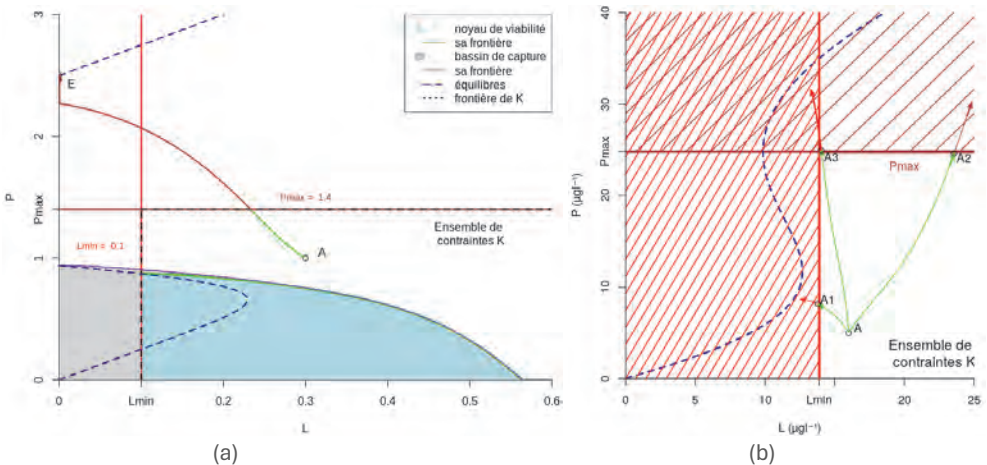


Figure 5. Faible compatibilité ou incompatibilité entre la dynamique, les moyens d'actions et les états souhaitables. (a) Modèle d'un lac irréversible (système (3) avec pour paramètres $b = 0,4 \text{ an}^{-1}$, $r = 1$ et $m = 1 \text{ en } \mu\text{g l}^{-1} \text{ an}^{-1}$, $q = 8$, $u_{min} = -0,09$). Le bassin de capture du noyau est en gris, il est par endroit très proche du noyau. Il n'est pas possible de rejoindre le noyau de viabilité à partir des états de la zone blanche. La trajectoire issue de A correspond à l'effort de réduction maximum des apports jusqu'aux apports nuls. Elle quitte l'ensemble de contraintes et rejoint l'équilibre eutrophe E. (b) À partir du point A, viable avec les contraintes de la figure 4a, toutes les évolutions sortent de l'ensemble de contraintes. Le noyau de viabilité est vide : les contraintes, la dynamique et les moyens d'action sont incompatibles.

3 Viabilité, robustesse et résilience

3.1 Contrôler un système pour qu'il reste viable ou pour qu'il le devienne

Un des résultats les plus puissants de la théorie de la viabilité est la fermeture du noyau de viabilité. On considère un système dynamique défini sur un ouvert Ω de $\mathbb{R}^n$, et un ensemble de contraintes $K \subset \Omega$. On s'intéresse ici aux systèmes contrôlés : le système dynamique $S_{(f,U)}$ est défini par une fonction de plusieurs variables $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \mapsto \mathbb{R}^n$ et la carte des contrôles admissibles $U : \mathbb{R}^n \rightsquigarrow \mathbb{R}^p$. À partir d'un état x et d'un contrôle $u \in U(x)$, la fonction f détermine la dynamique en faisant passer de l'état x à l'état $x + f(x, u)dt$ dans le temps infinitésimal dt . Les systèmes non-autonomes sont modélisés par l'ajout d'une variable de dérivée temporelle égale à 1.

Définition 1 Le noyau de viabilité $Viab_{S_{(f,U)}}(K)$ de l'ensemble de contraintes K pour le système contrôlé $S_{(f,U)}$ est l'ensemble (éventuellement vide) des états du système à partir desquels il est possible de trouver une fonction de contrôle $u(\cdot)$ telle qu'une évolution $x(\cdot)$ gouvernée par $S_{(f,U)}$ reste dans K indéfiniment :

$$x \in viab_{S_{(f,U)}}(K) \Leftrightarrow \exists u(\cdot) \forall t \geq 0 \begin{cases} x'(t) &= f(x(t), u(t)) \\ u(t) &\in U(x(t)) \\ x(t) &\in K \end{cases} \quad (4)$$

Le théorème de la fermeture du noyau a plusieurs variantes [7]. Dans le cas des systèmes contrôlés, les hypothèses suffisantes qu'on considère ici sont les suivantes : l'ensemble de contraintes doit être fermé et le système dynamique en temps continu $S_{(f,U)}$ doit être Marchaud : f est continue, le graphe de U est fermé, pour tout état x , l'ensemble des images de x par f quand on fait varier le contrôle $\{f(x, u), u \in U(x)\}$ est convexe, et f et U sont à croissance linéaire².

Théorème 1 Si K est fermé $Viab_{S_{(f,U)}}(K)$ est fermé si on a les conditions suivantes :

- en temps continu si $S_{(f,U)}$ est Marchaud ;
- en temps discret si $S_{(f,U)}$ vérifie : f est continue, le graphe de U est fermé, U est à croissance linéaire.

Concrètement, cela signifie que les évolutions ne doivent pas être plus rapides que des exponentielles. Dans ce cas, les conditions sont facilement réunies et le noyau de viabilité est fermé. En temps continu, à l'intérieur du noyau, tous les contrôles admissibles sont viables, alors qu'en général ils sont réduits sur la frontière. Comme le noyau de viabilité est un fermé, il est possible de calculer les contrôles viables sur la frontière, comme le montre la figure 6, et ainsi de comprendre comment les contrôles permettent au système de rester viable.

² Une correspondance $F(x)$ – définissant un ensemble de valeurs possibles y pour chaque x , donc pas nécessairement une fonction – est à croissance linéaire s'il existe une constante $c > 0$ telle que pour tout x dans le domaine de F , $\sup_{y \in F(x)} \|y\| \leq c(\|x\| + 1)$. Dans le cas présent la correspondance $U(x)$ définit les contrôles admissibles dans l'état x du système

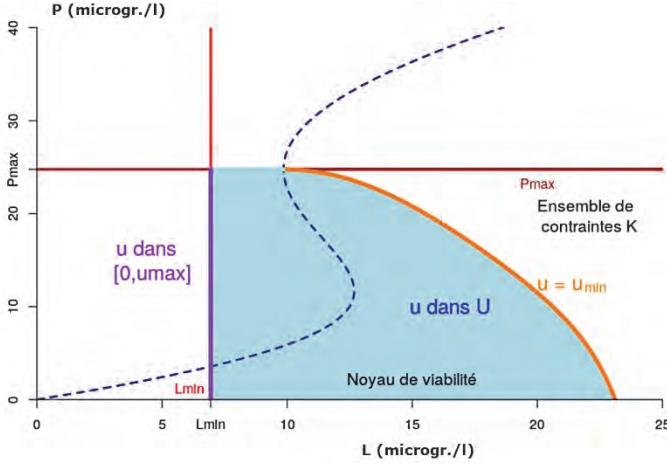


Figure 6. Carte de contrôle viable pour le problème du lac et des exploitations riveraines (système 3 avec les paramètres de la figure 1 et contraintes de la figure 3a). La portion de frontière du noyau en orange comporte un seul contrôle viable, aucune marge de manœuvre n'est possible : une seule évolution permet de rester viable. Par comparaison, la frontière sur $L = L_{\min}$ (en violet) admet la moitié des contrôles admissibles comme contrôles viables, et sur la frontière suivant $P = P_{\max}$ comme dans l'intérieur du noyau, tous les contrôles sont viables.

La manière dont les contrôles viables sont réduits par rapport aux contrôles admissibles peut être vue comme un indicateur de la difficulté à contrôler le système : c'est la *flexibilité* [14, 15], qui permet de quantifier les options qui s'offrent pour évoluer de manière viable depuis un état donné. En temps discret, cet indicateur apporte davantage d'informations car la proportion de contrôles viables parmi les contrôles admissibles peut être déjà réduite à distance de la frontière du noyau de viabilité.

La théorie propose aussi le concept de bassin de capture d'une cible [16] tout en respectant des contraintes ensemblistes.

Définition 2 Le bassin de capture $\text{Capt}_{S_{(f,u)}}(K, C)$ de la cible $C \subset K$, viable dans K pour le système contrôlé $S_{(f,u)}$, est l'ensemble (éventuellement vide) des états du système à partir desquels il est possible de trouver au moins une fonction de contrôle $u(\cdot)$ telle l'évolution $x(\cdot)$ gouvernée par $S_{(f,u)}$ atteint C en temps fini et reste dans K au moins jusqu'à cette date

$$x \in \text{Capt}_{S_{(f,u)}}(K, C) \Leftrightarrow \exists u(\cdot), \exists T \geq 0, x(T) \in C \text{ et } \forall t \in [0; T] \begin{cases} x'(t) = f(x(t), u(t)) \\ u(t) \in U(x(t)) \\ x(t) \in K \end{cases} \quad (5)$$

Avec les mêmes hypothèses que pour le noyau de viabilité, le bassin de capture existe et est un ensemble fermé si C et K sont fermés.

Dans les problèmes de transition, la cible peut désigner l'ensemble dans lequel on souhaite que le système évolue dans le futur. Par exemple, si on souhaite que le système évolue dans un ensemble de contraintes K dans le futur, on peut calculer le noyau de viabilité C de K pour la dynamique $S_{(f,u)}$. On peut se donner les contraintes K' , avec $C \subset K \subset K'$ que l'on souhaite vérifier pendant la transition. Le bassin de capture de C dans K' regroupe alors les états qui atteindront C en temps fini tout en vérifiant les contraintes K' le long de leur

trajectoire jusqu'à la cible C , et qui pourront par la suite vérifier en tout temps les contraintes K (puisque C est le noyau de viabilité de K). La figure 4b montre la trajectoire à partir de l'état B qui permet de rejoindre le bassin de capture du noyau de viabilité du problème du lac, en vérifiant la contrainte $L \geq L_{min}$ tout au long de la trajectoire.

3.2 Robustesse et résilience face à des perturbations

Les incertitudes ou perturbations peuvent être prises en compte dans la dynamique et dans le calcul du noyau de viabilité (cf. section 3.3), mais tous les états du noyau ne sont pas équivalents en cas de perturbation non prise en compte dans le modèle, comme le montre la figure 7 : être proche de la frontière peut amener l'état du système hors du noyau, voire hors du bassin de capture quand les frontières des deux ensembles sont très proches, comme dans le cas du lac irréversible de la figure 5a. Dans un tel cas, on a vu qu'il faut revoir complètement la définition du problème, d'où l'intérêt de disposer d'indicateurs de robustesse et de résilience pour en tenir compte dans la sélection de contrôles viables. En effet, les stratégies de contrôles viables utilisées habituellement (de par leur facilité de mise en œuvre) conduisent souvent le système sur la frontière du noyau de viabilité [17]. Il s'agit des stratégies « lourde » et « lente ». Elles sont disponibles dans des conditions très générales, sans optimisation intertemporelle (c'est à dire sans choix de critères supplémentaires, en appliquant une règle locale en fonction de l'état). La stratégie lourde [7] consiste à ne changer de valeur du contrôle qu'en cas de nécessité, par la sélection du contrôle qui minimise la norme de la variation du contrôle $\left\| \frac{du}{dt} \right\|$: tant qu'une valeur de contrôle est viable, elle sera sélectionnée (c'est le *business as usual*). La stratégie lente [18] sélectionne le contrôle de norme minimale. Dans le cas où la dynamique de contrôle nul correspond à l'évolution naturelle (sans intervention), cela revient à n'exercer un contrôle qu'en cas de nécessité.

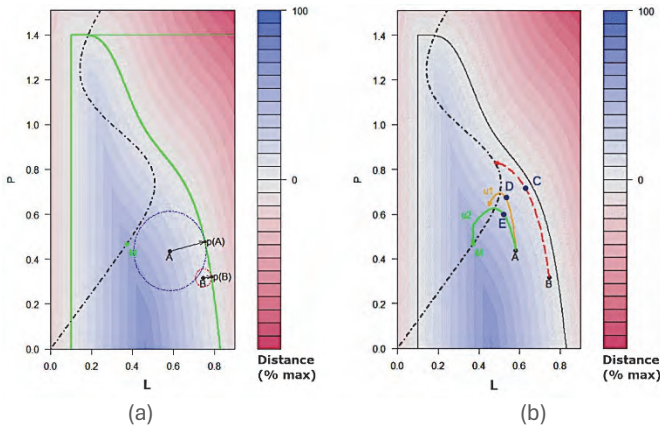


Figure 7. Robustesse aux perturbations dans le noyau de viabilité. Une perturbation est un saut unique dans l'espace d'état dans une direction quelconque à une date quelconque (combinaison d'erreur de mesure de la concentration et d'apport inattendu ou d'erreur de mesure de l'apport de phosphore dans le lac). (a) Distance à la frontière (en vert) du noyau de viabilité (en pourcentage du maximum à l'intérieur du noyau). Cette carte mesure la robustesse statique des états à une perturbation immédiate. Comparé à l'état A, B sort beaucoup plus facilement du noyau de viabilité en cas de perturbation de ce type. (b) Évolutions à robustesse croissante. À partir de B la robustesse dynamique le long de l'évolution orange est constante jusqu'en C, puis augmente jusqu'à l'équilibre. La robustesse de l'évolution u1 est celle de l'état D. Le long de l'évolution u2, la robustesse dynamique des états reste constante jusqu'en E, puis augmente jusqu'au maximum possible (équilibre M).

Les définitions mathématiques de la résilience [19] (par contraste avec les différentes visions et définitions qualitatives de la résilience, qui incluent les possibilités de réorganisation) ont longtemps été fondées sur les propriétés asymptotiques des systèmes dynamiques représentant le système étudié : caractéristiques des attracteurs et de leurs bassins de capture, y compris les vitesses de convergence. Les définitions qualitatives de la résilience font davantage référence aux termes de persistance, stabilité, conservation, très liés à la notion de robustesse [20].

La théorie de la viabilité permet de formaliser ces concepts quand la propriété à conserver peut être définie par un ensemble de contraintes dans l'espace d'état, pour des perturbations correspondant à des sauts dans l'espace d'état.

La *robustesse* aux perturbations peut être définie comme la capacité du système à conserver la propriété d'intérêt malgré une perturbation. En termes de viabilité, c'est la capacité à demeurer dans l'ensemble de contrainte K indéfiniment malgré la perturbation (c'est-à-dire demeurer dans le noyau de viabilité) [17]. La *robustesse dynamique* d'un état peut être définie comme la taille de la perturbation maximale (dans un ensemble admissible de perturbations) malgré laquelle le système peut respecter indéfiniment les contraintes, maintenant ou dans le futur [21]. La figure 7 montre la carte de la distance à la frontière du noyau de viabilité pour le problème du lac et des exploitations riveraines. Si les perturbations sont homogènes sur tout l'espace, la distance à la frontière donne la taille maximale d'un saut dans l'espace d'état qui laisse le système dans le noyau : c'est la robustesse *statique* des états. La robustesse d'une évolution est définie comme le minimum de la robustesse statique des états au cours du temps. La *robustesse dynamique* d'un état est le maximum de la robustesse sur toutes les évolutions possibles. À partir de cet indicateur, il est possible, dans certaines conditions, de construire des évolutions « prudentes » dont la robustesse dynamique des états augmente au cours du temps, comme le montre la figure 7b.

La *résilience* aux perturbations peut être définie comme la capacité du système à recouvrer la propriété d'intérêt après une perturbation qui la lui aura fait perdre temporairement. En termes de viabilité, c'est la capacité à rejoindre l'ensemble de contraintes K et à y demeurer indéfiniment (donc à rejoindre le noyau de viabilité) après avoir subi une perturbation qui lui aura fait quitter le noyau de viabilité (et donc l'ensemble de contraintes) [12]. Il ne s'agit pas de retrouver le même état qu'avant la perturbation, mais bien de retourner dans le noyau de viabilité, ce qui peut entraîner des modifications de fonctionnement (par exemple, être dans le bassin d'attraction d'un cycle et non plus d'un attracteur ponctuel). Un état est résilient à une perturbation si l'ensemble de ses images par la perturbation est dans le noyau de viabilité ou dans son bassin de capture. La figure 4 nous montre que l'état A est résilient à une perturbation qui l'emmène en B. L'inverse du temps de crise, qui est la durée passée hors de l'ensemble de contraintes, peut servir à définir des indicateurs de résilience (plus d'information dans [12], accessible en ligne).

3.3 Gestion des incertitudes : la viabilité garantie

La théorie de la viabilité propose une méthode originale pour la gestion des incertitudes qui permet une robustesse aux incertitudes sur les paramètres aussi bien que sur les modèles eux-mêmes : c'est la viabilité garantie [7], fondée sur les inclusions différentielles. Les incertitudes (appelées *tyches*) sont modélisées dans la dynamique comme des vecteurs appartenant à des ensembles. Quand la dynamique comprend des

tyches, les évolutions doivent être viables pour toutes les valeurs possibles des tycles. Un système contrôlé tychastique $S_{(f,U,V)}$ est défini par une fonction de plusieurs variables $f: \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^p \times \mathbb{R}^q \mapsto \mathbb{R}^n$, la carte des contrôles admissibles et la carte des tycles admissibles $V: \mathbb{R}^n \rightsquigarrow \mathbb{R}^q$. À partir d'un état x , d'un contrôle $u \in U(x)$, et d'un tycle $v \in V(x)$, la fonction f détermine la dynamique en faisant passer de x à l'état $x + f(x, u, v)dt$ dans le temps infinitésimal dt .

Un ensemble L a la propriété de viabilité garantie s'il existe une carte de régulation $\tilde{U}: \mathbb{R}^n \rightsquigarrow \mathbb{R}^p$ définie sur L telle que $\forall x \in L, \tilde{U}(x) \neq \emptyset$ et $\tilde{U}(x) \subset U(x)$, et telle que pour tous les états x_0 dans L , toutes les évolutions à partir de x_0 et gouvernées par $S_{(f,\tilde{U},V)}$ sont viables dans L : L est invariant par la dynamique $S_{(f,\tilde{U},V)}$. Un tel ensemble est appelé domaine de viabilité.

Pour les systèmes en temps continu, le plus grand des domaines de viabilité inclus dans un ensemble de contraintes fermé K n'a pas nécessairement la propriété de viabilité garantie, des conditions supplémentaires sont nécessaires [23]. Quand la carte de contrôle est lipschitzienne³ de constante $\lambda > 0$, le noyau de viabilité garantie de K associé à λ existe et est le plus grand des domaines de viabilité inclus dans K . Un théorème de fermeture du noyau de viabilité garantie existe avec des conditions plus restrictives [23] : si K est fermé, le noyau de viabilité de K associé à $\lambda > 0$ pour le système dynamique en temps continu $S_{(f,U_\lambda,V)}$ est fermé si f est lipschitzienne de constante λ et U et V sont à images compactes et lipschitziennes de constante λ . En temps discret le noyau de viabilité garantie de l'ensemble de contraintes K fermé est fermé dès lors que f et V sont continues, le graphe de U est fermé, U est à croissance linéaire (voir [24] pour davantage de détail).

La figure 8 montre le noyau garanti dans le problème du lac quand les paramètres prennent leur valeur dans un intervalle et un modèle alternatif au modèle 1 est considéré simultanément.

L'intérêt de la gestion ensembliste des incertitudes est d'une part de s'abstraire du cadre probabiliste pour la gestion du risque (on se protège contre le pire des cas même s'il n'est pas connu, pour un ensemble de perturbations admissibles) ; d'autre part, cela permet de modéliser des problèmes de viabilité individuelle et collective mettant en jeu un grand nombre d'acteurs, les actions des autres étant pour chacun perçues comme des perturbations [25].

Il est aussi possible de définir des noyaux de viabilité stochastique, en particulier pour les systèmes à temps discret, par exemple en fonction de la proportion de réalisations qui restent dans l'ensemble de contraintes, ou pour des niveaux de confiance donnés [26, 27].

Par ailleurs, il faut noter que les méthodes récentes d'analyse de sensibilité [28] qui s'intéressent aux ensembles-résultats s'appliquent aux noyaux de viabilité.

³ Une correspondance $G: A \rightsquigarrow B$ (A et B espaces vectoriels de dimension finie) est lipschitzienne de constante $\lambda > 0$ si pour tout x_1, x_2 dans A , $G(x_1) \subset G(x_2) + \lambda \|x_1 - x_2\|B$ (où B est la boule unité)

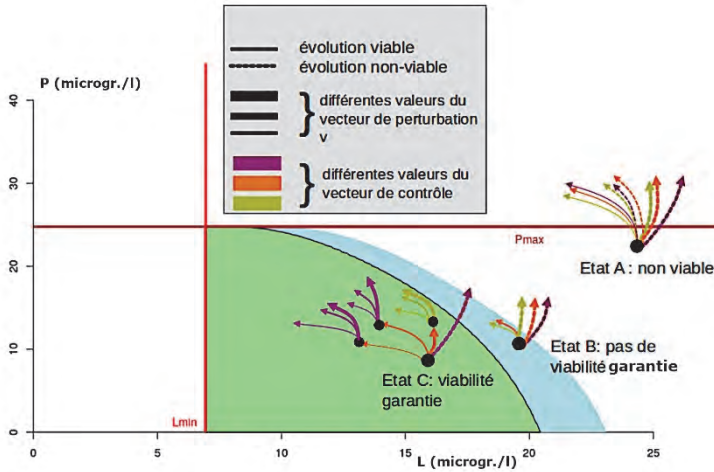


Figure 8. Noyau de viabilité garantie pour le problème du lac, avec un modèle alternatif pour la pseudo-sigmoïde dans l'équation (1) : $r \frac{P(t)}{P(t) + m e^{-\lambda(P(t) - m)}}$. Les paramètres sont des *tyches* à valeur dans des intervalles. Un *tyche* à valeur dans $[0 ; 1]$ représente l'incertitude sur la formule de la pseudo-sigmoïde (voir [22] pour plus de détails). En vert le noyau garanti, en bleu le noyau de la figure 6. L'état C est dans le noyau garanti : il existe des contrôles qui maintiennent une évolution issue de C dans cet ensemble pour toutes les perturbations admissibles. Le noyau de viabilité en bleu n'a pas cette propriété : aucune valeur de contrôle en B ne maintient l'évolution dans l'ensemble pour la perturbation « moyenne ». L'état A n'est pas dans le noyau de viabilité, il n'y a pas de contrôles qui puissent maintenir une évolution issue de A dans l'ensemble de contraintes.

4 Ce que nous apporte la théorie de la viabilité

Outre les apports mathématiques pour le contrôle optimal en temps continu, et dans le cas des inclusions différentielles, la théorie mathématique de la viabilité apporte un cadre formel pour étudier la compatibilité entre un système dynamique et des contraintes dans l'espace d'état, avant de se poser des questions d'optimisation dans le choix d'une trajectoire. L'optimisation dans le noyau de viabilité assure le respect absolu des contraintes. En cas d'échec (noyau vide), une redéfinition explicite du problème est nécessaire. C'est la raison pour laquelle cette théorie est largement utilisée pour la modélisation dans le domaine de l'environnement, en particulier dans les problèmes de gestion de ressources renouvelables [29].

4.1 Le respect des contraintes avant l'optimisation

La recherche de trajectoires optimales au regard d'un objectif, dans le noyau de viabilité, garantit que les contraintes seront respectées en tout temps, quels que soient les critères pris en compte pour l'optimisation, puisque la sélection des contrôles se fera parmi les contrôles viables. Cela implique que la trajectoire retenue peut être moins performante que la trajectoire optimale qui aurait été obtenue en l'absence de contrainte, puisque l'ensemble des états qui peuvent être atteints est plus petit. Mais cette approche comporte la garantie que les contraintes seront respectées en tout temps.

L'exemple suivant, tiré de [30] illustre la différence entre l'approche économique classique par optimisation et l'approche proposée par la théorie de la viabilité. La figure 9 montre des évolutions à partir d'un même état initial, suivant des stratégies différentes. On considère un modèle à temps discret d'exploitation forestière, très stylisée : la forêt a une surface S (de parcelles homogènes), les coupes et les plantations se font par parcelles entières, la croissance est homogène par parcelle, la régénération se fait en n pas de temps, on ne coupe que les arbres d'âge plus grand ou égal à n , la plantation est instantanée et on ne considère pas de mortalité naturelle ni d'aléas. Dans ce modèle très simplifié, l'état de la forêt est décrit par le vecteur d'âge $x = (x_i)_{i \in [1, n]}$, où x_1 est la surface d'âge supérieur à n , x_2 la surface d'âge compris entre $n - 1$ et n et plus généralement x_i la surface (ou le nombre de parcelles) d'âge compris dans $[n - i + 1, n - i + 2]$. La coupe est décrite par le vecteur $u(t) \in [0, S]$, surface (ou nombre de parcelles) coupée au temps t . L'évolution de l'état de la forêt est modélisée par une fonction f qui associe l'état x et le contrôle u au temps t pour donner l'état au temps $t + 1$: $x(t + 1) = f(x(t), u(t))$ par l'équation (6) :

$$x(t + 1) = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & \cdots & \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \cdots \\ \vdots & & & \ddots & \\ 0 & \cdots & & & 1 \\ 0 & \cdots & & & 0 \end{bmatrix}}_A x(t) + \underbrace{\begin{bmatrix} -1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}}_B u(t) \quad (6)$$

avec $u(t) \in [0, (Ax)_1]$ (car on ne coupe que les arbres d'âge supérieur ou égal à n). Les états admissibles sont les vecteurs de $\mathbb{R}^n$ dont la somme est égale à S . On note $M(S, n)$ cet ensemble.

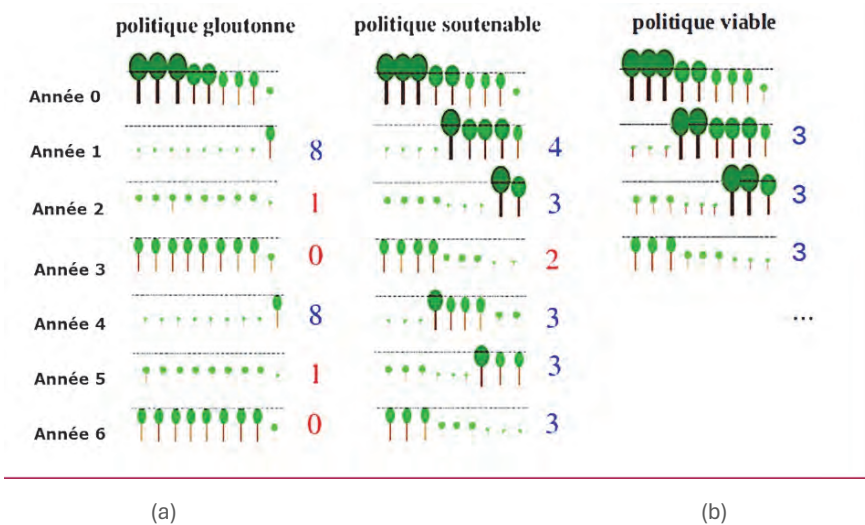


Figure 9. Stratégies de contrôle pour le problème de gestion forestière défini par l'équation 6, pour $n = 4$ et $S = 9$, pour le même état initial $x_0 = (5, 3, 1, 0)$. Dans le cas particulier présenté, la stratégie viable est elle aussi optimale. (a) La stratégie gloutonne consiste à couper à chaque pas de temps tout ce qui peut l'être. La stratégie « soutenable » consiste à tendre vers l'état stationnaire correspondant à une répartition des surfaces équilibrée en âge, ici $(0, 3, 3, 3)$. Les deux trajectoires sont optimales. En rouge, les valeurs qui ne respectent pas la contrainte de gain minimal. (b) Stratégie de contrôle viable pour la carte de contrôle admissible $U(x) = [\underline{u} = 3; (Ax)_1]$. x_0 est sur la frontière du noyau de viabilité, on ne peut pas avoir $u(t) > \underline{u}$.

Le critère économique dans cet exemple est fondé sur la surface coupée u à chaque pas de temps. L'approche d'optimisation directe consiste à rechercher les stratégies de contrôle $u(\cdot)$ qui maximisent un critère intertemporel pour la situation initiale x_0 : par exemple, pour ce problème en temps infini, $J(x_0, u(\cdot)) = \lim_{T \rightarrow +\infty} \sum_0^T \delta^t U(u(t))$ où U est une fonction d'utilité et $\delta \in]0; 1[$ un facteur d'actualisation (qui traduit le degré de préférence pour le présent). La résolution passe classiquement par la définition de la fonction valeur pour tous les vecteurs x de $M(S, n)$: $V(x) = \max_{u(\cdot)} J(x, u(\cdot))$. C'est un problème de programmation dynamique, la fonction valeur est solution de l'équation de Bellman : $V(x) = \max_{u \in [0, (Ax)_1]} U(u) + \delta V(Ax + Bu)$.

Dans l'exemple de l'exploitation forestière, il existe plusieurs types de stratégies particulières considérées habituellement, illustrées par la figure 9a. La politique gloutonne consiste à couper à chaque pas de temps tout ce qui peut l'être : $u^g(t) = (Ax(t))_1$. Elle amène généralement le système vers un cycle. Cette politique est optimale pour de nombreuses classes de fonction d'utilité sur de grandes plages de valeurs du facteur d'actualisation. La politique dite « soutenable » consiste à identifier l'état stationnaire équilibré en âge le plus proche de la situation initiale et à tendre vers cet état. Dans l'exemple de la figure 9a, on montre une politique « soutenable » qui est elle aussi optimale.

L'approche de la viabilité est différente. Elle considère le même ensemble d'états admissibles $M(S, n)$ et la même dynamique définie par l'équation 6. En revanche on considère un gain minimal $\underline{u}$ que l'on souhaite assurer à chaque unité de temps. Étant donné le modèle, cela se traduit par une limitation des contrôles admissibles qui doivent se trouver dans $[\underline{u}, (Ax)_1]$. À partir d'une situation initiale x_0 , il sera possible d'assurer au moins le gain minimal $\underline{u}$ à chaque pas de temps si et seulement si x_0 est dans le noyau de viabilité de $M(S, n)$ pour la dynamique d'équation 6 et les contrôles dans $[\underline{u}, (Ax)_1]$. Si x_0 est dans le noyau de viabilité, il est alors possible de rechercher dans le noyau une évolution qui maximisera le gain intertemporel : une telle trajectoire sera assurée de respecter la contrainte de gain minimal à chaque pas de temps. La figure 9b montre la trajectoire viable associée au même état initial que pour la politique gloutonne. Si x_0 n'est pas dans le noyau de viabilité correspondant à $\underline{u}$, il n'y a aucun moyen d'assurer ce gain minimal en tout temps.

Les évolutions dans le noyau de viabilité permettent de garantir la contrainte de gain minimal à chaque pas de temps. L'utilisation de la stratégie gloutonne (sélectionner le contrôle maximal viable) ou « soutenable », dans le noyau de viabilité, garantit le respect des contraintes. De ce point de vue, ces stratégies correspondent à la définition du rapport Bruntland, car elles assurent le respect de la contrainte maintenant et dans le futur. Cela signifie aussi qu'elles peuvent être sous-optimales par rapport aux stratégies utilisées directement. Mais ces dernières ne garantissent pas de gain minimal comme on le voit sur la figure 9a. Le cycle glouton n'est pas dans le noyau de viabilité, et pendant la phase transitoire, les trajectoires « soutenables » peuvent ne pas être dans le noyau.

4.2 Viabilité individuelle et collective : incertitude et engagement

Dans l'exemple du lac et des exploitations riveraines développé en section 2.2, on peut remarquer que les efforts sur les apports (équation (2)) sont agrégés : tous les moyens d'actions possibles ont été condensés dans une seule variable de contrôle qui prend sa

valeur entre deux bornes. Cela suppose que les mécanismes des différentes actions sont connus, ce qui a permis leur agrégation pour simplifier le modèle, et qu'à partir d'une valeur de contrôle donnée u , on sait reconstituer une ou plusieurs combinaisons d'actions dont la mise en œuvre simultanée donnera l'effet combiné de u . Ce raccourci pour la modélisation peut avoir des effets pervers. Par exemple, si l'utilisation d'une unité de dépollution, opérée par la collectivité locale, est systématiquement préférée (parce que plus simple à mettre en œuvre), cela peut amener les exploitations agricoles à augmenter leurs apports, ce qui n'est pas l'effet recherché. Même en l'absence d'effet pervers de ce type (par exemple, en cas de décideur unique), la résolution du problème de viabilité à un niveau global, quand de nombreux acteurs sont concernés, pose la question du partage de l'effort. Si plusieurs exploitations sont concernées par la mise en œuvre d'un contrôle viable u , par exemple en modifiant leurs intrants, ou en opérant des zones humides tampon (ce qui demande de la planification, des interventions), comment u est-il partagé entre les différents acteurs ?

Quand le nombre d'acteurs est faible, ce problème peut se traiter en considérant le problème de viabilité de toutes les parties en présence, comme dans [31] pour assurer la viabilité conjointe de deux pêcheries qui prélèvent le même stock : le noyau de viabilité conjoint fournit le contrôle (la variation de l'effort de pêche) que chaque acteur doit exercer en fonction de l'état de la ressource, ce qui permet à la ressource et à chaque pêcherie de rester viable. Généraliser ce type d'approche au problème du lac et des exploitations riveraines demanderait un modèle pour chaque acteur contribuant aux apports de phosphore dans le lac, comme dans la figure 10.

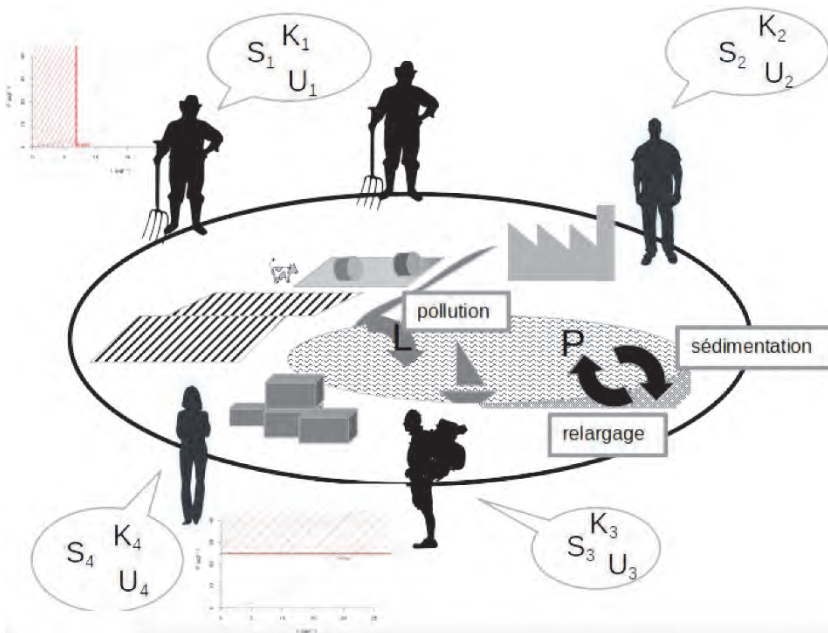


Figure 10. Viabilité individuelle et collective : l'activité de plusieurs acteurs a un impact sur leur environnement commun. Assurer la viabilité de chacun et de l'environnement commun ne peut pas se faire en considérant uniquement le problème de viabilité au niveau global.

On peut considérer un modèle simplifié de l'exploitation de chaque acteur $i \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$, qui est décrite par une variable d'état x_i dans $\mathbb{R}^{n_i}$, la carte de contrôle $U_i: \mathbb{R}^n \rightsquigarrow \mathbb{R}^{p_i}$, et dont l'évolution est gouvernée par la dynamique :

$$\begin{cases} \frac{dx_i}{dt} = f_i((L(t), P(t)), x_i(t), u_i(t)) \\ u_i(t) \in U_i(x(t)) \end{cases} \quad (7)$$

Chaque acteur définit son ensemble de contraintes de viabilité K_i , et le problème de viabilité globale du lac et des exploitations riveraines rassemble le système 3 et les dynamiques et contraintes des acteurs :

$$(S_G) \begin{cases} \frac{dL}{dt} = \sum_{i \in \mathcal{N}} u_i \\ \frac{dP}{dt} = -bP(t) + L(t) + r \frac{P(t)^q}{m^q + P(t)^q} \\ \frac{dx_i}{dt} = f_i((L(t), P(t)), x_i(t), u_i(t)) \text{ pour tout } i \in \mathcal{N} \\ (L(t), P(t)) \in K = [Lmin, +\infty[\times [0, Pmax] \\ \forall i \in \mathcal{N}, x_i \in K_i \\ \forall i \in \mathcal{N}, u_i \in U_i \end{cases} \quad (8)$$

Le noyau de viabilité de $K \times \prod_{i \in \mathcal{N}} K_i$ pour le système (S_G) , s'il est non vide, permet en théorie au lac de rester oligotrophe et à chaque exploitant d'être viable. À chaque état $((L, P), x_1, \dots, x_N)$ du noyau, un contrôle viable $(u_1, \dots, u_N)$ doit être sélectionné. Il faut bien noter que les exploitants doivent impérativement se coordonner pour que chacun applique le contrôle u_i qui lui est attribué.

Ce type de fonctionnement n'est pas impossible à réaliser dans le monde réel ; Elinor Ostrom en donne des exemples dans son ouvrage sur la gouvernance des biens communs [32] : moyennant un ensemble de règles et de moyens de surveillance, on observe des cas où un collectif s'organise avec succès pour exploiter une même ressource.

En revanche, en tant que problème de viabilité, la dimension de l'espace d'état du problème est $2 + \sum_{i=1}^N n_i$, ce qui dépasse rapidement les capacités de calcul pour l'algorithme d'approximation qui est soumis à la malédiction de la dimension, sauf pour certains types de problèmes. C'est la raison pour laquelle la viabilité est souvent utilisée à un niveau agrégé. Dans ce cas, le contrôle est déterminé au niveau global et un mécanisme doit être proposé pour assurer le partage (par exemple un mécanisme de marché, comme dans [33]), avec les problèmes de justice et d'équité qui se posent dans ce cas. On rencontre le même type de difficulté en cas de noyau vide pour explorer l'espace de problèmes.

La gestion ensembliste des incertitudes permet de proposer une méthode de résolution qui conserve la dualité individuelle et collective (voir [25] pour davantage de détails). Au lieu de chercher à résoudre le grand système conjoint comme S_G (système (8)), on considère N problèmes de viabilité individuelle couplés par les variables du niveau collectif. Chaque individu considère les variables et les actions des autres comme des perturbations de son propre système. Chaque individu choisit ses actions en fonction de son état et des variables de l'environnement, sans se synchroniser avec les autres. Cela revient à écrire N systèmes S_i pour $i \in \mathcal{N}$, en notant $x \in \mathbb{R}^n$ la variable globale qui représente l'environnement et qui lie les différents individus ($x = (L, P)$) dans l'exemple du lac) :

$$(S_i) \begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x(t), v_i(t) = (x_j(t))_{j \in \mathcal{N}}, (u_j(t))_{j \in \mathcal{N}}) \\ \frac{dx_i}{dt} = f_i(x(t), x_i(t), u_i(t)) \\ (x, x_i) \in K \times K_i \\ u_i \in U_i(x, x_i) \\ v_i(t) = ((x_j(t))_{j \neq i}, (u_j(t))_{j \neq i}) \in V_i(x(t)), \text{ avec } x_j \in K_j \text{ et } u_j \in U_j(x, x_j) \end{cases} \quad (9)$$

Les ensembles $V_i(x)$ représentent les *tyches* auxquels est confronté l'individu i . Dans le cas du lac, seules les actions des autres interviennent dans la dynamique de (L, P) , donc $v_i = (u_j)_{j \in \mathcal{N} \setminus i}$. Les différents individus partagent avec les autres ce qu'ils peuvent faire (la carte U_i), mais pas les valeurs des contrôles qu'ils mettent en œuvre. Avec ces informations, chacun résout son problème de viabilité garantie S_i (9) dans $K \times K_i$, dont la dimension est $n + n_i$, au lieu de $n + \sum_{i \in \mathcal{N}} n_i$ pour le système global complet. Si un état (x, x_i) est dans le noyau garanti de l'individu i , noté $G_i(K \times K_i)$, cela veut dire que, quelles que soient les actions des autres, l'individu i (donc l'environnement) peut rester viable. Si tous les noyaux garantis individuels $G_i(K \times K_i)$ sont non vides, alors l'ensemble de tous les états $x \in K$ de l'environnement qui apparaissent dans tous les noyaux de viabilité garantis G_i pour tout $i \in \mathcal{N}$ permet de définir un domaine viable D pour le « grand » problème S_G (8) de viabilité conjointe, sans demander de synchronisation entre les acteurs :

$$D := \bigcup_{x \in K} (\{x\} \times (\prod_{i=1}^N (G_i(K \times K_i) \cap (\{x\} \times \mathbb{R}^{n_i})))_{|\mathbb{R}^{n_i}})) \quad (10)$$

Ce domaine est nécessairement inclus dans le noyau de viabilité du problème global conjoint S_G (puisque'il ne demande pas de synchronisation entre acteurs). Comme il impose cette contrainte supplémentaire, il peut être plus facilement vide. Mais il est possible d'explorer l'espace des problèmes possibles pour rechercher un domaine non vide en utilisant un mécanisme d'engagement. Si un individu i prend un *engagement* sur les efforts qu'il est prêt à faire dans certaines circonstances (c'est-à-dire en utilisant une carte de contrôle telle que $\exists (x, x_i) \in K \times K_i, \hat{U}_i(x, x_i) \subsetneq U_i(x, x_i)$), il diminue sa flexibilité. Mais l'incertitude des autres (les *tyches* de leur $V_j, j \neq i$) sera réduite. Si tous les acteurs prennent des engagements, la flexibilité de chacun est réduite ainsi que leur incertitude (les *tyches*), ce qui ouvre davantage de possibilités pour que le domaine viable non synchronisé D (équation (10)) soit non vide.

5. Conclusion

La théorie de la viabilité propose un cadre pour étudier des problèmes de gestion durable, de transition, d'optimisation sous contrainte dynamique. Par sa définition, le noyau de viabilité permet la recherche de solutions durables au sens du rapport Bruntland. Le fait que la théorie de la viabilité s'intéresse à la compatibilité entre la dynamique et les contraintes en tout temps ne signifie pas que la solution d'un problème de viabilité est nécessairement figée. Un problème peut être révisé à tout moment, en cas de modification des contraintes, de la dynamique ou des moyens d'action. Si de nouveaux moyens d'action sont disponibles, le noyau de viabilité peut être plus grand et peut permettre d'atteindre des états qui jusqu'alors étaient interdits. Mais la résolution en temps infini permet d'assurer que si ces nouveaux moyens sont disponibles à un moment donné dans le futur, le système sera toujours dans le noyau de viabilité à ce moment-là, sans faire de pari sur la date de disponibilité.

La théorie de la viabilité propose une vision de l'optimisation dans laquelle les contraintes de viabilité sont respectées dynamiquement : il n'y a pas de substitution entre les différentes contraintes de viabilité. Avec les mécanismes de gestion ensembliste des incertitudes, cela ouvre un champ de recherche pour la résolution de problèmes de gestion de ressources par de multiples acteurs auxquels notre époque est particulièrement confrontée. D'une manière plus générale, la théorie de la viabilité invite à penser différemment : s'interroger sur les contraintes à respecter, les moyens qu'on s'autorise, plutôt que de rechercher immédiatement la trajectoire qui maximise un critère ; réfléchir aux engagements qu'on peut prendre sur ses actions pour qu'une ressource commune et d'autres acteurs restent viables, sans se mettre soi-même en danger. La viabilité s'intéresse à un ensemble de « possibles » à partir duquel on peut se poser de nouvelles questions.

La limite principale à l'application de la théorie de la viabilité reste la malédiction de la dimension à laquelle sont soumis les algorithmes d'approximation du noyau. Mais les succès de l'apprentissage profond peuvent inciter à des résolutions différentes qui pourront peut-être permettre de contourner cette barrière dans un avenir proche.

Remerciements et remarques

Je remercie l'AEIS pour son invitation, qui m'a donné l'occasion de présenter la théorie de la viabilité à un public scientifique non-spécialiste.

Je remercie Guillaume Benailly, du service d'archéologie de l'ONF, pour les documents qu'il m'a fait parvenir en lien avec les tranchées de la forêt de Sénart pendant la Grande Guerre. Je remercie Alain Rapaport d'INRAE, pour sa présentation de l'exploitation forestière, ainsi qu'Olivier Dabas pour la relecture.

Beaucoup des articles cités dans ce chapitre sont librement disponibles sur les plateformes [HAL](#) ou [arxiv](#).

Références

- [1] G. Brundtland, Our Common Future [The Brundtland Report], Oxford University Press, Oxford, 1987. https://fr.wikisource.org/wiki/fr:Notre_avenir%C3%A0_tous_-_Rapport_Brundtland
- [2] D. H. Meadows, D. L. Meadows, J. Randers, W. Behrens, The limits to growth, Club de Rome, 1972. <https://www.library.dartmouth.edu/digital/digital-collections/limits-growth>
- [3] C. Plin l'ancien, Histoire naturelle, in site de Philippe Remacle, 77. <https://remacle.org/bloodwolf/erudits/plineancien/livre33.htm>
- [4] Ordonnance de brunoy sur wikipedia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ordonnance_de_Brunoy
- [5] L. Chancelrel, Exploitations forestières militaires de la région de Sénart. Rapport d'inspection (1915).
- [6] Service archéologique de l'ONF, Sénart, forêt retranchée. Guide de l'exposition à la Faisanderie de Sénart, ONF, 2008.

- [7] J.-P. Aubin, *Viability Theory*, Birkhäuser, Basel, 1991.
- [8] P. Saint-Pierre, Approximation of the viability kernel, *Applied Mathematics and Optimization* 29 (2) (1994) 187–209.
- [9] Vollenweider, coord. Eutrophisation des eaux. Méthodes de surveillance et d'évaluation de lutte, Tech. rep., OCDE (1982).
- [10] S. R. Carpenter, D. Ludwig, W. A. Brock, Management of eutrophication for lakes subject to potentially irreversible change, *Ecological Applications* 9 (1999) 751–771.
- [11] W. Liu, S. Wang, L. Zhang, Z. Ni, Water pollution characteristics of Dianchi Lake and the course of protection and pollution management, *Environmental Earth Sciences* 74 (5) (2015) 3767–3780. <https://doi.org/10.1007/s12665-015-4152-x>
- [12] S. Martin, The cost of restoration as a way of defining resilience: a viability approach applied to a model of lake eutrophication, *Ecology and Society* 2 (9) (2004) 8. <http://www.ecologyandsociety.org/vol9/iss2/art8>
- [13] A. Brias, J.-D. Mathias, G. Deffuant, Inter-annual rainfall variability may foster lake regime shifts : An example from Lake Bourget in France, *Ecological Modelling* 389 (2018) 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2018.10.004>
- [14] R. Sabatier, L. Oates, R. Jackson, Management flexibility of a grassland agroecosystem: A modeling approach based on viability theory, *Agricultural Systems* 139 (2015) 76–81. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.06.008>
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0308521X15300032>
- [15] J.-D. Mathias, B. Bonté, T. Cordonnier, F. de Morogues, Using the Viability Theory to Assess the Flexibility of Forest Managers Under Ecological Intensification, *Environmental Management* 56 (5) (2015) 1170–1183. <https://doi.org/10.1007/s00267-015-0555-4>
- [16] J. Aubin, A. Bayen, P. Saint-Pierre, *Viability Theory : New Directions*, Springer, 2011.
- [17] I. Alvarez, S. Martin, Geometric robustness of viability kernels and resilience basins, in : G. Deffuant, N. Gilbert (Eds.), *Viability and Resilience of Complex Systems, Understanding complex systems*, Springer, 2011, pp. 193–218. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20423-4>
- [18] M. Falcone, P. Saint-Pierre, Slow and quasi-slow solutions of differential inclusions, *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications* 11 (3) (1987) 367–377. [https://doi.org/10.1016/0362-546X\(87\)90052-6](https://doi.org/10.1016/0362-546X(87)90052-6)
- [19] S. Martin, G. Deffuant, J. Calabrese, Defining resilience mathematically : from attractors to viability, in : G. Deffuant, N. Gilbert (Eds.), *Viability and Resilience of Complex Systems, Understanding complex systems*, Springer, 2011, pp. 15–36.
- [20] J. Anderies, C. Folke, B. Walker, E. Ostrom, Aligning Key Concepts for Global Change Policy: Robustness, Resilience, and Sustainability, *Ecology and Society* 18 (2). <https://doi.org/10.5751/ES-05178-180208>
<https://www.ecologyandsociety.org/vol18/iss2/art8/>
- [21] S. Martin, I. Alvarez, Anticipating shocks in the state space: Characterizing robustness and building increasingly robust evolutions, *SIAM Journal on Control and Optimization* 57 (1) (2019) 490–509. <https://doi.org/10.1137/16M1061175>
- [22] I. Alvarez, L. Zaleski, J.-P. Briot, M. de A. Irving, Collective management of environmental commons with multiple usages: A guaranteed viability approach, *Ecological Modelling* 475 (2023) 110186. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2022.110186>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304380022002848>

- [23] L. Doyen, Lipschitz Kernel of a Closed Set-Valued Map, *Set-Valued Analysis* 8 (1) (2000) 101–109. <https://doi.org/10.1023/A:1008722524668>
- [24] F. Lavallée, Thèse, Ph.D. thesis, Sorbonne Université, Modélisation, exploration de modèles, théorie de la viabilité pour l'aide à la gestion des espèces végétales invasives : application au cas des renouées asiatiques le long d'un cours d'eau. (2020). https://theses.hal.science/tel-03836187v1/file/manuscrit_th%C3%A8se_Lavall%C3%A9e.pdf
- [25] S. Martin, I. Alvarez, Solving viability problems in dynamic games using individual strategies derived from guaranteed viability kernels : application to an agricultural cooperative model, *Automatica*. To appear.
- [26] L. Doyen, De Lara, Michel, Stochastic viability and dynamic programming, *Systems and Control Letters* 59 (10) (2010) 629–634, arXiv : 1002.1140.
- [27] J.-C. Alais, P. Carpentier, M. De Lara, Multi-usage hydropower single dam management: chance-constrained optimization and stochastic viability, *Energy Systems* 8 (1) (2017) 7–30. <https://doi.org/10.1007/s12667-015-0174-4>
- [28] N. Fellmann, C. Blanchet-Scalliet, C. Helbert, A. Spagnol, D. Sinoquet, Kernel-based sensitivity analysis for (excursion) sets, *Technometrics* (2024) 1–13. <https://doi.org/10.1080/00401706.2024.2336537>
- [29] A. Oubraham, G. Zaccour, A Survey of Applications of Viability Theory to the Sustainable Exploitation of Renewable Resources, *Ecological Economics* 145 (2018) 346–367. doi:10.1016/j.ecolecon.2017.11.008. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800917301386>
- [30] A. Rapaport, J. Terreaux, L. Doyen, Viability analysis for the sustainable management of renewable resources, *Mathematical and Computer Modelling* 43 (5-6) (2006) 466–484. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2005.12.014> <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0895717705005455>
- [31] C. Sanogo, S. Ben Miled, N. Raissi, Viability Analysis of Multi-fishery, *Acta Biotheoretica* 60 (1) (2012) 189–207. <https://doi.org/10.1007/s10441-012-9153-5>
- [32] E. Ostrom, *Gouvernance des biens communs* (traduction française de l'original de 1990), Deboeck supérieur, 2010.
- [33] J. C. Péreau, L. Doyen, L. R. Little, O. Thébaud, The triple bottom line : Meeting ecological, economic and social goals with individual transferable quotas, *Journal of Environmental Economics and Management* 63 (3) (2012) 419–434. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2012.01.001>

Troisième partie :

Questions d'énergie

Les activités humaines affectent nécessairement l'environnement des sociétés. Cela peut entraîner des conséquences néfastes qu'il convient d'éliminer ou au moins de minimiser pour garantir la pérennité de l'espèce humaine.

L'environnement dépend fortement de l'atmosphère qui nous entoure et sert de couverture chauffante pour maintenir une température compatible avec l'existence des êtres vivants tels que nous les connaissons. Sa composition a joué un rôle déterminant dans l'évolution du climat comme dans le développement de la vie sur Terre. Il y a quelque 500 millions d'années, moins de CO₂ et plus d'oxygène, et ce fut l'explosion cambrienne associée à une planète au climat le plus souvent tempéré.

On observe depuis le milieu du siècle dernier une tendance forte à une élévation rapide de la température moyenne de la Terre que la science du climat attribue à un excès dans l'atmosphère de CO₂ rejeté par les activités humaines.

La climatologie, science qui traite de toutes ces constatations, est une science complexe, encore jeune, qui s'enrichit sans cesse de nouveaux apports théoriques et observationnels. Il est indispensable de la maîtriser pour à la fois déterminer les causes des évolutions passées et préconiser les actions, à l'échelle globale comme à l'échelle locale, par lesquelles la planète restera pour longtemps habitable. Il ne s'agit rien moins que de donner à l'humanité les moyens d'influer sur cette partie importante de son environnement afin d'éviter une évolution hors de contrôle. Les décisions à prendre doivent être fondées sur l'expertise scientifique, échappant ainsi au catastrophisme idéologique comme au « climato-dénialisme ». L'objectif est une réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre, dont le CO₂.

Dans ce contexte, les systèmes énergétiques sont concernés au premier chef. L'espèce humaine est entrée dans l'ère industrielle au cours du dernier tiers du XVIII^e siècle et n'a cessé depuis d'amplifier une transformation sociétale qui apporte aux populations richesse matérielle et bien-être, encore inégalement répartis. Un tel développement est étroitement corrélé à sa consommation d'énergie. Au travail animal et humain s'est ajoutée dans des proportions considérables la combustion de charbon, de pétrole et de gaz qui représentent encore aujourd'hui 80 % des sources d'énergie que nous utilisons.

Une conséquence fâcheuse est une augmentation significative et particulièrement rapide de la teneur en CO_2 de l'atmosphère qui continue de croître bien au-delà de la plage de variation historique, déterminée pour le dernier million d'années écoulé par l'analyse des carottes de glace prélevées au Groenland et en Antarctique.

L'espèce humaine, par ses activités, influence donc le climat dans un sens qu'un large consensus juge défavorable. Et doit donc réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre dont le CO_2 . Un remède préconisé pour ce faire est simple dans son principe : décarboner l'économie à commencer par les sources d'énergie. En raison, entre autres, de l'inertie propre aux sociétés humaines, de l'influence des lobbys et des idéologies, sans compter les obstacles techniques ou économiques, la mise en application s'avère cependant délicate et semée d'embûches. Une idée simple prévaut cependant : la nécessité s'impose de recourir de plus en plus au vecteur électrique, gage d'efficacité, dans la mesure où les générateurs tirent leur énergie de sources décarbonées.

Les contributions à cette partie sont des coups de projecteur sur la façon dont des technologies basées sur la science la plus avancée de notre temps pourraient contribuer à une décarbonation massive.

C'est ainsi que, dans le premier chapitre, Franck Carré examine les perspectives à long terme (fin du siècle) d'un électronucléaire en pleine renaissance afin d'en montrer la durabilité sur divers plans, contrairement aux affirmations de multiples contestataires, certains ne l'acceptant au mieux que comme énergie de transition. L'avenir d'une industrie nucléaire, forte de sa quasi-absence d'émission de gaz à effet de serre, dépend de sa capacité à répondre à une demande de chaleur et d'électricité qui ne peut que croître avec le développement des sociétés, tout en combattant victorieusement les craintes qu'elle suscite toujours. À cet égard, la quatrième génération de réacteurs utilisant des neutrons rapides permettra une forte réduction des volumes de déchets radioactifs ultimes tout en garantissant la pérennité de la ressource pour des millénaires.

Dans un deuxième chapitre, Jean-Louis Bobin traite de la question de la fusion nucléaire. Dans la mesure où l'on parviendra à la maîtriser et à la rendre économiquement compétitive, la fusion nucléaire apparaît comme une solution à très long terme, au-delà sans doute de la fin du XXI^e siècle. En l'absence de programmes prioritaires, les avancées sont bien réelles, mais lentes vers une production d'une énergie de fusion supérieure à l'énergie nécessaire à mettre en condition le combustible thermonucléaire. Sur la voie du confinement magnétique, le réacteur ITER en construction à Cadarache n'aboutira pas à ce résultat avant plusieurs années. Sur la voie du confinement inertiel, le récent succès obtenu à Livermore auprès d'un laser de la classe mégajoule (National Ignition Facility), tout prometteur qu'il soit, est encore très loin de compte.

Le troisième chapitre est consacré aux applications parmi les plus spectaculaires de ces instruments emblématiques de la science et de la technologie contemporaines que sont les lasers. Ses recherches sur la « lumière extrême », et les procédés mis au point pour la produire à haute puissance ont valu à Gérard Mourou, l'auteur du chapitre, le prix Nobel de physique en 2018. Cette lumière extrême, par les plages de densité d'énergie et de fréquences que l'on ne pouvait jusqu'alors pas atteindre, ouvre de nouveaux champs d'investigation dans de nombreux domaines s'étendant des applications médicales jusqu'à la physique fondamentale. Des recherches sont en cours pour appliquer ces techniques lasers au domaine nucléaire avec, ici encore, l'objectif de

déboucher sur une énergie nucléaire abondante et « propre ».

Le dernier chapitre concerne une table ronde autour des questions de transition énergétique, d'écologie et de prise en compte de ces questions par les sociétés. Il présente d'abord une synthèse des points de vue des trois intervenants conviés à cette table ronde, Denis Bonnelle, Claire Kerboul et Philippe Kourilsky, puis retrace les nombreux échanges avec l'auditoire. Un des points à retenir est que – s'il est vain de croire que la science seule permettra de surmonter tous les problèmes que pose la crise climatique, car y parvenir suppose des choix éthiques et politiques – sans la science, c'est la certitude de n'en résoudre aucun.

Atouts potentiels des nouveaux réacteurs nucléaires pour le développement durable

Frank Carré

Conseiller scientifique de la direction des énergies du CEA

Abstract

After recalling the doubts and opposition that emerged following the Fukushima disaster, the document explores the potential advantages of new nuclear reactors. It highlights the importance of nuclear energy in achieving carbon neutrality, emphasizing its complementary role to renewable energies in replacing fossil fuels. France, with its experience and infrastructure, is well-positioned to adapt nuclear energy to current and future needs, particularly through the development of small modular reactors (SMRs) and cogeneration of heat. The document also addresses the challenges to be met; firstly, dealing with the increasing complexity of energy networks, resulting from the diversification of sources, needs, and uses, and the specific times associated with each. It discusses the challenges posed by the management of radioactive waste and the need for international harmonization of safety standards. It also addresses the necessity of deploying nuclear energy beyond already equipped countries and supporting newcomer countries, which involves strengthening the role of the IAEA. The document then reviews new nuclear energy production techniques and their gradual implementation in different parts of the world. Finally, it highlights the contributions of nuclear sciences to other areas of sustainable development, such as medicine, food security, and natural resource management.

1. Apport essentiel de l'énergie nucléaire pour atteindre la neutralité carbone

Après avoir connu un désintérêt, voire une opposition, dans le monde occidental après le Tsunami qui a frappé la centrale de Fukushima (11 mars 2011) et le développement de l'utilisation du gaz de schiste bon marché aux États-Unis, l'énergie nucléaire bénéficie depuis quelques années d'un regain d'attention pour sa capacité à produire en quantité une électricité décarbonée pilotable, à même de s'adapter à la production variable des énergies solaire et éolienne en développement rapide. Depuis 2018, de nombreux organismes de référence témoignent de l'enjeu de développer la complémentarité des sources d'électricité bas carbone (énergies renouvelables et nucléaire) pour remplacer le gaz et le charbon qui contribuent encore pour 60 % à la production d'électricité dans le monde et progresser vers la neutralité carbone [1–7]. En France, c'est le discours du président de la République du 10 février 2022 à Belfort sur la politique de l'énergie, puis la loi relative à l'accélération de la production d'énergies renouvelables et celle relative aux procédures liées à la construction de nouvelles installations nucléaires qui ont relayé puis concrétisé cet enjeu (lois n° 2023-175 et 2023-491 des 10 mars et 22 juin 2023). Plus récemment, c'est la communication de 22 pays en marge de la 28^e conférence climatique qui l'ont réaffirmé [3].

Les scénarios d'évolution vers la neutralité carbone publiés par l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) [4], présentés figure 1, prévoient une croissance jusqu'à 65 % des parts des énergies solaire et éolienne dans la production mondiale d'électricité appelée à plus que doubler d'ici 2050 avec des contributions de l'hydroélectricité et du nucléaire assez stables (13 % et 10 % respectivement). Cette projection conduit à prévoir une augmentation de la puissance électronucléaire installée dans le monde de 400 GWe aujourd'hui à 800 voire 1000 GWe en 2050. Ces scénarios montrent aussi la difficulté de décarboner la chaleur pour l'habitat et l'industrie, ainsi que l'énergie pour les transports (qui chacune représente de l'ordre de 35 % de la demande en énergie finale), et soulignent le besoin de développer le captage direct du CO₂ de l'atmosphère par la biomasse pour parvenir effectivement à la neutralité carbone. Ce contexte appelle à considérer les apports possibles de l'énergie nucléaire aux secteurs difficiles à décarboner, au-delà de sa contribution à travers l'électrification des usages qui permet le remplacement d'une part du gaz utilisé pour la production de chaleur et du pétrole pour les transports.

Ces scénarios incitent à étudier l'élargissement de la production nucléaire à la fourniture de chaleur, ainsi qu'à d'autres productions telles que celles d'hydrogène et de carburants de synthèse élaborés à partir de la biomasse ou de CO₂ recyclé pour être neutres en carbone. La cogénération de chaleur nucléaire a déjà été largement mise en œuvre dans de nombreux pays pour le chauffage urbain (ex-Union soviétique, Europe de l'Est, Scandinavie, Suisse...) et pour le dessalement de l'eau de mer (Inde, Japon, Kazakhstan...). Elle a aussi été utilisée par certaines industries telles que l'extraction du sel en Allemagne (centrale de Stade 1972-2003) et la production d'eau lourde au Canada (usine de Bruce (1979-1997)). Elle a aussi donné lieu à des expérimentations très avancées à la fin des années 1980 pour la production de gaz de synthèse à partir de lignite et de charbon en utilisant la chaleur du réacteur à haute température THTR-300 (Thorium High Temperature Reactor (300 MWe)) en Allemagne.

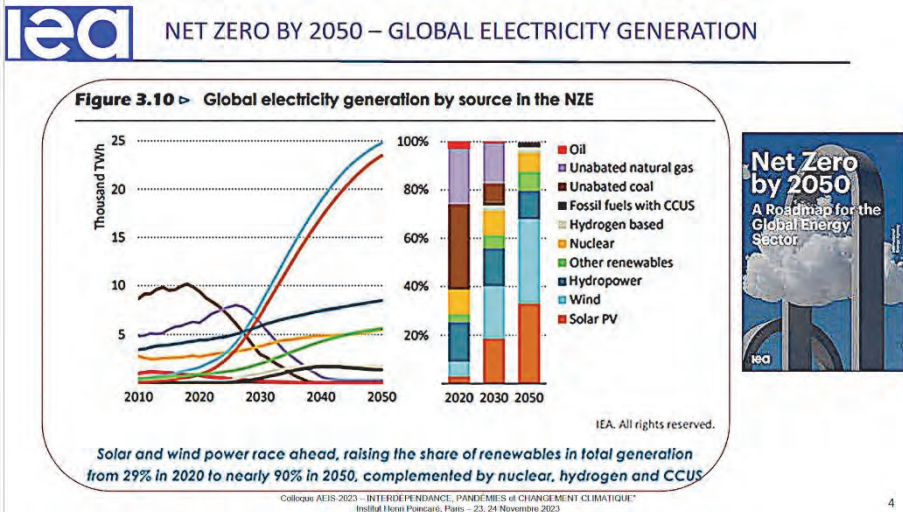


Figure 1. Scénario de l'Agence Internationale de l'Énergie pour décarboner la production mondiale d'électricité à l'horizon 2050 [4].

2. La France : bien placée pour adapter l'énergie nucléaire aux besoins d'un développement durable

Avec l'expérience acquise depuis 1970 sur le parc électronucléaire et les usines du cycle du combustible nucléaire, la France peut jouer un rôle de précurseur pour explorer l'étendue des apports possibles de l'énergie nucléaire à l'objectif de décarbonation durable (figure 2). Elle produit aujourd'hui une électricité décarbonée à plus de 90 % et a adapté depuis 40 ans la plupart de ses centrales nucléaires à un régime de fonctionnement flexible qui permet le suivi de charge et prépare au besoin de flexibilité accru rendu nécessaire par les variations des énergies solaire et éolienne au cours de la journée et en fonction des conditions météorologiques.

De plus, avec le traitement des combustibles usés qu'elle pratique depuis les années 1970, la France assure une gestion durable des matières nucléaires recyclables et des déchets radioactifs appelée à être complétée vers 2030 par le stockage géologique (CIGEO) dédié aux déchets de haute activité et à vie longue. D'autre part, son projet de petit réacteur modulaire Nuward™ (540 MWth/170 MWe) permettra d'expérimenter différents apports de l'énergie nucléaire complémentaires à la production actuelle centrée sur la forte puissance électrique pour les grands réseaux. Il en va de contributions à l'équilibrage du réseau électrique au niveau régional, comme des capacités de fournitures diversifiées pour des usages locaux ou nationaux (électricité, chaleur domestique ou industrielle, hydrogène, carburants de synthèse...).

LA FRANCE : LABORATOIRE DE DÉCARBONATION DURABLE AVEC LE NUCLÉAIRE

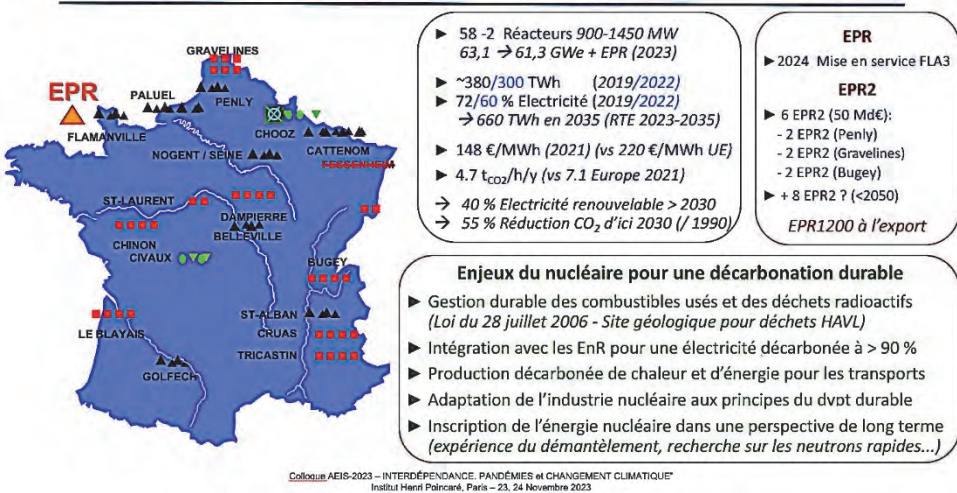


Figure 2. Situation de l'énergie nucléaire en France bien avancée sur la voie des défis à relever pour une décarbonation durable.

Enfin, la volonté de conformer l'énergie nucléaire aux principes du développement durable se traduit aussi par la décision du Groupement des Industriels Français de l'Industrie Nucléaire (GIFEN) de développer l'économie circulaire au sein de la filière, notamment en recyclant des métaux de très faible activité provenant du démantèlement des réacteurs. Cette volonté s'inscrit aussi dans le long terme avec l'acquisition d'une expérience du démantèlement des réacteurs, et les recherches sur les réacteurs à neutrons rapides qui permettront à terme d'économiser radicalement

les ressources en uranium naturel et de réduire au minimum la production de déchets radioactifs à vie longue.

3. Défis à relever pour déployer au plus tôt le potentiel de décarbonation du nouveau nucléaire

Le parc nucléaire est appelé à réduire son rôle actuel de pilote du réseau électrique national à mesure que ce réseau se développe en multipliant les connexions à des sources d'énergies renouvelables variables et prioritaires, à la fois organisées en centrales solaires ou éoliennes, et réparties de façon diffuse parmi l'habitat. À cette évolution forte qui renforce le besoin d'anticipation et de capacité à gérer la complexité dans le pilotage du réseau s'ajoutent d'autres transformations qui renforcent ce même besoin, telles que la diversification des usages de l'électricité dont certains sont bidirectionnels (véhicules électriques) et le développement d'autres réseaux d'énergie (chaleur, hydrogène, hydrocarbures de synthèse...) équipés de capacités de stockage et d'inter-conversion (figure 3).

Une étude de l'Agence Nationale de Coordination de la Recherche pour l'Énergie (ANCRE) [7] a évalué à 110 TWh les besoins de chaleur industrielle en dessous de 250 °C en France et à 22 TWh la part de ces besoins correspondant à des sites industriels situés à moins de 100 km de centres de production nucléaire en identifiant des besoins annuels de 2 à 3 TWh autour des centrales de Penly, Tricastin, Paluel, Cruas, Bugey et St-Alban, et de 5 TWh à proximité de la centrale de Gravelines (figure 4). Ces besoins, qui correspondent à des fournitures de 300 à 700 MWth pendant 7000 heures par an, confirment l'apport potentiel de petits réacteurs tels que Nuward™ (540 MWth) à la décarbonation de l'industrie, en complément des recherches de progrès en matière d'efficacité énergétique.

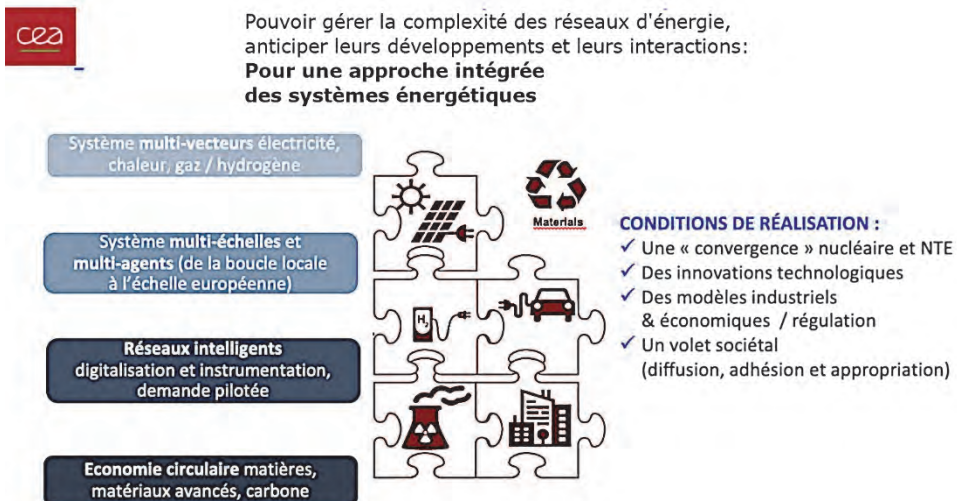


Figure 3. Diversité des applications envisageables avec les petits réacteurs modulaires pour décarboner l'économie : production flexible d'électricité en région, production décarbonée de chaleur, d'hydrogène et de carburants de synthèse.

En France, l'avenir du parc électronucléaire s'envisage à moyen terme avec la construction de 3 paires de réacteurs EPR2 (1650 MWe) sur les sites de Penly, Gravelines et Bugey, dont le premier devrait démarrer en 2035, suivie dans un deuxième temps par celle de 4 autres paires d'EPR2. En parallèle du déploiement de ces réacteurs de 3^e génération, le programme de Grand Carénage engagé par EDF en 2014 contribue à rénover et à moderniser les centrales nucléaires existantes pour prolonger leur durée d'exploitation en toute sûreté jusqu'à 50 ou 60 ans et répondre, avec le développement des énergies renouvelables puis celle du nouveau nucléaire, à une demande électrique en forte croissance (640 TWh en 2035 [5, 6] représentant une augmentation de 30 % par rapport à la production de 2023 (~500 TWh)). À ces réacteurs de forte puissance pourraient s'ajouter à partir de 2035 quelques GW de petits réacteurs modulaires (SMR¹) tels que NuwardTM sur des sites non prévus pour accueillir des EPR2. Les besoins de recrutement sur les 10 prochaines années pour réaliser ce programme sont évalués à 100 000 professionnels de tous les corps de métier couvrant les études, la construction et l'exploitation des installations nucléaires.

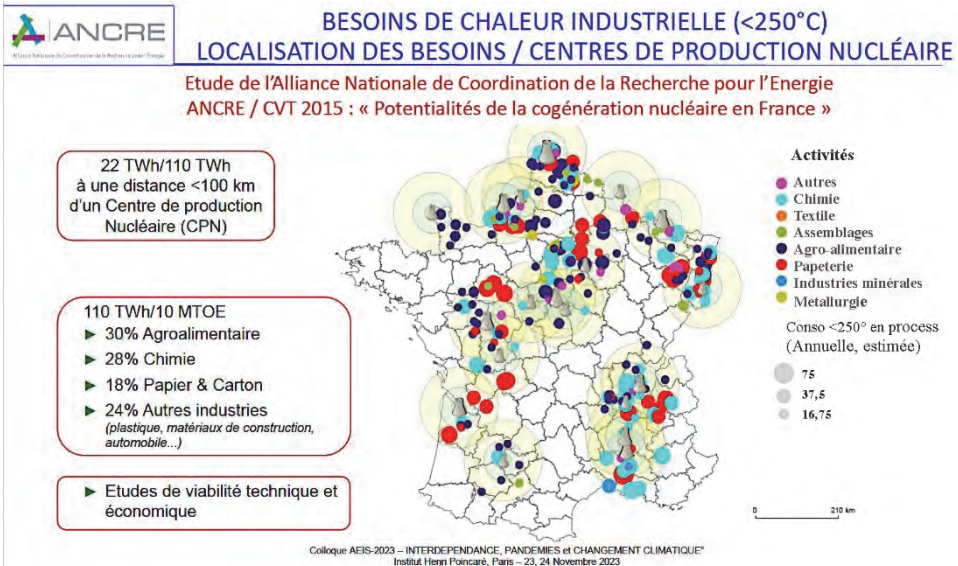


Figure 4. Recensement des besoins en chaleur industrielle (< 250 °C) en France et de leur situation géographique par rapport aux centres de production nucléaire existants.

À l'échelle mondiale, la croissance anticipée de la puissance installée de 380 GWe à 800 voire 1000 GWe d'ici 2050 s'envisage avec une diversité de modèles de réacteurs à eau pressurisée ou bouillante couvrant une large gamme de puissance unitaire : les réacteurs de très forte puissance (> 1400 MWe) tels qu'EPR2², APR-1400³ et ESBWR⁴ pour les réseaux électriques très interconnectés, les réacteurs de ~1000 MWe tels que

¹ SMR : Small Modular Reactor

² Framatome

³ Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP)

⁴ General Electric Hitachi Nuclear Energy

EPR-1200³, AP1000⁵, Hualong-1⁶ et SRZ-1200⁷ pour des réseaux moins interconnectés, et les réacteurs de petite ou moyenne puissance (100 à 600 MWe) adaptés aux plus petits réseaux électriques et au remplacement de centrales à charbon dans la même gamme de puissance (figure 5). La possibilité de déployer ce nouveau nucléaire jusqu'à doubler d'ici 2050 la puissance du parc électronucléaire mondial repose sur la capacité des industriels du secteur (particulièrement actifs en Russie, en Chine et en Corée) à surmonter les tensions que ce programme ne manquera pas de créer sur les infrastructures de fabrication des composants et les ressources en personnel qualifié.

PUISSANCE UNITAIRE / MARCHÉ DES NOUVEAUX RÉACTEURS

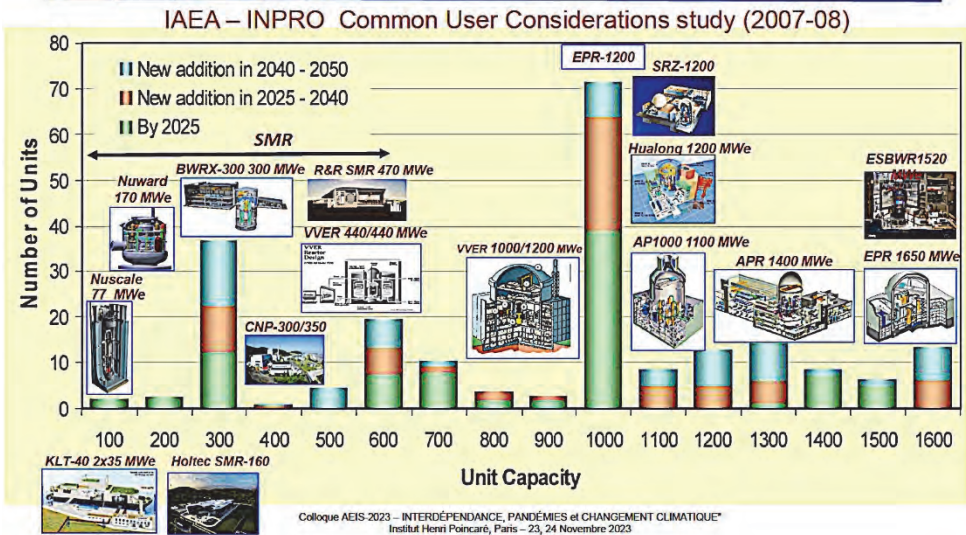


Figure 5. Principaux réacteurs de 50 à 1650 MWe sur le marché international couvrant les besoins des réseaux très interconnectés (> 1000 MWe), moyennement interconnectés (~1000 MWe), ou régionaux et locaux (< 600 MWe).

Plusieurs conditions sont nécessaires pour permettre à ce nouveau nucléaire de se déployer au mieux et d'apporter sa meilleure contribution à l'effort de décarbonation sur les prochaines décennies. Il est d'abord essentiel de tirer de façon visible les leçons des accidents nucléaires survenus à Three Mile Island (1979), à Tchernobyl (1986) puis à Fukushima (2011) en conséquence du tsunami. Il est ensuite essentiel de progresser vers un référentiel de sûreté harmonisé au plan international qui permette de qualifier les réacteurs sur le marché par rapport aux objectifs de la 3^e génération. Il est aussi essentiel, pour la plupart des pays, de pouvoir gérer en toute sûreté et sécurité les déchets radioactifs produits par l'industrie nucléaire, et en particulier de faire aboutir un projet de stockage géologique pour les déchets radioactifs de haute activité à vie longue. S'y ajoute une capacité accrue de flexibilité qui permette au nouveau nucléaire d'adapter sa production à la fois à la puissance électrique demandée par le réseau et aux productions variables des énergies solaire et éolienne. Enfin, les petits réacteurs modulaires devront démontrer leur viabilité économique pour la diversité des

⁵ Westinghouse

⁶ China General Nuclear Power Group (CGN) & China National Nuclear Corporation (CNNC)

⁷ Mitsubishi Heavy Industry

applications envisagées, et le déploiement de l'énergie nucléaire dans des pays primo-accédants rendra nécessaire, en plus d'un accompagnement par l'AIEA pour créer les institutions et les infrastructures nécessaires, d'assurer des services sécurisés pour la fourniture de combustible et la gestion des combustibles usés à travers des accords inter-gouvernementaux.

4. Recherche internationale pour déployer tout le potentiel de l'énergie nucléaire en soutien d'une économie bas carbone durable

4.1 Réacteurs à neutrons rapides

À la différence des réacteurs à eau qui consomment essentiellement de l'uranium 235, qui ne représente que 0,7 % de l'uranium naturel, les réacteurs à neutrons rapides peuvent convertir efficacement l'uranium 238 (99,3 % de l'uranium naturel) en plutonium, en partie fissile, et produire de ce fait un appoint de matière utilisable dans les réacteurs nucléaires. Cette propriété a très tôt suscité un grand intérêt qui a conduit à réaliser dès les années 1950 de premiers réacteurs expérimentaux puis des démonstrateurs refroidis au sodium, d'abord aux États-Unis et en Union soviétique, puis en Europe (France, Royaume-Uni, Allemagne et Italie) à partir de 1960, au Japon à partir de 1970 et enfin en Chine après 2000 (figure 6). Les motivations ont d'emblée été la production de matière pour les applications militaires et la vision d'un nucléaire capable d'utiliser tout le potentiel énergétique de l'uranium et de s'inscrire dans une perspective pluriséculaire, plutôt que de l'ordre du siècle comme c'est le cas aujourd'hui pour les réacteurs à eau en exploitation ou en projet compte tenu des ressources en uranium assurées.

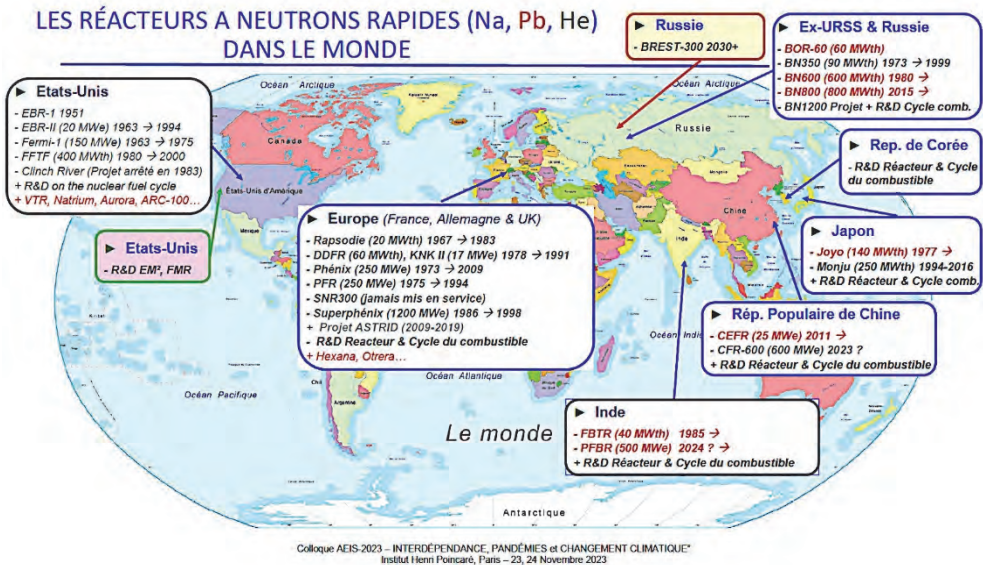


Figure 6. Cartographie des réacteurs à neutrons rapides dans le monde : réacteurs arrêtés ayant contribué au développement historique de la filière, réacteurs en fonctionnement et réacteurs en projet.

La Russie et l'Inde, suivies par la Chine, dominent aujourd'hui le développement de cette filière de réacteurs dans le monde, avec des réalisations de 500 à 800 MWe, sans pour autant maîtriser le retraitement et le recyclage du combustible usé indispensable pour utiliser tout l'uranium. Aux États-Unis, le développement s'est arrêté dans les années 1980 (prototype de Clinch River) en raison du risque de prolifération estimé résulter de la pratique du retraitement du combustible et du recyclage du plutonium (Non-Prolifération Act, 1978). Outre Atlantique, les recherches se concentrent depuis sur le traitement du combustible usé en milieu sels fondus (pyro-métallurgie) plutôt qu'en solution aqueuse.

Dans le cadre d'une coopération européenne très active, la France a largement participé au développement de cette filière avec la réalisation successive du réacteur expérimental Rapsodie (1967-1983), puis du démonstrateur Phénix (1973-2009) qui a permis des démonstrations sur le cycle du combustible, et de SuperPhénix (1986-1997) qui devait être une tête de filière industrielle et a dû être arrêté dans un contexte très hostile à l'énergie nucléaire, renforcé par l'accident de Tchernobyl (1986).

Aujourd'hui, l'utilisation complète de l'uranium avec des réacteurs à neutrons rapides reste un objectif essentiel, mais le ralentissement du développement de l'énergie nucléaire par rapport aux prévisions des années 1960 et le besoin d'élaborer une vision internationale consensuelle sur les procédés de retraitement et recyclage offrant une résistance suffisante aux risques de prolifération, détendent l'urgence et le planning dans ce domaine. Il en résulte la possibilité d'évaluer et de tester de nouvelles technologies pour les réacteurs et le cycle du combustible, et de reporter après 2050 un choix de filière instruit à la fois par l'expérience historique acquise sur les réacteurs rapides refroidis au sodium, et par les essais d'autres technologies dans un cadre de coopération internationale.

L'arrêt de Superphénix en 1997 a incité la France, à travers le CEA, à soutenir activement la création du Forum International Génération IV en y faisant une place importante aux réacteurs à neutrons rapides, et à réorienter au moins temporairement les recherches nationales pour ce type de réacteur vers la consommation de plutonium pour réduire au minimum la quantité de déchets radioactifs à vie longue à stocker en site géologique. Cette vision de réacteurs à neutrons rapides, d'abord consommateurs puis producteurs de plutonium, que seule la France pourrait mettre en œuvre avec son industrie du cycle du combustible nucléaire, a conduit la loi de programme relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (28 juillet 2006) à relancer les recherches sur ces réacteurs avec le projet ASTRID qui a soutenu de 2009 à 2019 un effort d'innovation de portée internationale pour la filière.

La filière alternative des réacteurs à neutrons rapides refroidis au plomb ou à l'alliage eutectique plomb-bismuth est née des efforts de l'Union soviétique pour accroître les performances des sous-marins nucléaires. Avec le projet BREST-300 (300 MWe) en Russie, elle connaît aujourd'hui une première réalisation pour la production de puissance dont le démarrage est annoncé pour 2026. Plusieurs start-up proposent par ailleurs des réacteurs modulaires de 30 à 200 MWe du même type utilisant un combustible uranium ou mixte uranium-plutonium pour la fourniture d'électricité et de chaleur. Une démarche comparable, portée à la fois par le Forum International Génération IV et certaines start-up, explore l'adaptation aux neutrons rapides de la technologie des réacteurs à sels fondus héritée du réacteur MSRE⁸ expérimenté de 1965 à 1969 au Laboratoire National d'Oak Ridge.

⁸ MSRE : Molten Salt Reactor Experiment

La France s'efforce aujourd'hui de maintenir ouverte la possibilité de réaliser à moyen terme soit un démonstrateur technologique qui valorise au mieux les acquis du projet ASTRID, soit un réacteur expérimental porteur d'avancées technologiques et permettant des tests d'irradiation aux neutrons rapides dépassant les besoins de la seule filière à caloporteur sodium. Par ailleurs, elle poursuit dans le cadre de start-up l'étude de réacteurs modulaires innovants pour la fourniture d'électricité et de chaleur et participe en coopération internationale à l'évaluation d'autres filières de réacteurs à neutrons rapides, avec un effort particulier sur les réacteurs à sels fondus.

4.2 Production nucléaire étendue au-delà de la fourniture d'électricité

Dans la demande en énergie finale, l'électricité représente moins de 25 % et les secteurs difficiles à décarboner, tels que la chaleur pour le chauffage urbain et l'industrie, et les transports, qui respectivement privilégient l'utilisation du gaz et du pétrole, représentent chacun de l'ordre de ~35 %. Dans ce contexte, il convient de s'interroger sur les contributions possibles de l'énergie nucléaire à la décarbonation de ces secteurs.

La cogénération de chaleur par des réacteurs à eau pour le chauffage urbain est d'un usage courant dans les pays de l'ex-Union soviétique et de l'Europe du Nord. Elle est également exploitée en Inde, au Japon et en Asie pour le dessalement de l'eau. Elle a été plus rarement utilisée pour des applications industrielles, avec les exceptions notables dans les années 1980 de la centrale de Stade pour l'industrie saline en Allemagne et de la centrale de Bruce pour la production d'eau lourde par distillation au Canada.

La filière des réacteurs à haute température (HTR), qui a été expérimentée jusqu'à 300 MWe en Europe et aux États-Unis dans les années 1960 à 1980, puis par le Japon (HTTR⁹, 30 MWth) et la Chine (HTR-10, 10 MWth) depuis 1998 a vu son intérêt confirmé par le Forum International Génération IV, notamment pour la fourniture de chaleur industrielle à haute température (850 °C). La figure 7 présente le panorama des réacteurs de cette filière dans le monde. L'ouverture vers une production non exclusivement électrogène avait déjà conduit dans les années 1980 à des développements très avancés autour du réacteur THTR-300 en Allemagne pour la gazéification du charbon et du lignite (projet PNP¹⁰). Cette vision trouve aujourd'hui son prolongement dans bon nombre de projets de start-up sur le continent américain et en Europe qui associent le potentiel de haute température aux caractéristiques de sûreté renforcées de ce type de réacteur pour en faire une source de chaleur décarbonée privilégiée pour l'industrie agroalimentaire, la pétrochimie, la production d'hydrogène et celle de gaz ou carburants de synthèse.

Les recherches d'innovation en matière de chaleur nucléaire s'étendent également à l'étude de systèmes associant un réacteur à deux stockages thermiques en sels fondus, capables d'accumuler un excédent de chaleur pendant les heures de faible demande d'électricité et de produire, avec l'appoint du stockage, plus que la puissance du réacteur pendant les heures de pointe de consommation électrique. Le système Natrium de TerraPower prévoit de fonctionner selon ce principe avec un réacteur à

⁹ HTTR : High Temperature Engineering Test Reactor

¹⁰ PNP : Projekt Prototypanlage Nukleare Prozeßwärme

neutrons rapides refroidi au sodium de 345 MWe et un stockage thermique permettant une production de pointe de 500 MWe pendant 5 heures.

4.3 Petits réacteurs modulaires (Small & Advanced Modular Reactors (SMRs & AMRs))

Depuis une quinzaine d'années, les États-Unis ont suscité un regain d'intérêt international pour les petits réacteurs modulaires à eau (SMR) et à neutrons rapides ou à haute température (AMR) dans la gamme de 50 à 300 MWe. Le souhait de valoriser, en l'adaptant, la technologie des petits réacteurs développés pour les sous-marins nucléaires, en a certainement été l'une des motivations car c'est la seule industrie nucléaire nationale qui subsiste aux États-Unis après le regroupement des activités nucléaires de General Electric avec celles de Hitachi et de Toshiba, et celles de Westinghouse avec Toshiba (revendues en 2018 à un fonds canadien de gestion d'actifs). Beaucoup d'arguments, dont tous ne s'appliquent pas à la situation de l'Europe, sont avancés pour justifier l'intérêt des réacteurs modulaires de petite puissance : 1) ils se prêtent à une fabrication en série en usine dont la qualité peut être mieux contrôlée, 2) ils réduisent le temps d'installation sur site, 3) ils permettent d'étaler les investissements sur plusieurs modules pour un même site, 4) ils peuvent être transportés dans des régions isolées et près de sites industriels pour une fourniture diversifiée, 5) ils peuvent se substituer à des centrales électriques à charbon ou à gaz en fin d'exploitation, et 6) peuvent, s'ils sont à neutrons rapides, contribuer à optimiser par recyclage (y compris sur site) l'utilisation des ressources en combustible et la production de déchets radioactifs.

LES RÉACTEURS À HAUTE TEMPÉRATURE DANS LE MONDE

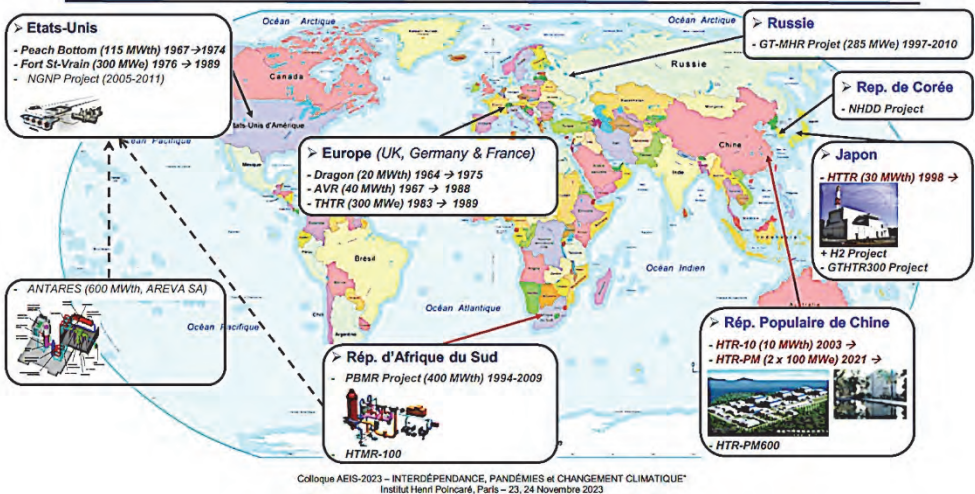


Figure 7. Cartographie des réacteurs à haute température dans le monde : réacteurs arrêtés ayant contribué au développement historique de la filière, réacteurs en fonctionnement et réacteurs en projet.

Dans le sillage de l'initiative américaine, pas moins de 70 start-up aujourd'hui dans le monde bénéficient de fonds publics et privés pour étudier des petits réacteurs de toutes les filières, en coopération plus ou moins étroite avec les Laboratoires nationaux et l'industrie nucléaires (figure 8). Ces start-up s'exposent dans les prochaines décennies

à une sélection sévère dont seuls ressortiront les modèles approuvés par les Autorités de sûreté et viables au plan économique. Malgré ce processus de sélection quasi darwinienne qui limitera les réalisations à quelques types de réacteurs nouveaux, les projets des start-up stimulent l'innovation chez tous les acteurs de la filière nucléaire (Laboratoires de recherche, Industriels vendeurs et exploitants, Autorités de sûreté...) et contribuent à promouvoir la diversification de la production d'énergie nucléaire au-delà de l'électricité.

SMRS, AMRS & MMRS POUR UN RENOUVEAU DU NUCLEAIRE ?

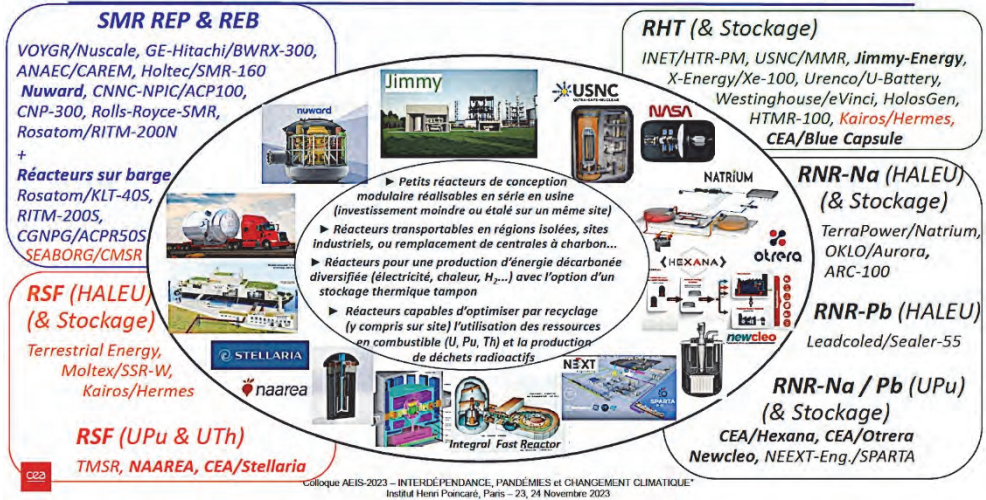


Figure 8. Cartographie des principaux projets de petits réacteurs modulaires (SMR) et réacteurs modulaires avancés (AMR) portés pour la plupart par des start-up.

4.4 Cycle du combustible nucléaire

De par l'importance des moyens à mettre en œuvre pour les recherches et les usines associées, le cycle du combustible n'est maîtrisé au niveau industriel que par un petit nombre de pays, qu'il s'agisse de l'enrichissement de l'uranium pour la fabrication du combustible (jusqu'à 20 % pour certains projets de start-up) ou du retraitement et du recyclage. De plus, le caractère sensible des procédés utilisés limite la coopération internationale, et il en résulte actuellement, pour beaucoup de nouveaux projets de réacteurs, un déficit de l'attention portée à la fabrication du combustible et à la gestion du combustible usé. La France détient dans ce domaine une avance décisive qu'elle fait valoir dans les groupes de travail internationaux sur les pratiques recommandables pour prévenir les risques de prolifération et optimiser la gestion des matières et des déchets radioactifs. Au-delà de la nature du combustible et des procédés de fabrication et de traitement associés, les recherches d'innovation portent également sur les technologies permettant d'intégrer sur un même site les réacteurs et les unités de traitement et recyclage du combustible usé, à des fins d'économie et de limitation des risques de prolifération liés aux transports.

5. Autres apports des sciences et technologies nucléaires au développement durable

Si l'énergie nucléaire apporte une contribution reconnue à la fourniture d'une énergie décarbonée, abordable et respectueuse de l'environnement, les sciences nucléaires qui ont permis son développement ont aujourd'hui beaucoup d'autres applications qui contribuent au développement durable (figure 9).

Il en va en premier lieu de la médecine nucléaire qui utilise des radio-isotopes produits dans des réacteurs et des accélérateurs de protons à la fois pour diagnostiquer des tumeurs et des maladies infectieuses et pour les traiter par radiothérapie. Ces techniques, d'un usage courant dans les pays développés, participent à l'entretien du bien-être à tous les âges et, avec bien d'autres progrès en matière de nutrition et d'hygiène, à l'augmentation de l'espérance de vie.

Il en va aussi de l'utilisation de rayonnements ionisants pour la stérilisation de matières et de denrées périssables pour leur conservation. Ce procédé est largement utilisé sous le contrôle de l'Organisation Mondiale pour la Santé par l'industrie agroalimentaire pour neutraliser les éléments nuisibles ou pathogènes dans certaines récoltes, et contribuer de ce fait à la sécurité alimentaire. Sans relation directe avec le développement durable, cette technique est aussi mise en œuvre pour conserver des œuvres d'art et des objets archéologiques.

Les rayonnements ionisants et la résonance magnétique font aussi partie de l'arsenal des techniques utilisées pour cartographier les ressources minières et les ressources en eau du sous-sol. En ce sens, ils permettent une gestion durable des ressources naturelles et des aquifères en eau.

Enfin, les analyses isotopiques qui ont permis de comprendre les mécanismes impliqués dans l'évolution naturelle du climat ont pu inspirer le recours au marquage isotopique (radioactif ou non) pour comprendre les phénomènes à l'œuvre aux niveaux atomique et moléculaire dans un grand nombre de processus physicochimiques intervenant dans les organismes vivants et dans l'environnement. Les connaissances acquises sont à l'origine de progrès continus dans les domaines de la santé (médecine et pharmacie), de l'agriculture (approches intelligentes pour améliorer les denrées alimentaires et réduire les besoins en eau et en pesticides), de la surveillance des océans (absorption du CO₂, acidification, pollution...) et d'autres écosystèmes terrestres. L'ensemble permet de guider les politiques et les comportements visant à assurer une vie saine et à préserver l'environnement, voire à le restaurer si besoin, pour un développement durable.

6. Perspectives

L'énergie nucléaire contribue pour ~10 % à l'échelle mondiale à une fourniture d'électricité décarbonée, abordable et respectueuse de l'environnement. Dans les pays à même de l'exploiter en toute sûreté et sécurité, elle est considérée, avec les énergies renouvelables, comme un pilier de la décarbonation de l'économie et de la progression vers la neutralité carbone. Cette reconnaissance, depuis une décennie à l'échelle internationale, puis plus récemment en France et en Europe [8], appelle à des

opérations de maintenance importantes pour prolonger l'exploitation du parc électronucléaire actuel et à la construction de réacteurs de nouvelle génération pour le renouveler et le développer en proportion de la demande d'électricité soutenue par l'objectif de neutralité carbone.

Au développement du parc électronucléaire s'ajoutent les perspectives ouvertes à moyen terme par les petits réacteurs modulaires pour décarboner la chaleur, l'hydrogène, et peut-être les carburants pour le transport, encore très majoritairement produits à partir de gaz et de pétrole difficiles à remplacer pour ces usages.

Le potentiel de progrès de l'énergie nucléaire reste aujourd'hui très important, tant en termes de nouvelles technologies disponibles qu'au plan de la diversification des fournitures d'énergies décarbonées et le futur à plus long terme se prépare avec un effort de recherche notable, bénéficiant de coopérations internationales importantes, sur de nouvelles filières de réacteurs dépassant les performances des réacteurs à eau.

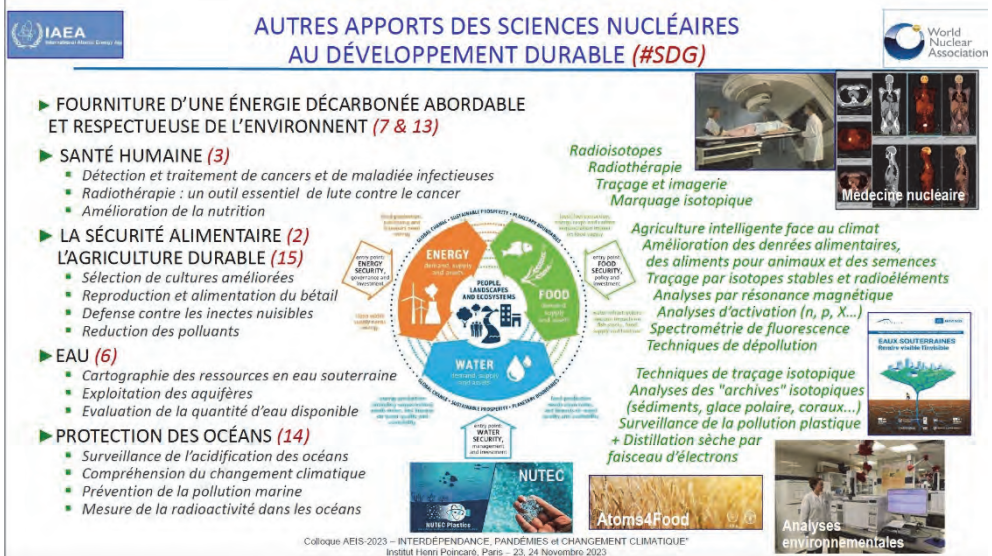


Figure 9. Apports des sciences nucléaires au développement durable en matière de santé, sécurité alimentaire, gestion durable des ressources naturelles, et surveillance des écosystèmes terrestres.

Par l'utilisation de tout le potentiel énergétique de l'uranium qu'il promet, le développement des réacteurs à neutrons rapides, mené à la fois dans la ligne de la filière historique à caloporteur sodium et à travers l'exploration d'autres approches, vise à pérenniser les apports de l'énergie nucléaire. Par l'élargissement des applications qu'il permet et la qualité de sûreté propre à sa technologie, le développement des réacteurs à haute température pourra étendre la décarbonation des usages du gaz et du pétrole. Par leur simplicité de principe et les innovations radicales qu'ils promettent en matière de gestion et de recyclage du combustible, les réacteurs à sels fondus pourront permettre de nouvelles applications et faciliter l'implantation sur le même site du réacteur et de l'installation de traitement et recyclage du combustible usé.

L'apparition de start-up s'intéressant à ces progrès contribue à stimuler l'innovation dans un secteur que les coûts de recherche et développement, et les exigences de sûreté ont rendu très conservateur. Même s'il faut s'attendre à une sélection sévère des projets

en cours, les échanges nécessaires entre start-up et acteurs historiques et les aides publiques qui leur sont consacrées feront progresser l'industrie nucléaire.

Les sciences à l'origine de l'énergie nucléaire contribuent aussi à de nombreux objectifs de développement durable afférents à la santé, la sécurité alimentaire, la gestion durable des ressources naturelles, ainsi qu'à la surveillance des océans et des divers écosystèmes terrestres. Les progrès dans tous ces domaines, tant au plan des connaissances que de l'instrumentation nécessaire, sont étroitement liés à ceux des réacteurs expérimentaux et des accélérateurs indispensables au développement de ces sciences. Les perspectives ouvertes par l'ensemble des connaissances et des applications contribuent fortement à l'attractivité nécessaire pour renouveler les générations dans le secteur de la recherche et de l'industrie nucléaires.

Forte de son expérience et de ses atouts, la France, au sein de l'Europe et au-delà, doit saisir l'opportunité du regain d'intérêt international pour l'énergie nucléaire pour promouvoir, par des recherches et des démonstrations, sa vision des apports de cette énergie et des sciences associées au service d'un développement durable, et des conditions à réunir, en termes de technologies et de réglementation internationale, pour consolider ces apports à moyen terme et les pérenniser.

Références

- 1 – The Future of Nuclear Energy in a Carbon-Constrained World (Rapport du MIT, septembre 2018)
- 2 – Communication from the EU Commission to the Parliament & the Council (Commission européenne, Novembre 2018)
- 3 – Déclaration de 22 pays à la Conférence climatique COP-28 (30 novembre – 13 décembre 2023, Dubaï)
- 4 – Net Zero by 2050 – A Roadmap for the Global Energy Sector (Rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie, Mai 2021)
- 5 – Futurs énergétiques 2050 (Rapport de Réseau de Transmission de l'Énergie, février 2022)
- 6 – Nuclear Power & Secure Energy Transitions (Rapport de l'Agence Internationale de l'Énergie, Juin 2022)
- 7 – Cogénération nucléaire – Intérêts et potentiels d'une offre de chaleur basse température pour l'industrie française (S. Sylvestre, Rapport de l'ANCRE, 1996)
- 8 – EU Taxonomy for Sustainable Activities (Juillet 2022) (https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en)

En quête du Graal : la fusion thermonucléaire contrôlée

Jean-Louis Bobin

AEIS et Sorbonne universités

Abstract

To the question: can thermonuclear fusion contribute to the urgent energy transition? the answer is *a priori* negative. However, this categorical judgment must be qualified. While the international ITER reactor is experiencing problems that are delaying the magnetic confinement program, recent advances in the field of inertial fusion offer hope.

1. Introduction

La fusion thermonucléaire contrôlée est souvent présentée comme le Saint Graal des technologies destinées à mettre des sources d'énergie à la disposition de l'humanité [1]. Alors que le XXI^e siècle est déjà bien entamé, les scientifiques en sont toujours à poursuivre des recherches initiées dans les années 1950. Cette forme d'énergie nucléaire aurait bien des avantages : le combustible est abondant ; il n'y a pas de danger d'emballement ; et les déchets radioactifs se limitent à des matériaux activés sous l'effet des neutrons, problème aisément gérable.

Mobilisée depuis le milieu du XX^e siècle, une vaste communauté internationale n'a pas encore réussi à construire un réacteur à fusion générateur d'électricité. ITER, le projet de confinement magnétique le plus avancé en ce premier quart du XXI^e siècle, ne comporte pas de couplage à un alternateur.

Plusieurs générations d'acteurs d'une aventure scientifique loin d'être terminée sont passées par des séquences d'exaltation entrecoupées de périodes de doute. L'actualité de la fin de 2022 a refocalisé l'attention sur la fusion nucléaire avec des bonnes et des mauvaises nouvelles.

Pour appréhender l'origine et les implications de celles-ci, il convient de rappeler quelques bases à partir desquelles se sont développées deux approches principales : une configuration particulière de confinement magnétique, le TOKAMAK qui conduit au projet international ITER ; le confinement inertiel avec l'utilisation des lasers de puissance de la classe mégajoule.

Lancés depuis plus d'un demi-siècle, les programmes correspondants ont produit un grand nombre de résultats. Les avancées sont significatives malgré une apparente lenteur. Des voies d'avenir se dessinent. Des entrepreneurs fondent des start-ups qui pourraient accélérer la marche vers de nouvelles sources d'énergie décarbonées.

2. Quelques rappels

Comme le montre le tableau 1, les réactions nucléaires sont susceptibles de libérer de l'énergie en quantités bien plus importantes que les réactions chimiques qui concernent des atomes ou des molécules. Au niveau microscopique, on a affaire à des MeV comparés à des fractions d'eV, un facteur de l'ordre de 10^6 . Rapporté au niveau macroscopique, on obtient les chiffres du tableau qui montrent par unité de masse un facteur de $6 \cdot 10^4$ entre la fission de l'uranium et la combustion du charbon (et encore n'a-t-on pas compté la masse de l'oxygène !). La fusion est de ce point de vue encore meilleure : un facteur supplémentaire proche de 200, par unité de masse, par rapport à la fission.

Tableau 1. Des potentialités des combustibles chimiques ou nucléaires.

Paramètres physiques de réactions exothermiques			
Type de réaction	Chimique	Fission	Fusion
Exemple	$C + O_2 \rightarrow CO_2$	$n + {}^{235}\text{U} \rightarrow {}^{143}\text{Ba} + {}^{91}\text{Kr} + 2n$	$D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n$
Matières premières	Charbon et air	UO ₂ enrichi à 3 % en ${}^{235}\text{U}$	Deutérium et Tritium
Température	1 000 K ¹	1 000 K	10^8 K
Énergie dégagée par kilo de combustible	$3,3 \cdot 10^7$ J	$2,1 \cdot 10^{12}$ J	$3,4 \cdot 10^{14}$ J
Facteur d'amplification		$6 \cdot 10^4$	10^7

Les réactions de fusion utilisables sur Terre sont d'abord celles du deutérium (D) premier isotope lourd de l'hydrogène. Son noyau, stable, mais peu lié, se compose d'un proton et d'un neutron. Il réagit avec une probabilité intéressante sur lui-même pour donner soit un proton et un noyau de tritium comportant un proton et deux neutrons, soit un neutron et un noyau d'hélium 3, deux protons et un neutron. Aucune des deux branches de la réaction DD ne l'emporte sur l'autre.

Du point de vue de la fusion, deux autres réactions du deutérium sont encore meilleures. La réaction deutérium tritium (DT) qui produit un neutron et un noyau d'hélium 4 libère plus d'énergie. Elle est en même temps plus vigoureuse que toutes les autres réactions du deutérium. La réaction deutérium hélium-3 libère autant d'énergie que la précédente, mais elle a une probabilité moindre. Produisant un proton et un hélium-4, elle est a-neutronique, ce qui limite fortement la radioactivité induite, d'où son intérêt.

La réaction proton Bore 11 est également a-neutronique et s'ajoute aux précédentes, dans le cadre de recherches sur la fusion à échéance plus lointaine.

¹ Si l'on compte la température en unités d'énergie, la correspondance est : $1 \text{ eV} \approx 10^4 \text{ K}$

Tableau 2. Des réactions nucléaires de fusion.

Réactions de fusion nucléaire		
Réactions du Deutérium	$D + D \rightarrow T (1,0 \text{ MeV}) + H (3,0 \text{ MeV})$	Égales probabilités
	$D + D \rightarrow {}^3\text{He} (0,8 \text{ MeV}) + n (2,5 \text{ MeV})$	
	$D + T \rightarrow {}^4\text{He} (3,5 \text{ MeV}) + n (14,1 \text{ MeV})$	La plus accessible
	$D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} (3,7 \text{ MeV}) + H (14,7 \text{ MeV})$	a-neutronique
Tri alpha	$p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He} + 8,7 \text{ MeV}$	

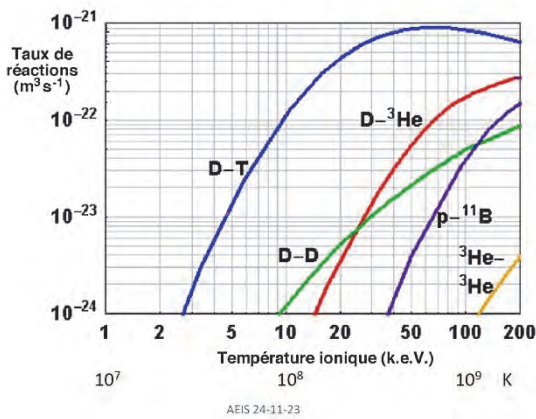


Figure 1. Taux des réactions de fusion en régime thermonucléaire : l'énergie des noyaux réagissant provient de leur agitation thermique. Elle est en moyenne très inférieure à celle des produits de réaction, d'où l'intérêt de ce régime.

La figure 1 montre les probabilités de ces réactions en régime thermonucléaire en fonction de la température (élevée) du milieu gazeux au sein duquel elles se produisent. Grâce à un pic de la section efficace aux environs de 100 keV, le taux de la réaction DT surpasse largement tous les autres. Pour la réaction DD, les taux calculés cumulent les deux branches. Dans tous les cas, des températures de l'ordre de 10⁸ K au moins sont nécessaires. Il faut donc dépenser de l'énergie pour mettre le combustible en condition de réagir. Le réacteur à fusion est ainsi un élément d'une boucle (figure 2).

Le réacteur dans la boucle

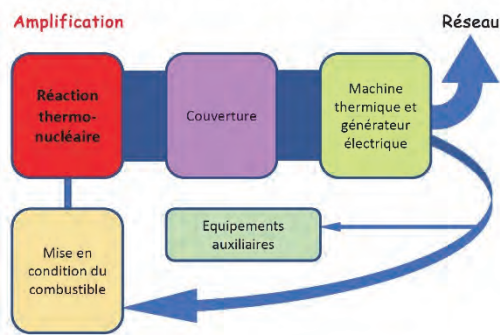


Figure 2. Le réacteur thermonucléaire dans la boucle.

Un raisonnement d'ingénieur (Lawson [2]) permet d'établir les conditions à respecter pour que la boucle soit capable d'envoyer de l'énergie électrique sur le réseau. C'est le cas, et le système est effectivement une source d'énergie, lorsque le produit $n\tau$ de la densité particulière n par la durée de cycle utile τ est supérieur à une valeur qui ne dépend que de la température du milieu. Il existe un point bas dont on retient la valeur pour une expression simplifiée du *critère de Lawson* qui s'énonce ainsi pour la réaction Deutérium-Tritium :

Le produit par le temps (s) de la densité particulière (par m³) d'un plasma à la température de 10⁸ K doit être supérieur à 10²⁰.

Il existe deux façons principales d'aboutir au contrôle des réactions de fusion :

- Ou bien les pertes sont telles qu'il existe un point d'équilibre stable que l'on s'efforcera de maintenir le plus longtemps possible en isolant le plasma de toute paroi matérielle qui le refroidirait. C'est la voie du *confinement magnétique* : l'interposition d'un champ magnétique sépare le plasma chaud de toute paroi pour éviter d'inacceptables pertes par conduction. La densité du plasma doit être inférieure ou égale à 10²⁰ ions par m³ pour limiter la densité d'énergie à une valeur compatible avec les champs magnétiques réalisables actuellement dans de grands volumes.
- Ou bien, en l'absence d'un point de fonctionnement stable, on laisse le système s'emballer en faisant en sorte que l'énergie produite à la fin du processus, après extinction par épuisement partiel du combustible, soit très supérieure à l'énergie investie tout en restant suffisamment basse pour ne pas détruire l'installation, condition qui impose de petites masses de combustible. C'est la voie dite du *confinement inertiel* qui est plutôt l'absence de confinement. Les lasers de grande puissance y ont trouvé une application importante.

Des calculs de coin de table permettent d'obtenir l'ordre de grandeur des quantités consommées dans les différents régimes de confinement pour, selon les cas, une puissance ou une énergie, données.

Tableau 3. Des quantités consommées.

Régime de confinement	Puissance ou énergie de fusion	DT consommé	NB
Magnétique	1 GW	3 mg par seconde	
Inertiel	340 MJ	1 mg / tir	100 MJ ≈ 25 kilos de TNT

En matière de fusion thermonucléaire, on peut résumer de la manière suivante les difficultés de l'entreprise : dans le confinement magnétique, on cherche à stabiliser des états de la matière qui dans la nature n'existent que de façon transitoire ; dans le confinement inertiel au contraire, on va utiliser de façon transitoire des états de la matière qui dans la nature peuvent perdurer pendant des milliards d'années grâce à la force de gravitation. C'est dire l'immensité des défis à relever.

Dans tous les cas, le milieu où se produisent les réactions est un plasma, état de la matière particulièrement difficile à maîtriser. C'est un fluide donc comme tel, sujet à tous les problèmes rencontrés en hydrodynamique : instabilités, turbulence... Il est de plus ionisé : l'application d'un champ magnétique le rend anisotrope ; les innombrables modes d'oscillation engendrent des formes spécifiques d'instabilités et de turbulence.

Les premières recherches sur la fusion au cours des années 1950-60 ont mis en évidence que les connaissances sur cet état de la matière, champion dans le domaine de la dynamique de l'infiniment complexe, étaient alors très insuffisantes. Les recherches sur la fusion ont permis de les faire progresser de façon spectaculaire.

3. Brève histoire du confinement magnétique : les Tokamaks

Il existe d'innombrables configurations de confinement magnétique proposées dès les années 1950 [3] et qui ont pour la plupart fait l'objet d'expérimentations à petite échelle. Peu avant 1970, il est apparu que les performances obtenues au moyen d'une machine appelée « *Tokamak* » (acronyme forgé en russe pour chambre torique et confinement magnétique), étaient très supérieures à celles des autres dispositifs. Ce fut le point de départ du développement, pendant le dernier tiers du XX^e siècle et le début du XXI^e jusqu'au projet ITER, d'une véritable filière.

Cette machine fut conçue en Russie – alors l'URSS – et Andrei Sakharov est crédité de l'idée de base, émise en 1951 [4]. Dans les années 60, Lev Artsimovitch en a dirigé les premières expérimentations réussies à l'institut Kourtchatov de Moscou.

Il s'agit d'un anneau de plasma assez ventru parcouru par un courant de forte intensité. Le champ magnétique de ce courant combiné à celui d'un solénoïde replié assure une bonne stabilité du confinement. En contrepartie, la densité d'énergie matérielle est très inférieure à celle du champ (figure 3). Le courant est créé par induction, l'anneau de plasma jouant le rôle du secondaire à un tour d'un transformateur, ce qui implique *a priori* un fonctionnement pulsé.

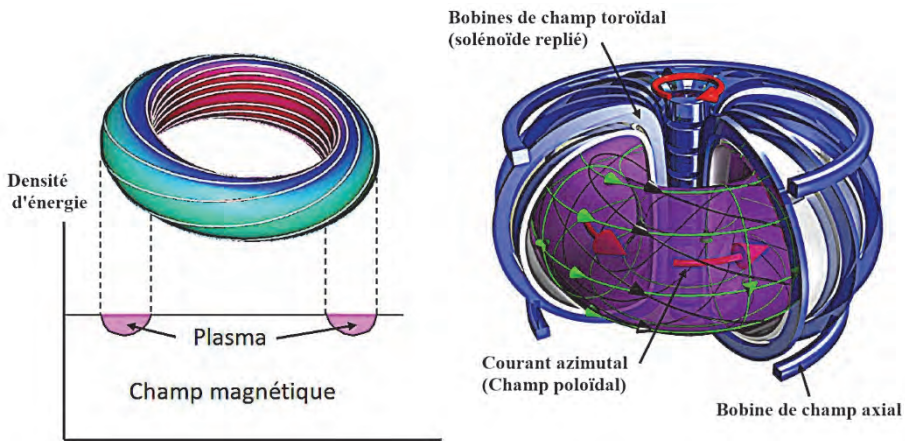


Figure 3. Schémas de principe du Tokamak.

Pendant la montée linéaire du courant, le plasma qui ne subit pas de compression s'échauffe progressivement par effet Joule. Il devient de plus en plus conducteur au point que dans toutes les machines exploitées à ce jour, lorsque la température électronique atteint environ 2 keV ($2 \cdot 10^7$ K), la résistivité du plasma, excessivement faible, se compare à celle des supraconducteurs. L'effet Joule est alors inopérant. Pour atteindre des températures plus élevées, il convient d'injecter autrement de l'énergie dans le plasma.

Trois techniques de chauffage ont rapidement fait partie intégrante du développement de la filière. On a utilisé avec succès : la compression adiabatique (rapidement abandonnée car moins efficace), l'injection de neutres et l'irradiation par des radiofréquences.

Ces dernières, à condition d'être judicieusement appliquées, peuvent induire un courant toroïdal susceptible de maintenir la configuration magnétique au-delà de la durée de l'impulsion fournie par le transformateur (*current drive*).

Les recherches ont montré que le confinement était d'autant meilleur que la taille de la machine était importante. Des tokamaks de plus en plus gros ont été construits dont TFTR à Princeton (USA), JT-60 au Japon et le JET (Européen) à Culham en Grande-Bretagne. Le JET détient le record homologué en 1994 de la plus grande restitution de puissance en ayant produit sous forme de puissance de fusion 70 % de la puissance injectée. L'étape suivante est le projet international ITER [5, 6] dont les derniers avatars font l'actualité du confinement magnétique.

4. Actualité du confinement magnétique : les malheurs d'ITER

ITER est au départ un projet politique. En 1985 et 1986 eurent lieu des rencontres au sommet entre le président des États-Unis, Ronald Reagan et le premier secrétaire du parti communiste de l'Union soviétique, Mikhaïl Gorbatchev, qui tenaient à concrétiser une ère nouvelle des relations entre l'Est et l'Ouest au moyen d'une entreprise commune de longue haleine sur un objectif ambitieux sans être vital à court terme, mais impliquant une réelle et permanente coopération. De part et d'autre, les conseillers scientifiques, Alvin Trivelpiece pour les États-Unis, et Evgenyi Velikhov pour l'Union soviétique, étaient issus de la physique des plasmas. La fusion magnétique offrait une opportunité idéale. Il fut donc décidé d'institutionnaliser la collaboration sur un unique projet entre des équipes travaillant depuis une dizaine d'années aux États-Unis, en Europe, en Russie et au Japon sur une nouvelle génération de tokamaks au-delà du JET et de TFTR. L'implosion de l'URSS en 1991 ne remit pas en cause cette entreprise.

Cette prise de décision au plus haut niveau s'inscrivait dans la nécessité d'une coopération internationale pour les étapes futures sur le chemin de la fusion nucléaire. ITER en latin veut dire la voie. Alors, voie royale ou voie de garage ?

Dans ses ambitions premières, ITER visait explicitement, à échéance 2010-2020, la démonstration de l'allumage de la réaction thermonucléaire confinée. Cela constituerait l'équivalent de ce que fut, pour la fission, la divergence de la réaction en chaîne obtenue à Chicago le 2 décembre 1942.

En juillet 1998, dans les délais, un projet détaillé de réacteur prototype (ITER-EDA pour Engineering Design Activities) était présenté à l'instance de décision. Le coût de construction était estimé à environ 7 milliards de dollars, sans garantie de non-dépassement, pour un allumage incertain. Jugé trop coûteux, ce projet n'a pas été approuvé et les responsables se virent confier la mission de définir un tokamak d'objectifs, de taille et de prix plus modestes.

Le nouveau projet, soumis en 2001, renonce à l'allumage. Dans la mesure où des systèmes de chauffage du plasma et de génération de courant non-inductive doivent

être mis en place, l'allumage perd en effet de son intérêt. Le programme vise maintenant un gain en puissance de l'ordre de 10 au niveau de 400 MW de fusion D-T pendant 400 s.

Le délai entre la remise du projet en 2001 et la décision prise en 2003 de construire le réacteur à Cadarache est normal pour le choix d'un site entre 4 propositions dans le cadre d'une coopération internationale (« concours de beauté » en 2002 à Lyon au cours d'une conférence de l'AIEA sur la fusion).

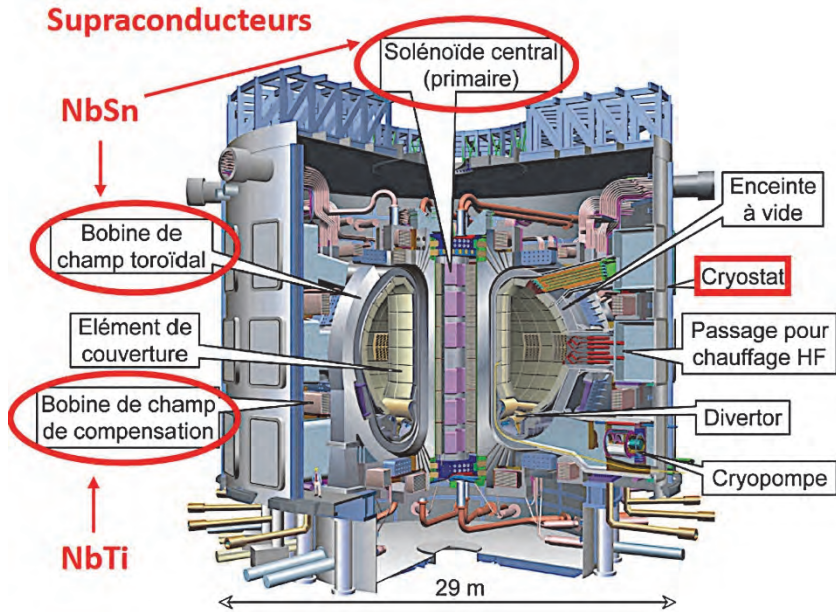


Figure 4. Vue éclatée d'ITER en construction à Cadarache. Les entourages en rouge désignent les éléments contenant des supraconducteurs à la température de l'hélium liquide, 4 K.

Le dessin d'ITER version 2001 adopte une section méridienne en forme de D, comme avant lui le tokamak européen JET, et intègre trois éléments majeurs : un solénoïde supraconducteur, un « divertor » et un dispositif de récupération de l'énergie de fusion, la *couverture*. Les deux premiers ont déjà été expérimentés. Le voisinage *a priori* déraisonnable de supraconducteurs à la température de l'hélium liquide et d'un plasma à 10^8 K a fait ses preuves au CEA-Cadarache grâce à « Tore Supra ». Le « divertor », dispositif magnétique destiné à éliminer des impuretés indésirables, a été un succès sur le JET et JT-60, après des essais réussis sur de plus petits tokamaks.

La couverture sera mise en œuvre pour la première fois. Elle est composée de modules dont l'épaisseur sera de 450 mm, facilement démontables et qui incorporent la première paroi face au plasma. Celle-ci, subissant un flux d'énergie de 200 à 500 kilowatts par mètre carré, doit satisfaire de multiples exigences : transparence aux neutrons, résistance aux contraintes thermiques et aux interactions plasma parois, bonne rigidité mécanique dans les conditions d'exploitation de la machine. Le reste du module doit absorber un flux de neutrons de 14 MeV représentant une puissance de 600 à 800 kilowatts par mètre carré. L'énergie de ces neutrons est transformée en chaleur transférée vers l'extérieur par l'intermédiaire d'un fluide de refroidissement : de l'eau dont la température ne devra pas dépasser 200 °C sous 30 bars, ce qui est insuffisant pour faire tourner une turbine couplée à un générateur électrique.

L'histoire d'ITER est parsemée de péripéties sur les plans financier, juridico-administratif, technique... dont l'effet principal a été de ralentir le programme et d'en augmenter corrélativement le coût (tableau 4).

Tableau 4. Des malheurs d'ITER.

Les malheurs d'ITER	
1998	Projet refusé : trop coûteux pour un résultat incertain.
2003-07	Manifestations anti ITER à l'occasion du débat public en région PACA.
2010	Troisième report de la date du premier plasma. Nouvelle échéance (contraignante) : décembre 2019.
	L'administration Obama propose de réduire de 30 % la contribution des États-Unis.
	Europe Écologie obtient l'arrêt du financement par la région PACA au-delà des 70 M€ déjà engagés.
	Nouveau recul d'échéances : fonctionnement DT reporté à 2026.
2010-15	Dérapages budgétaires provoquant les destitutions successives de deux directeurs généraux (japonais) du projet.
2021	Détection de fissures dans des éléments déjà livrés.
2022	L'ASN s'en mêle et fait suspendre le montage pour vérifications.

Ont contribué également aux malheurs d'ITER, la maladie, la démission et le décès de Bernard Bigot, directeur du projet de 2015 à 2022 avec pour mission de tenir les budgets malgré les possibilités de dépassement incontrôlable ouvertes par les traités organisant ce programme. Le nouveau directeur est Pietro Barabaschi, un vétéran de la filière Tokamak (JET) et du projet ITER.

La découverte de fissures dans les premiers éléments du bouclier thermique livrés par la Corée du Sud constitue le dernier en date des malheurs d'ITER. Elle va entraîner des retards et très probablement des surcoûts. Les opposants trouvent là une nouvelle raison de protester contre sa construction.

5. Actualité du confinement inertiel

Du côté de la fusion par laser, la situation politico-médiatique est nettement plus brillante avec l'annonce fracassante faite en décembre 2022 du franchissement d'un seuil de parité énergétique : énergie de fusion supérieure ou égale à celle des faisceaux lumineux irradiant la cible. Le principe de telles expériences est présenté sur la figure 5.

Une petite sphère (1mm de rayon) contenant du combustible thermonucléaire est entourée d'un ablateur soumis à du rayonnement laser (mode direct) ou à du rayonnement thermique secondaire généré par l'impact des faisceaux lasers sur la paroi interne d'une cavité (mode indirect).

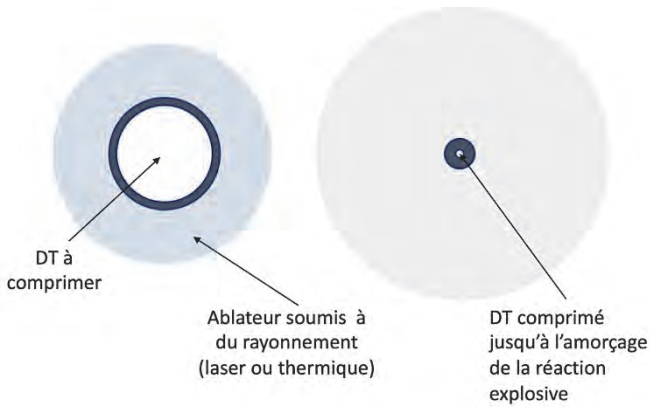


Figure 5. Principe du confinement inertiel.

La volatilisation de l'ablateur induit par effet fusée un mouvement d'implosion qui en moins de 10^{-8} seconde va comprimer la sphère jusqu'à obtenir l'ignition : amorçage de la réaction explosive.

Les simulations numériques du début des années 1970, exagérément optimistes, prédisaient la libération de 2,5 mégajoules (MJ) d'énergie de fusion pour 50 kilojoules d'énergie laser. Elles ont entraîné le lancement d'un programme de lasers de plus en plus puissants jusqu'aux installations de la classe mégajoule : national ignition facility (NIF) inauguré en 2009 à Livermore en Californie et laser mégajoule (LMJ) près de Bordeaux, qui n'a pas encore atteint ce niveau, mais a déjà produit des résultats [7]. Un saut quantitatif a été amorcé en 2021 à NIF après un patient travail d'optimisation qui a porté d'une part sur la forme temporelle des impulsions laser et d'autre part sur l'architecture de cibles irradiées en mode indirect.

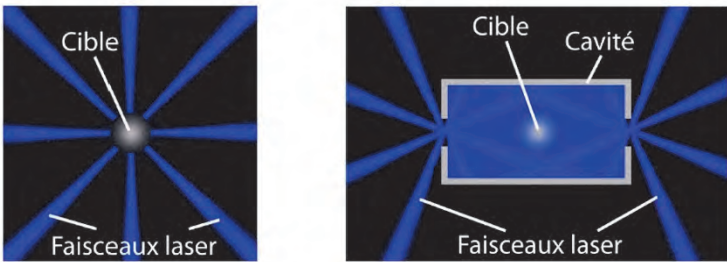


Figure 6. Deux façons d'irradier une cible. Dans le mode direct, à gauche, les faisceaux laser impactent la surface externe de la microboule à imploser. Dans le mode indirect, à droite, les faisceaux laser impactent la surface interne d'une cavité cylindrique. C'est le rayonnement thermique secondaire émis qui interagit avec la cible.

La structure complexe et le choix des matériaux de ces dernières doivent favoriser le transfert d'énergie vers la poussée qui produira la compression tout en minimisant les causes d'instabilité nuisant à cette même compression. Le triplement, obtenu entre 2021 et 2022, de l'énergie libérée montre toute l'importance du dessin des cibles associé à l'énergie du laser (figure 7). Plus importante que le franchissement d'un seuil de parité énergétique est la preuve apportée par ces expériences de l'ignition d'une partie de la masse comprimée qui atteint les conditions de Lawson : allumage d'un point chaud central [8].

Les résultats obtenus le 5 décembre 2022 et en 2023, le 20 juillet, et le 8 puis le 20 octobre, confortent et amplifient celui du 8 août 2021. L'étape suivante est que cet allumage de point chaud, que l'on pourrait qualifier de « proto ignition », se propage à une fraction importante du combustible ce qui, toutes choses égales par ailleurs, décuplerait au moins l'énergie libérée par la fusion et validerait définitivement le principe du confinement inertiel. Le défi à plus long terme est de passer de quelques tirs par an à plus de 10 par seconde avec un « driver », nouveaux lasers, ions lourds accélérés ou encore générateurs électriques pulsés, à haut rendement radiatif. La route à parcourir est encore longue !

6. Les start-ups

Une autre bonne nouvelle, celle-ci à bas bruit, est l'apparition d'entreprises privées dans le domaine de la recherche/développement sur la fusion nucléaire. En marge de la renaissance annoncée de l'électronucléaire, on assiste en effet depuis quelques années à une floraison d'initiatives.

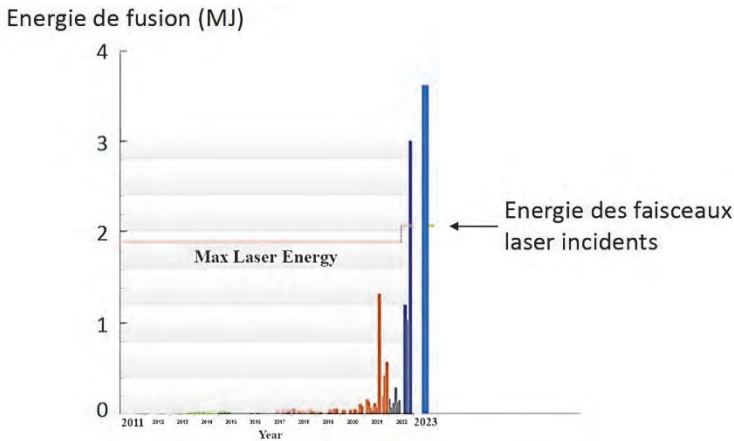


Figure 7. Énergie de fusion obtenue à NIF en mode indirect. Les couleurs correspondent à différentes architectures de cibles.

Cette vitalité est plutôt bon signe en vue de la quête du Graal. Les projets sont de taille assez modeste et ne s'inscrivent pas tous dans la filière Tokamak. Bill Gates ou le MIT soutiennent de telles entreprises. Il en existe même une en France : « renaissance fusion » à Grenoble sur une variété de confinement magnétique appelée « stellarator ». Elles ont *a priori* l'agilité qui fait défaut au programme ITER et pourraient être rentabilisées par des brevets relatifs à des avancées sur des éléments clés de la science et de la technologie de la fusion nucléaire.

Certaines de ces sociétés se lancent dans des projets très futuristes comme la mise en œuvre de la réaction proton-Bore 11 : « tae » pour tri-alpha-energy (San Diego à l'initiative d'un représentant de la première génération de chercheurs ayant travaillé sur la fusion, Norman Rostoker – 1925-2014) ; HB11 en Australie (avec H. Hora) qui table sur l'utilisation des lasers.

Les objectifs affichés de plusieurs autres start-ups s'inscrivent en marge des grands projets en cours (figure 8). Ainsi, Commonwealth Fusion Systems, entreprise liée au

MIT, développe des circuits supraconducteurs à « haute température » (celle de l’azote liquide) afin de créer des champs magnétiques supérieurs à 20 teslas dans le but de rendre les tokamaks plus compacts à performances égales. Id en UK, Tokamak energy.

Renaissance fusion, à Grenoble, recherche également la compacité grâce aux nouveaux supraconducteurs, mais pour la Stellarator machine développée en Allemagne sur une idée de Lyman Spitzer (Princeton) datant des années 1950. Les Australiens de HB11 se proposent d’appliquer les implosions induites par laser à cette réaction a-neutronique.

	Tokamak		Stellarator	Inertiel
Combustible	DT		DT	DT – pB ¹¹
	JET(UK)	ITER(Fr)	Wendelstein 7X (De)	NIF (USA)
Gain obtenu	0.67			1.5
Start-ups	Kyoto fusion energy Commonwealth fusion Tokamak energy		Princeton stellarator Renaissance fusion Type one energy	Focused energy Marvel fusion HB11

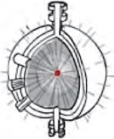


Figure 8. Quelques start-ups dans le sillage des grands projets.

De tout ce foisonnement, on peut attendre une accélération de la course au réacteur de fusion producteur d’énergie.

7. Les hydrides fusion-fission

Une autre façon d’accélérer le cours des évènements repose sur les remarques suivantes. Un réacteur de fusion est d’abord une énorme source de neutrons de 14 MeV. Réduire à faire bouillir de l’eau le rôle des neutrons produits par des machines d’aussi haute technologie que les réacteurs de fusion n’est pas franchement très satisfaisant pour l’esprit. Il y a mieux à faire avec une telle « pierre philosophale » capable de changer un élément en un autre. Comment utiliser ces neutrons ? Il existe plusieurs possibilités en plus de céder leur énergie à un caloporteur :

- Régénérer le Tritium
- Fissionner des noyaux lourds : U²³⁸, Pu, Th, actinides
- Fabriquer des noyaux fissiles : U²³³
- Induire des transmutations – produits de fission, actinides mineurs – et contribuer à leur élimination²

Régénérer le tritium fait partie de tous les programmes de recherches et de tous les projets de réacteurs visant l’échelle industrielle.

Pour accélérer le passage à ce stade, une vieille idée [9, 10] consiste à utiliser les neutrons pour fissionner de l’uranium appauvri dans un réacteur hybride fusion-fission. Un facteur d’amplification de l’ordre de 10 est ainsi attendu par rapport à la

² Rôle comparable à celui des ADS ou du “Mouroutron”...

fusion pure. Des études détaillées en ce sens ont été menées en particulier par Paul-Henri Rebut (premier responsable du projet ITER dans sa phase préparatoire) avec le concours de scientifiques du centre d'études russe de Sarov (Arzamas 16) pour la partie calculs. Cette approche présente des avantages, mais pose quelques problèmes (tableau 5).

Tableau 5. Avantages et inconvénients des hybrides fusion-fission.

<i>Perspectives</i>	<i>Mais...</i>
Performances moindres exigées de la partie fusion : état de l'art au début du XXI ^e siècle	Coût et pour le confinement inertiel, difficulté d'obtenir des cadences élevées
Mise en place de dispositifs industriels de fusion, avancée de plusieurs décennies	Fin de l'argument d'une énergie nucléaire « propre »
Intégration à la quatrième génération de réacteurs électronucléaires	Communautés séparées à réunir

Les hybrides peuvent se concevoir aussi bien à partir du confinement inertiel (LIFE à Livermore avec des lasers, InZinerator à Sandia avec la machine électromagnétique Z) que du confinement magnétique. La figure 9 est un exemple d'intégration d'un tokamak compact dans un complexe électronucléaire autonome sur une idée de l'américain Wallace Mannheimer (retraité du NRL) adaptée avec le concours de Daniel Heuer (LPSC, Grenoble). En plus d'une contribution à la fourniture d'énergie électrique, un Tokamak est une pièce maîtresse du cycle du combustible de fission qui va jusqu'à l'enfouissement sur place de déchets ultimes à la radioactivité amoindrie.

8. En conclusion : À quand la fusion nucléaire ?

La demande d'énergie décarbonée ne peut que croître dans la perspective d'un développement durable des sociétés humaines. Dans la mesure où elle est acceptée par le public, l'énergie nucléaire fait partie des solutions. On en a eu un exemple en France lorsqu'au début des années 1970, pour répondre au premier choc pétrolier, fut lancé un programme électronucléaire de grande envergure, basé sur la fission. Dans cette filière, les technologies étaient prêtes. Cinquante ans plus tard, on ne peut pas dire que la fusion soit au rendez-vous pour un développement industriel.

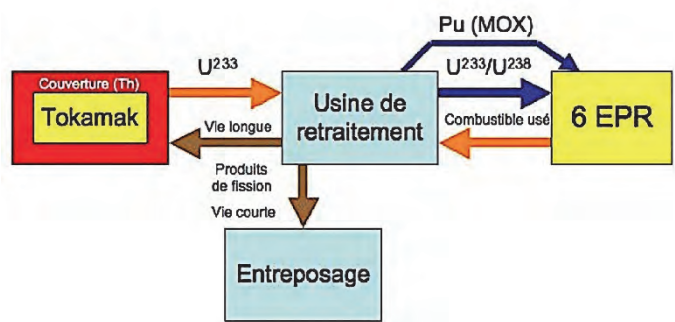


Figure 9. Hybride fusion-fission dans le cycle du Thorium. Complexe nucléaire autonome.

Selon Lev Artsimovitch, un pionnier de la fusion nucléaire dans les années 1960 : « *la fusion sera prête quand la société en aura besoin* ».

Dans l'état présent de la demande d'énergie, des ressources et de la contrainte climatique, on n'en est pas encore là. Que sera l'avenir ?

La fusion nucléaire est-elle un mythe comme voudraient le faire croire ses détracteurs, ou sera-t-elle le Saint Graal des énergies du futur ? Quelle que soit la réponse à cette question, deux mythes très anciens lui sont reliés : Prométhée pour reproduire sur Terre le feu du Soleil, et la quête du Graal. Celle-ci continue et devrait aboutir à des démonstrations de principe dans un délai raisonnable (une génération ?). Mais l'avenir industriel reste pour le moins incertain.

Références

- [1] Il existe de nombreux ouvrages sur la fusion contrôlée. Les principes et les principales voies de recherche sont exposés par exemple dans : Paul-Henri Rebut, *L'énergie des étoiles*, Odile Jacob (1999) ; Jean Robieux, *Vers l'énergie abondante sans pollution*, Editions Louis de Broglie (2008) ; Alessandra Benuzzi-Mounaix, *La fusion nucléaire : un espoir pour une énergie propre et inépuisable*, Belin (2008) ; Jean Louis Bobin, *Une introduction à la fusion thermonucléaire contrôlée*, EDP Sciences (2011)
- [2] J. D. Lawson, *Proc. Phys. Soc. London* **B-70**, 6 (1957).
- [3] *Proceedings of the Second United International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy*: **Volume 31**, Theoretical and experimental aspects of controlled nuclear fusion; **Volume 32**, Controlled fusion devices.
- [4] Andrei Sakarov, *Œuvres scientifiques*, éditions Anthropos (1984).
- [5] Robert Arnoux, Jean Jacquinot, *Iter: Le chemin des étoiles ?* Edisud (2006).
- [6] www.iter.org
- [7] S. Liberatore *et al. Phys. Plasmas* **30** 122707 (2023)
- [8] *The age of ignition* LLNL, llnl.gov/news/age-of-ignition
- [9] Andrei Sakarov, op. cit.
- [10] H. A. Bethe, *Physics Today* (May 1979).

L'innovation du laser femtoseconde et ses applications¹

Gérard Mourou

Prix Nobel de Physique 2018
(avec Donna Strickland)

Abstract

The intensity of pulsed lasers (intensity related to the duration of these pulses) has long been limited by a technical obstacle, related to the deterioration of the optical materials used. An intensity limit around 10^{12} watts/cm² was maintained for several years. This was until Gérard Mourou and Donna Strickland, in 1985, found the technique to overcome this limit. This chapter, after a brief reminder of the history of pulsed lasers, explains the principle of the process called "Chirped Pulse Amplification" which led to surpassing the limit. Various processes are then presented that form the basis for obtaining increasingly shorter pulses – beyond the femtosecond – and thus increasingly higher intensities (up to 10^{29} watts/cm² and beyond) – along with some of the applications achieved or hoped for: from ophthalmology and material processing to fundamental physics research, and even to medical applications such as proton therapy. The enormous particle accelerations (protons, neutrons) enabled by these very high intensities also offer prospects in the field of material transmutation and nuclear energy production.

1. Introduction et contexte historique

Ce chapitre s'inscrit dans une histoire scientifique très riche, celle de l'évolution de la technologie laser. Dès la première apparition de la lumière cohérente en 1960, avec le tir du premier laser de Theodore Maiman, la communauté scientifique a pu entrevoir le potentiel immense de ces sources lumineuses.

Un aspect de cette histoire doit être d'emblée souligné : alors que la lumière était autrefois associée à l'optique et aux énergies de l'ordre de l'électronvolt, les avancées récentes permettent aujourd'hui d'atteindre des régimes d'intensités extrêmes, associées à des températures et des pressions elles aussi énormes, opérant dans un espace et un temps restreint. Ces possibilités nouvelles ouvrent ainsi la voie à des applications allant de l'usinage des matériaux à des traitements médicaux ultra-précis et   bien d'autres domaines, accélération des particules, physique nucléaire et au-delà, recherche en physique fondamentale ; applications que ce chapitre a pour objet d'illustrer.

¹ Ce chapitre est une transcription, effectuée par Paul-Louis Meunier et Jean-Pierre Treuil de la conférence tenue par Gérard Mourou le 24 novembre 2023 dans le cadre du colloque AEIS. Il a été relu et amendé. Il est publié avec son accord.

2. Du laser conventionnel au laser femtoseconde

2.1 La dualité de la lumière

On peut distinguer deux grandes approches dans l'utilisation du laser (cf. figure 1) :

- **Les lasers continus à haute stabilité**, utilisés notamment pour refroidir des atomes et atteindre la physique du pico-électronvolt. La stabilité en fréquence est essentielle pour ce type d'utilisation, et il est désormais possible d'atteindre pour ces lasers des stabilités de l'ordre de 10^{-19} .
- **Les lasers pulsés à impulsions ultra-courtes**, qui, en concentrant l'énergie en un temps extrêmement bref (de l'ordre de la femtoseconde, soit 10^{-15} s), permettent d'atteindre des puissances phénoménales. Dans la gamme des énergies, on bascule, avec ce type de lasers, de l'électronvolt à la physique du giga-électronvolt, et bientôt, on l'espère, du téra-électronvolt, les énergies des particules du CERN.



Figure 1. Illustration de la dichotomie dans l'utilisation avancée des lasers, entre des applications à basse intensité (optique atomique) et à haute intensité (accélération de particules).

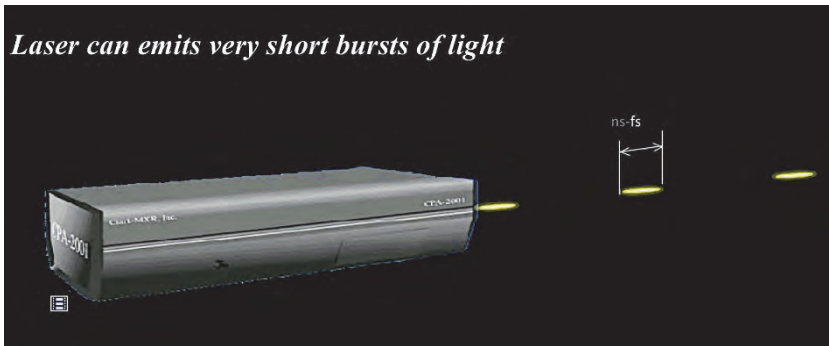


Figure 2. Le type de laser utilisé dans nos expériences. L'ultra-courte durée des impulsions (et donc de leur taille parfois comparée à celle d'une cellule sanguine) permet d'atteindre ces intensités.

2.2 La brève durée pour une puissance extrême

L'un des points cruciaux est la capacité des lasers femtosecondes à délivrer de l'énergie sur un intervalle de temps si court que le calcul de la puissance (énergie/temps) conduit à des valeurs colossales. Par exemple, délivrer un joule en une femtoseconde équivaut à générer une puissance de l'ordre d'un pétawatt (10^{15} watts) – puissance mille fois supérieure à celle du réseau électrique mondial, même si cette puissance n'est effective

que pendant un instant fugace. Si on focalise cette intensité sur une surface de l'ordre du micron par exemple, la pression résultante est gigantesque, 10^{23} watts par cm^2 , dix millions de tours Eiffel sur un doigt !

3. La technique révolutionnaire du *Chirped Pulse Amplification* (CPA)

3.1 Les limites des amplificateurs directs

Avant l'invention du CPA, l'amplification directe des impulsions ultra-courtes se heurtait à un obstacle majeur. En effet, en amplifiant ces impulsions, les irrégularités initiales inhérentes au faisceau se trouvaient elles-mêmes amplifiées de façon non linéaire à cause de la variation de l'indice de réfraction en fonction de l'intensité ($n_1 + n_2 I$). Ces irrégularités ainsi amplifiées produisaient des filaments destructeurs qui endommageaient les composants optiques et limitaient l'intensité à environ 10^{12} watts/ cm^2 .

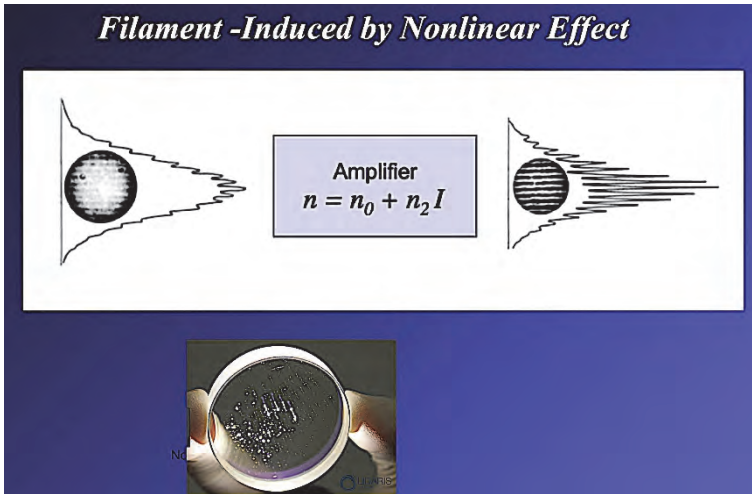


Figure 3. « L'effet des irrégularités du faisceau laser sur les matériaux optiques » illustre comment de légères imperfections pouvaient se multiplier lors de l'amplification.

3.2 Le principe du CPA

La solution qui a permis de sortir de ce blocage est résumée dans le procédé de Chirped Pulse Amplification (CPA), qui peut se décomposer en trois étapes essentielles (cf. figure 4) :

1. Étirement de l'Impulsion

L'impulsion ultracourte est d'abord étirée à l'aide de réseaux optiques. Ce processus augmente sa durée d'un facteur pouvant aller jusqu'à 10^3 , ce qui réduit drastiquement son intensité et permet de contourner les effets non linéaires lors de l'amplification.

2. Amplification

Une fois étirée, l'impulsion est envoyée dans un amplificateur. Grâce à la baisse de

l'intensité, l'énergie contenue dans l'impulsion peut être amplifiée sans risque de dégradation des matériaux optiques.

3. **Re-compression**

Enfin, l'impulsion amplifiée est recompressée pour retrouver sa durée initiale, en conservant l'énergie désormais beaucoup plus élevée. Le résultat final est une impulsion extrêmement puissante et brève, ouvrant l'accès à des régimes d'intensité jamais atteints auparavant.

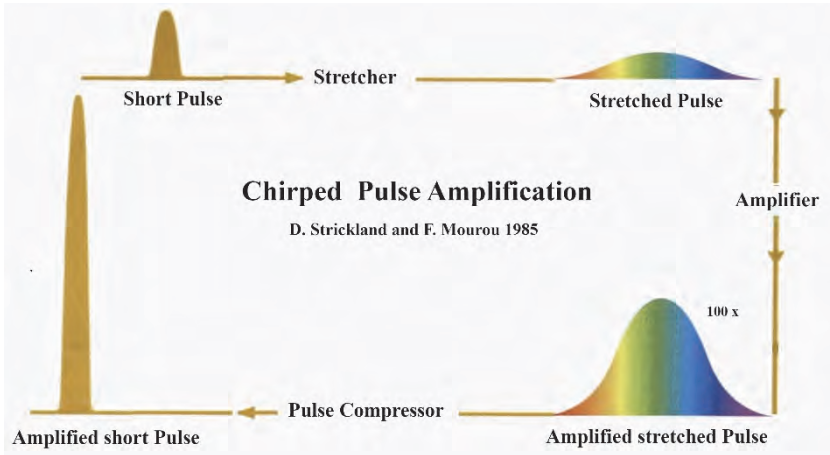


Figure 4. Schéma du procédé innovant qui a permis de dépasser le plafond d'intensité au-delà duquel les matériaux optiques étaient endommagés. Avec ses trois étapes : étirement, amplification, re-compression

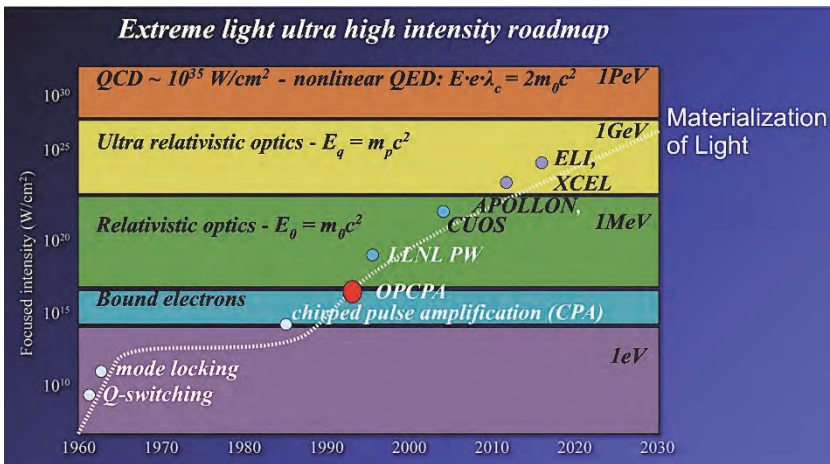


Figure 5. La montée en puissance des lasers depuis Maimann 1960, et illustration du plateau autour de 10¹² watts/cm²

Ce procédé, qui a valu à Gérard Mourou le prix Nobel de Physique 2018, a radicalement transformé la capacité à générer des intensités de l'ordre de 10²⁰ watts/cm² et plus, faisant passer la technologie du laser dans un nouveau paradigme. On espère ainsi pouvoir atteindre 10³⁰ watts/cm² l'intensité nécessaire pour matérialiser la lumière en électrons et positrons.

4. Applications multiples du laser femtoseconde

4.1 Applications en usinage et en ophtalmologie

L'un des avantages immédiats du laser femtoseconde est sa capacité à réaliser des opérations d'usinage avec une précision inégalée. En concentrant l'énergie sur des zones extrêmement réduites, il est possible de découper ou percer des matériaux avec une netteté impossible à atteindre avec des lasers pulsés plus longs. Ainsi que l'illustrent les figures 6 et 7. La précision est en effet fonction de la durée de l'impulsion. Un laser continu chaufferait tout un volume de matériau et créer un large cratère. Avec des impulsions de l'ordre de la nanoseconde, l'usinage présente des défauts collatéraux. L'usinage devient très bon avec les lasers femtosecondes car il n'y a alors pratiquement aucun déplacement de matière (bourrelet) qui pourrait le perturber : au niveau de la précision exigée, rien ne bouge et l'usinage est parfait.

En ophtalmologie, la technologie a permis de développer des interventions chirurgicales très précises, notamment pour le traitement de la cornée. Un épisode fortuit – un étudiant exposé à un coup de laser femtoseconde – a mené à la découverte d'un procédé de traitement ultra-précis, qui est aujourd'hui largement adopté en clinique.

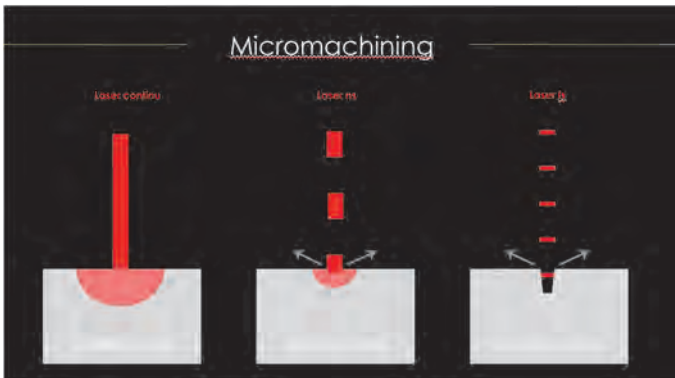


Figure 6. Un intérêt des lasers femtosecondes : permettre de creuser la matière sans l'endommager. Illustration du principe.

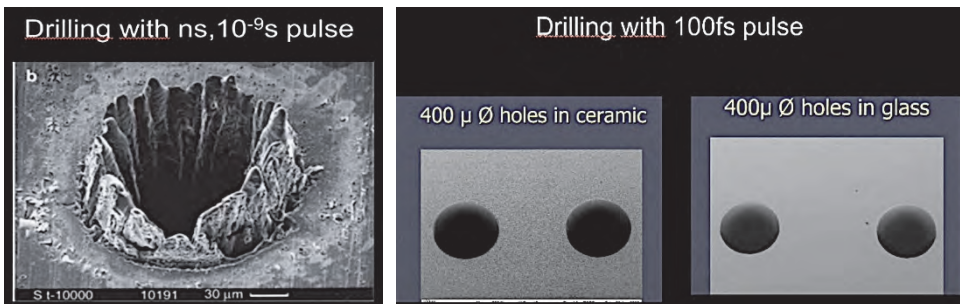


Figure 7. Exemples de la progression de la précision dans l'usinage en fonction de la durée des impulsions, ou comment l'usinage par impulsions femtosecondes offre des finitions « magiquement propres ».

4.2 Accélération de particules et applications en physique des hautes énergies

Le laser femtoseconde ne se limite pas aux applications industrielles ou médicales. Il ouvre également de nouvelles voies en physique des particules. On va pouvoir en effet accélérer des particules à des énergies très élevées, de façon simple, compacte et efficace. À commencer par des électrons, puis des protons ; c'est la gamme d'intensité de la partie verte de la figure 5, celui de l'optique relativiste.

4.2.1 Optique relativiste : principe de l'accélération par la lumière de particules chargées

Dans l'action de la lumière, donc d'un champ électromagnétique, sur une particule chargée un terme souvent négligé est l'intervention du champ magnétique. Rappelons que la force s'appliquant à une particule chargée soumise à un champ électromagnétique $[\vec{E}, \vec{B}]$ s'écrit

$$\vec{F} = q \left[\vec{E} + \frac{\vec{v}}{c} \wedge \vec{B} \right].$$

Sous l'effet d'une lumière ordinaire, la vitesse $\vec{v}$ atteinte par la particule sous la poussée du champ magnétique (donc dans la direction du faisceau) n'est jamais suffisamment forte, le produit vectoriel peut-être négligé, l'action de cette lumière reste de l'ordre de $\vec{F} = q\vec{E}$

Sous l'effet d'une lumière cohérente par contre, la poussée du champ magnétique, en accélérant la particule, va faire que très vite le produit vectoriel ne sera plus négligeable. C'est un effet cumulatif : plus la vitesse est élevée par rapport à celle de la lumière, plus la poussée du champ magnétique dans la direction du faisceau sera grande et accélérera encore davantage la particule. Et celle-ci deviendra une particule relativiste.

4.2.2 Création d'ondes de densité dans un plasma

En focalisant le laser à impulsion sur un jet de gaz (cf. figure 8), on crée un plasma dans lequel des ondes de densité (wakefields) vont se former. Les électrons libres, surfant sur ces ondes, peuvent être accélérés à des gradients de l'ordre du GeV par centimètre, les conduisant quasiment à la vitesse de la lumière. L'idée avait déjà été émise en 1979 par Toshi Tajima et J.M. Dawson mais à cette époque le CPA n'existait pas.

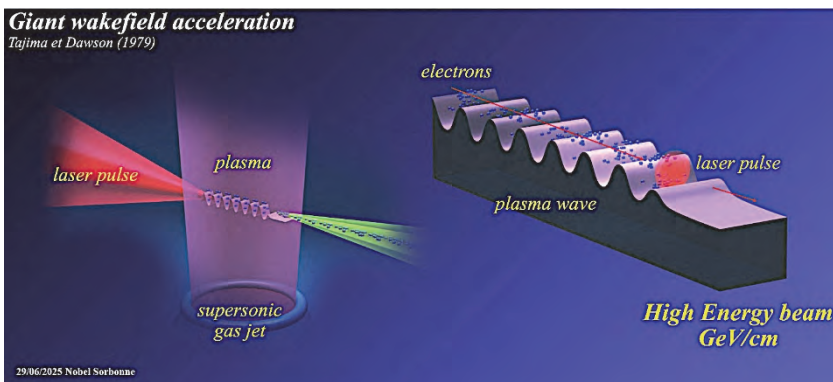


Figure 8. « Création d'ondes dans un plasma » illustre le concept du wakefield, démontrant comment une impulsion laser peut servir à accélérer des particules sur des distances très courtes.

4.2.3 Miniaturisation des accélérateurs

Comparativement aux installations traditionnelles (comme le CERN avec ses 27 km d'anneaux), les accélérateurs laser permettent d'envisager des dispositifs compacts – pouvant tenir sur un terrain de football – pour atteindre des énergies proches du téraélectronvolt (TeV). Mais il faut pour ce faire produire des intensités plus élevées.

4.3 Vers des pulsations ultra-courtes

Poursuivant la compression temporelle, la recherche se tourne donc vers la production d'impulsions encore plus brèves, dans le domaine de l'attoseconde (10^{-18} s) et de la zeptoseconde (10^{-21} s).

4.3.1 La compression relativiste

Une méthode pour y parvenir est *la compression relativiste*.

Le procédé implique l'utilisation d'un « miroir relativiste » qui permet de recomprimer l'impulsion par réflexion sur une surface en mouvement.

On procède en deux étapes. Dans une première étape, on crée avec un oscillateur ordinaire, un train d'ondes constitué d'une vingtaine de cycles optiques, cycles dont la période est d'une femtoseconde. Puis on effectue une première compression, réduisant ce train en un seul cycle, et augmentant du même coup son intensité. Dans une seconde étape, cette impulsion d'un seul cycle et d'intensité déjà extrêmement élevée est focalisée sur une cible – le miroir relativiste – composée d'électrons et de protons. Mais les électrons sont mobiles, les protons sont plus inertes. L'impulsion pousse d'abord les électrons et laisse les protons en place. Un champ électromagnétique très élevé résulte de cette dissociation, c'est l'origine du mécanisme miroir. Ce champ rappelle en effet les électrons de façon violente, électrons qui vont donc revenir avec une vitesse proche de celle de la lumière. Pour résumer (cf. figures 9 et 10), l'impulsion lumineuse donc relativiste atteint la cible et y crée le miroir.

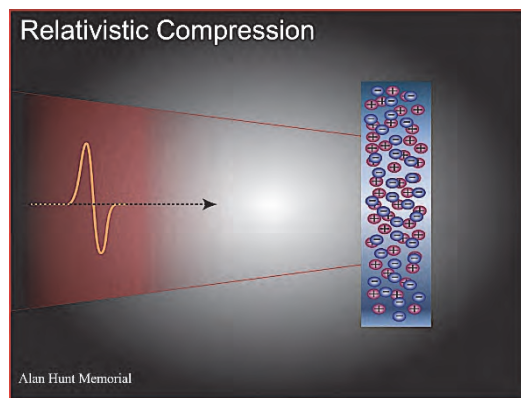


Figure 9. Après la première étape de compression, une impulsion d'un seul cycle, d'intensité déjà élevée, est dirigée vers le miroir.

Elle va être réfléchi par ce miroir (son nuage d'électrons) qui bouge vers elle lui aussi de façon relativiste. Réfléchi et comprimé – par ce mécanisme de miroir mobile – d'un facteur 100 voire 1000. La longueur d'onde du cycle, ainsi fortement réduite, n'est plus du tout « optique ». Elle atteint celles des rayons X, ou même des rayons X « durs ». Et

lorsqu'on atteindra des durées de cycle de l'ordre de la zeptoseconde on sera dans le domaine des rayons gamma.

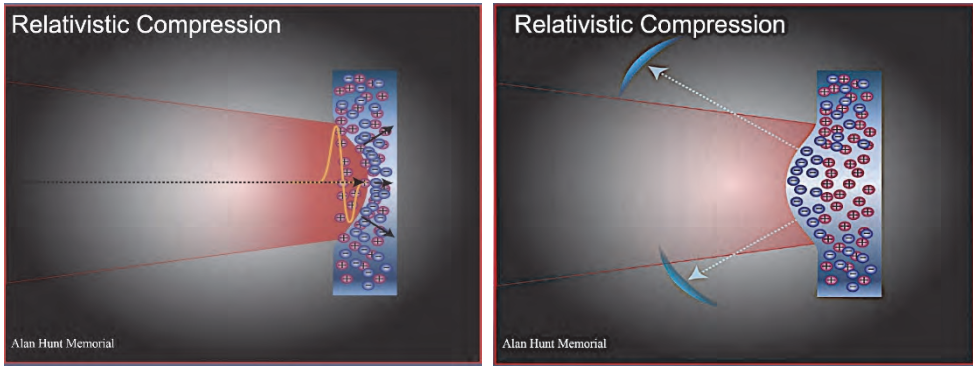


Figure 10. L'impulsion amorce le miroir en repoussant les électrons (partie gauche) ; puis les électrons reviennent en ressort et réfléchissent l'impulsion tout en la comprimant.

4.3.2 Applications en physique fondamentale et cosmologie

Une impulsion d'énergie concentrée en zeptosecondes pourrait atteindre des densités de l'ordre de la densité de Schwinger – 10^{29} watts/cm² – conduisant à la matérialisation de la lumière en paires électron-positron. Ce phénomène ouvre des perspectives pour étudier des processus de création de matière et d'antimatière.

D'un autre côté, les accélérations que l'on espère produire avec de telles impulsions sont en effet gigantesques, atteignant la vitesse de la lumière en une femtoseconde. De part le principe d'équivalence d'Einstein, qui dit accélération dit gravité ; cela correspond à des masses gravitationnelles énormes. Les perspectives sont alors des analogies avec des phénomènes cosmiques tels que les trous noirs et le rayonnement de Hawking (cf. figure 11).

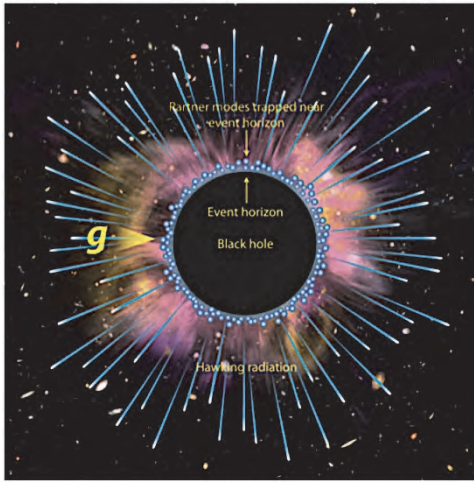
4.4 Applications dans l'énergie nucléaire, la santé et la gestion environnementale

Le laser femtoseconde trouve également des applications dans la production d'énergie nucléaire et la gestion des déchets :

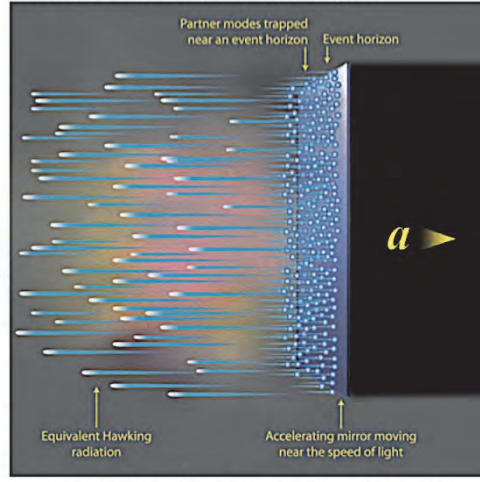
- **Transmutation nucléaire** : En produisant des neutrons *via* des processus de spallation, il devient envisageable de transmuter des éléments à longue durée de vie (actinides) en produits moins dangereux. (cf. figure 13)
- **Accélérateurs compacts pour la protonthérapie** : La possibilité d'accélérer des protons de façon compacte offre l'espoir de réduire considérablement le coût et la taille des installations de protonthérapie, rendant ces traitements plus accessibles.
- **Applications industrielles et spatiales** : Enfin, des impulsions laser de haute précision pourraient être utilisées pour la gestion des débris spatiaux, un enjeu majeur dans l'environnement orbital actuel.

SIMULATING A BLACK HOLE ON A TABLE

New black hole simulator may shed more light on a contradiction in fundamental physics



Black hole Hawking Evaporation



Accelerating Mirror as an analog Black hole

Figure 11. Illustration du rayonnement Hawking d'un trou noir et principe de sa reproduction par mise en œuvre d'une accélération relativiste d'un miroir [Photonics 2022, 1003²].

5. Perspectives et implications futures

Au-delà des applications déjà concrétisées, le développement des lasers femtosecondes et du CPA ouvre la voie à des innovations de rupture dans plusieurs domaines :

- **Miniaturisation et efficacité** : La tendance est à la réduction de la taille des accélérateurs de particules et à l'amélioration de l'efficacité des systèmes laser, notamment grâce à l'émergence des lasers fibrés (Coherent Amplification Network) qui offrent des rendements bien supérieurs aux systèmes traditionnels.
- **Exploration de régimes extrêmes** : L'atteinte de durées d'impulsions attosecondes et zepto-secondes pourrait révolutionner la physique fondamentale, en permettant d'explorer des phénomènes ultra-rapides et en simulant, en laboratoire, des conditions extrêmes comparables à celles observées dans l'univers (par exemple, dans la formation de trous noirs ou dans le spectre des rayons cosmiques).
- **Applications transversales** : Les retombées de ces technologies ne se limitent pas à la recherche scientifique. Elles ont des implications directes en ophtalmologie, en micro-usinage, en production d'énergie propre, et même dans la gestion environnementale (comme la suppression des débris spatiaux), illustrant ainsi leur potentiel multidisciplinaire.

² Pisin Chen, Gérard Mourou, Marc Besançon & al. AnaBHEL (Analog Black Hole Evaporation via Lasers) Experiment: Concept, Design and Status. <https://doi.org/10.3390/photonics9121003>

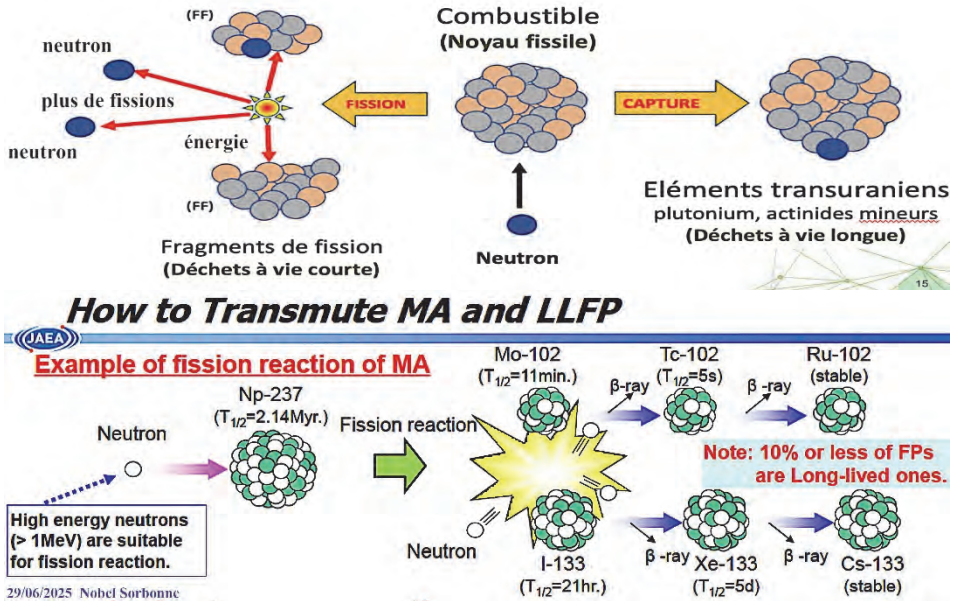


Figure 12 : Schéma des utilisations des neutrons dans le cadre de l'énergie nucléaire ; *partie haute* montrant, dans le processus de fission, la possibilité de capture d'un neutron par un noyau, produisant des éléments transuraniens qui sont des déchets à longue vie donc dangereux ; *partie basse* montrant l'utilisation de neutrons de haute énergie (neutrons rapides) capable de provoquer la fission d'un noyau à longue vie (ici un actinide mineur) et le transmuter en éléments de vie courte ou stable.

6. Conclusion

La découverte et la mise en œuvre du procédé de Chirped Pulse Amplification, puis le développement du laser femtoseconde, ont constitué une avancée technologique majeure. Ce procédé a permis de surmonter les limitations imposées par les effets non linéaires des matériaux dans l'amplification des impulsions laser, ouvrant ainsi l'accès à des intensités jamais atteintes auparavant.

Cette innovation a transformé le champ d'application du laser : elle offre aujourd'hui des possibilités d'usinage et de traitement chirurgical d'une précision inégalée, permet de miniaturiser les accélérateurs de particules pour des applications en physique des hautes énergies et en protonthérapie, et ouvre la porte à des recherches fondamentalement nouvelles dans des domaines allant de la cosmologie à l'énergie nucléaire.

À travers les illustrations clés de ce chapitre (schémas des applications des lasers, du principe du CPA, des accélérateurs par wakefield, et des concepts de compression relativiste), nous avons tenté de montrer comment une innovation née d'un problème technique – la gestion des impulsions ultra-courtes – peut transformer plusieurs secteurs scientifiques et industriels.

L'héritage de cette technologie, déjà couronné par le prix Nobel de Physique 2018, est source d'inspiration pour mettre au point des avancées majeures dans les décennies à venir dans le monde de la physique appliquée.

Table ronde

Quelles perspectives pour une transition énergétique ?¹

La table ronde organisée à l'issue du colloque a été présidée par Jean Schmets, membre du bureau de l'AEIS, entouré de Denis Bonnelle, de l'Institut Pierre Simon Laplace, Claire Kerboul, administratrice de l'association « Sauvons le climat » et Philippe Kourilsky de l'Institut Pasteur. Les trois intervenants ont été invités, en guise de courte introduction, à présenter leurs premières vues sur le thème choisi, les perspectives pour une transition écologique. Puis a été ouverte une période d'échanges avec les personnes présentes dans la salle de conférence ou connectées à distance sur le site de l'Institut Curie.

Le point de vue des Intervenants

Le président présente Denis Bonnelle, à la fois physicien et économiste à l'Institut Pierre Simon Laplace, dont les recherches portent sur comment le solaire et l'éolien peuvent contribuer à résoudre la question climatique. Il rappelle que Denis Bonnelle est l'auteur et co-auteur de plusieurs livres, dont le dernier, *5 défis XXL pour le climat* (5). Il lui donne la parole².

Denis Bonnelle

J'ai été présenté comme « interdisciplinaire », à la fois physicien et économiste ; en revanche, par rapport au sujet de la table ronde, portant sur la transition écologique, je suis incompétent sur ce qui est en lien avec l'écologie, en dehors du climat et de l'énergie. Sur ma vision de la transition énergétique, je me rallie en grande partie à ce qui a été présenté par notre premier intervenant ce matin à savoir : ce qu'il faut faire à partir de maintenant pour diminuer la place des énergies fossiles, c'est procéder à une forte électrification : c'est par la voiture électrique qu'on va remplacer des énergies fossiles par des énergies décarbonées ; c'est de la même manière par les pompes à chaleur que, dans le domaine du logement, l'on peut également procéder à un tel remplacement, etc. Ces énergies décarbonées sont d'une part le nucléaire, d'autre part les énergies renouvelables. J'ai été présenté comme étant plutôt favorable aux énergies renouvelables, mais une très grande part (98 % !) de ce j'ai écrit dans mon livre, serait restée sans changement si j'avais été favorable au nucléaire. Nous pouvons et devons à

¹ Synthèse des interventions faites lors de la table ronde, effectuée par Eric Chenin (AEIS), et validée par les trois conférenciers, Denis Bonnelle, Claire Kerboul et Philippe Kourilsky.

² Mentionnons aussi « Arriver à bon port » publié depuis chez l'Harmattan (Note de l'éditeur)

mon sens nous placer maintenant au-delà de ce débat. Je ne vais donc pas m'y attarder, si ce n'est pour énoncer trois faits très simples, dont un qui est un peu en défense des énergies renouvelables quand même.

Il y a un chiffre qui m'a beaucoup plu dans les rapports de RTE sur les futurs énergétiques. À partir d'un des scénarios 100 % énergies renouvelables, on peut comparer la capacité de stockage par batterie nécessaire pour convertir toutes les voitures, et les camions peut-être aussi, à l'électrique, à la capacité de stockage par batterie nécessaire pour assurer le bon fonctionnement du réseau électrique : il faut 13 fois plus de batteries³ pour passer à la voiture électrique que de batteries pour assurer un bon fonctionnement du réseau électrique. Le problème souvent soulevé de l'intermittence des énergies renouvelables n'est peut-être pas aussi inquiétant de ce point de vue.

Le deuxième fait concerne l'hydrogène, fabriqué par électrolyse à partir d'énergie décarbonée. Je pense qu'il est impossible de prévoir quel va être le rôle de l'hydrogène, parce qu'on ne connaît pas le coût des électrolyseurs, et cela donne deux branches totalement différentes du futur :

- si les électrolyseurs coûtent cher, il faut, pour les rentabiliser, les faire fonctionner près de 24 heures sur 24, et donc à l'aide d'une électricité produite de manière assez continue : soit du nucléaire, comme chez nous, soit éventuellement des énergies renouvelables qui puissent être produites 24h/24h, par exemple de l'éolien en Patagonie, puis, dans un tel cas, convertir l'hydrogène en des liquides énergétiques – de l'ammoniac, du méthanol ou du kérozène de synthèse –, et les faire venir chez nous par des pétroliers
- si au contraire, les électrolyseurs ne coûtent pas cher, on peut tout à fait les utiliser, chez nous, pour écrêter le surplus d'énergie solaire et d'énergie éolienne qu'il y aurait pendant, disons 20 % du temps, et s'ils ne servent à rien pendant les 80 % du temps restant, ce n'est alors pas très grave.

On voit que ces futures filières d'hydrogène seraient très différentes selon un paramètre auquel personne ne fait attention : le prix des électrolyseurs.

Dernier élément tout à fait ponctuel :

Je suis assez optimiste sur la manière dont les énergies renouvelables vont remplacer les énergies fossiles dans la fabrication de l'électricité, fabrication pour laquelle elles sont soumises au théorème de Carnot : par exemple, parce que les énergies fossiles pour la fabrication de l'électricité sont soumises au théorème de Carnot, ce ne sera pas très difficile pour les énergies renouvelables d'être moins chères que le charbon, ou que le gaz, pour fabriquer de l'électricité.

En revanche il faut aussi décarboner d'autres choses : le charbon a quand même un rôle assez important dans la sidérurgie : il y joue un rôle d'oxydoréducteur, captant l'oxygène pour obtenir du Fer réduit. Dans ce rôle il n'est pas limité par le théorème de Carnot, donc on peut faire une prédiction assez simple : le charbon va être difficile à déloger de la sidérurgie, à moins d'accepter de payer l'acier bien plus cher qu'on ne le paie aujourd'hui. Voilà quelques éléments concernant un scénario sur lequel beaucoup de monde convergerait – ou pourrait converger – actuellement.

³ Une réévaluation faite (et communiquée) depuis par Denis Bonnelle donne même un ratio deux fois plus élevé.

Le président présente ensuite Claire Kerboul, qui est physicienne, spécialisée en physique nucléaire. Elle a été chercheur au CEA, professeur associé à Chimie-Paris-Tech, conseiller scientifique auprès de la CNE2⁴ et Directeur de cabinet du Haut-Commissaire à l'Énergie Atomique avant de devenir expert indépendant administrateur des associations « Sauvons le Climat » et « PNC-France » (Patrimoine, Nucléaire et Climat). Elle est l'auteur du livre *Urgence du nucléaire durable*. Il lui donne la parole.

Claire Kerboul

Je précise que j'ai quitté le CEA il y a quelques années quand celui-ci a arrêté les recherches destinées à mettre au point un prototype de réacteur de puissance à neutrons rapides de quatrième génération et j'ai mis à profit ces années de césure pour écrire « l'urgence du nucléaire durable » qui vient de paraître (1) et qui traite du sujet suivant : « en pleine crise énergétique et climatique, comment accepter que notre pays ait abandonné la voie du nucléaire durable ? ».

Franck Carré nous a dressé ce matin un panorama extrêmement complet, détaillé et précis de l'électronucléaire. Pour éclairer cette table ronde, je vous propose de nous poser la question : « quel doit être le cahier des charges de l'électronucléaire aujourd'hui dans le cadre de cette crise, ou plutôt de ce long tunnel où nous sommes maintenant en train de nous avancer, avec à la fois des problématiques énergétique, climatique, voire géopolitique ».

Je vous propose d'examiner ce cahier des charges. Hier, on a beaucoup parlé d'Intelligence artificielle, et aujourd'hui un peu aussi. Quand vous demandez à une Intelligence artificielle : « le nucléaire durable, c'est quoi ? », une des images qui sort, c'est le nucléaire colorié « en rose ». Un mot est venu aussi en filigrane dans de nombreux exposés de ce colloque : le mot durable. Je vous propose que l'on s'arrête à sa définition, parce que cette définition existe, elle est précise, elle nous a été donnée par l'ONU en 1987, dans un rapport fameux, le rapport Brundtland (2), du nom de la Première ministre norvégienne qui a piloté ces travaux. Le principe de ce développement durable est « un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes, sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». Dans ce rapport, il y a trois objectifs majeurs qui sont donnés à tout développement qui se prétendrait durable. Le premier objectif, économiser la ressource naturelle – très important –, le deuxième, minimiser les déchets produits, au premier rang desquels les gaz à effet de serre, qui ont embarqué le climat dans des zones de fonctionnement du climat de grande incertitude ; et le troisième, être socialement et économiquement acceptable. Je pense que ces trois objectifs, dans l'espèce de bouillie de ce que l'on entend parfois et où le mot durable est employé à tort et à travers, peuvent être une grille de lecture assez pertinente. En particulier, ça peut nous montrer que l'hydraulique est une énergie renouvelable et durable, que l'éolien et le photovoltaïque sont des énergies renouvelables, mais non durables. Quant au nucléaire : on sait qu'il n'est pas renouvelable, mais peut-il être durable ? Je reviens alors sur la question de la ressource : pratiquement la totalité de l'électronucléaire dans le monde, représentant actuellement 400 GW de puissance, repose sur la fission de

⁴ Commission nationale d'évaluation de la recherche sur la gestion des matières et des déchets radioactifs (loi du 28 juin 2006)

l'isotope 235, l'un des isotopes de l'uranium. Or cet isotope est présent dans moins de 1 % de l'uranium naturel que l'on extrait de la croûte terrestre. Le reste, à plus de 99 %, est constitué d'uranium 238. Donc, face aux exigences de la durabilité, le nucléaire actuel constitue un gaspillage de la ressource naturelle (cf. figure 1).

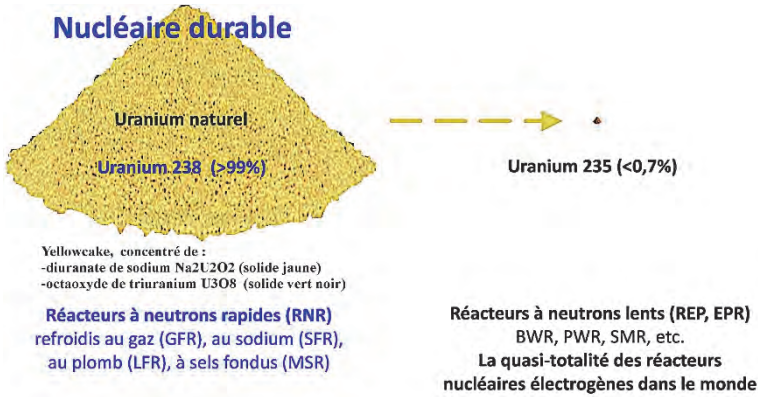


Figure 1. Le gaspillage d'une ressource limitée : le minerai d'uranium

Je sais que les collègues n'aiment pas que je prononce ce mot, mais n'ayons pas peur de le faire : on est dans le gaspillage. Les physiciens le savent très bien, depuis le début de l'électronucléaire, depuis le premier réacteur électrogène dans le monde que Fermi a mis au point pour effectivement montrer qu'on était capable de maîtriser la réaction en chaîne au point de produire de l'électricité : c'était un réacteur fonctionnant avec des neutrons rapides. Seuls en effet les neutrons rapides peuvent fissionner l'uranium 238, qui n'est pas fissile, mais seulement « fissible » : soit directement, soit en transmutant le noyau d'uranium 238 – après qu'il a capturé un neutron – en plutonium 239 qui lui est fissile. Le réacteur à neutrons rapides est de fait la seule technologie performante du processus de fission. Son spectre de neutrons rapides lui permet de fissionner toute la matière fissible disponible dans l'uranium naturel. C'est par définition la technologie de l'électronucléaire durable.

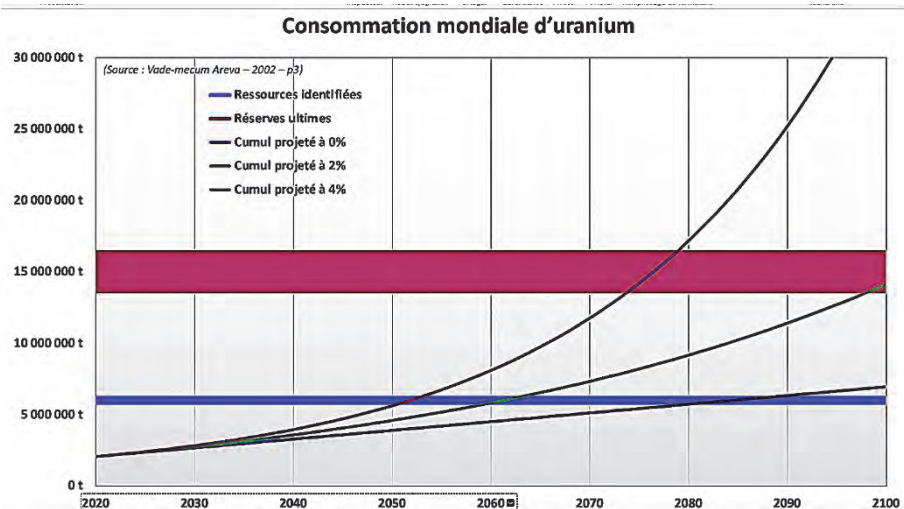


Figure 2. Prévisions 2020-2100 de la consommation d'uranium, comparées aux réserves estimées.

Pour terminer je vous propose une évaluation – j’ai vérifié mes calculs avec Dominique Grenèche, qui est un des meilleurs experts nucléaires, également à PNC France – de ce qui nous reste en matière de ressource d’uranium, qui est notre espoir pour le futur, vu qu’il ne faut pas trop croire à court terme à la fusion. Sur la figure 2, la bande bleue représente les réserves identifiées d’uranium, la bande rouge ce qu’on appelle les réserves ultimes. Pour tous les géophysiciens du monde entier, l’évaluation des réserves ultimes d’uranium – qui a fait l’objet d’un nombre considérable d’études, donne environ 15 millions de tonnes, plus ou moins 2 millions de tonnes. La courbe basse représente ce qu’on est en train de consommer à raison de 60 000 tonnes chaque année pour le parc mondial existant de 400 GW : si on n’augmente pas le parc nucléaire, on est à peu près certain de fonctionner correctement jusqu’à la fin de ce siècle, mais pas au-delà. Prenons maintenant une première évolution de la puissance électronucléaire installée, selon la fourchette basse des prévisions de l’AIEA, soit 2 % d’augmentation, ce qui est très peu et qui ne nous permettra pas de résoudre nos problèmes énergétiques : de fait (courbe verte de la figure 2) dès le milieu du siècle on se posera des questions lorsqu’il s’agira de mettre en route de très gros réacteurs dont la durée de vie est censée être de 60 à 80 ans. Bien sûr, c’est encore pire (courbe rouge) si l’on envisage une croissance annuelle de 4 %.

Revenons maintenant au problème de la répartition de nos sources d’énergie, rappelé par Franck Carré ce matin, puis par Denis Bonnelle. Notre consommation d’énergie s’alimente (figure 3) pour plus de 80 % de fossiles, de très peu d’énergies renouvelables alternatives, éolien et photovoltaïque (quelques %), de très peu d’hydraulique (quelques %), et de très peu de nucléaire (quelques %). La question de cette table ronde, « quelles perspectives pour une transition écologique ? », c’est de faire face à un monde où, en raison de la lutte contre le dérèglement climatique, il ne devrait plus du tout y avoir d’énergie fossile.

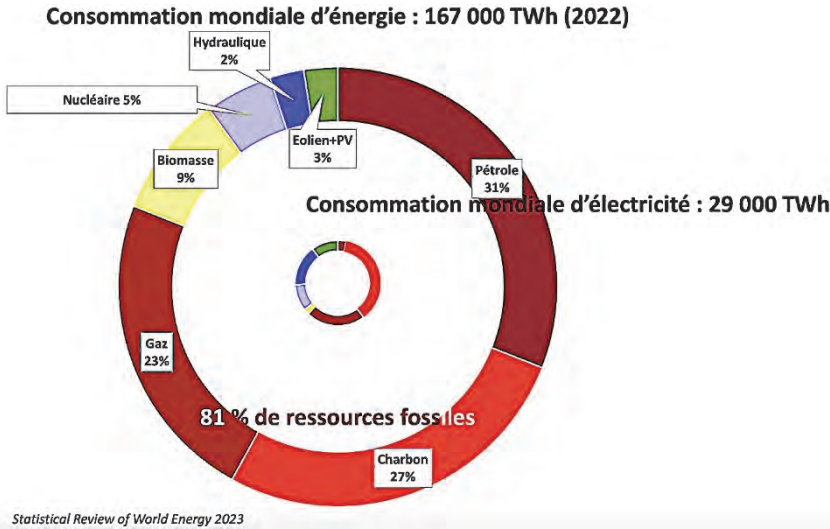


Figure 3. Répartition actuelle (2022) des sources de l’énergie consommée mondialement.

Et c’est probablement au moins partiellement vers une telle situation que l’on va se diriger. Que nous reste-t-il alors pour faire fonctionner une humanité qui s’approcherait de 10 milliards d’êtres humains ? Le nucléaire, dans cette situation, n’est plus une option, c’est une nécessité. Mais il faut regarder les questions qu’il pose d’abord en termes de ressource et non plus en termes de déchets. Regarder en termes d’économie

de la ressource et de ce point de vue, le plutonium c'est de l'or, ce n'est pas un déchet. Et donc voir les réacteurs à neutrons rapides, les « RNR », comme au centre de la relance du nucléaire, ce qui n'est absolument pas le cas aujourd'hui, et non pas comme un outil d'appoint au nucléaire existant. Parce que le nucléaire existant, au vu des courbes d'évolution, à force de consommer la seule matière fissile qui existe dans le monde, l'uranium 235, à la fin du siècle, il n'y en aura plus, et l'électronucléaire s'arrêtera.

Le président présente enfin *Philippe Kourilsky*, biologiste, directeur général honoraire de l'Institut Pasteur, Professeur honoraire au Collège de France, Membre de l'Académie des Sciences. Ses recherches portent sur les applications de la génétique et de l'immunologie. Il est l'auteur de nombreuses publications telles *Les Artisans de l'Hérédité*, *la Science en Partage*, *Du bon usage du principe de précaution*, *Vaccination, quand l'Ethique devient immorale*, *Le jeu du hasard et de la complexité, une nouvelle science de l'immunologie*.

Philippe Kourilsky

Je ne vais pas parler énergie, mais plutôt climat et environnement, ce qui va me permettre d'inclure des questions biologiques. Comme dans ce colloque il était question de pandémie, je voudrais jouer un peu sur les mots, ce qui est le B-A-BA de la philosophie d'ailleurs, et partir de la définition de la pandémie. Une pandémie, ce n'est pas seulement une épidémie mondiale comme celle du CoVid19. L'OMS parle d'une épidémie d'obésité, et il est intéressant de s'y arrêter. Quand le pasteurien que je suis imaginé Louis Pasteur concevant un vaccin contre l'obésité, je soulève un problème de fond, puisque que ce vaccin serait essentiellement un vaccin social : la prévention de l'obésité est en effet aujourd'hui avant tout une problématique sociale.

Cette idée me permet de glisser de la biologie pure à des problèmes de société, de savoir social, d'acceptabilité. Je citerai donc un exemple, celui des OGM, qui scientifiquement et médicalement parlant, n'entraînent que des risques nuls ou pratiquement nuls, et qui ne sont cependant pas acceptés par la population dans une partie du globe, avec des conséquences dont on pourra discuter. Il y a aujourd'hui un grand débat qui, j'espère, va être tranché en Europe de façon positive, concernant l'utilisation des ciseaux génétiques. Cette technique est considérée par ses opposants comme des techniques OGM, alors qu'elle est un instrument de modification génétique tout à fait remarquable d'une part, mais contrôlable d'autre part. Je cite cet exemple, dont nous pourrions parler si vous le souhaitez, pour souligner que l'adaptation des plantes à l'évolution du climat va avoir besoin, a déjà besoin en fait, de ces technologies, pratiquées abondamment ailleurs qu'en Europe, en Chine et dans d'autres pays, aux États-Unis bien sûr. Souligner aussi qu'on est en train de prendre un retard phénoménal, pour des raisons purement idéologiques.

Je voudrais insister maintenant sur deux autres points. Le premier, c'est qu'une partie des savoirs scientifiques dont nous avons besoin pour réaliser la transition écologique se trouve sur le terrain. J'ai été très frappé quand, étant moi-même Professeur au Collège de France j'ai écouté mon collègue Descola parler des savoirs indigènes d'Amazonie. En réalité, nous ne prenons pas en compte nos propres savoirs indigènes : en France, en Europe et partout, les gens savent beaucoup de choses : il y a plein d'expériences de terrain qui ne remontent pas vers les sphères scientifiques. Cela soulève a un problème que je mentionne au passage, que je ne discuterai pas maintenant, celui de ce qu'on appelle la science participative, et du fait

qu'effectivement, les citoyens savent des choses qu'on ne sait pas encore collecter et utiliser correctement. Ce n'est pas dans un rapport asymétrique, où le scientifique dit au citoyen ce qu'il faut faire, que ça peut fonctionner. Il y a tout un débat possible sur ce point-là.

Le dernier point que je voudrais mentionner et soumettre à la discussion est le suivant : lorsque je réfléchis à l'écologie en général, je suis amené à formuler mon propre slogan. L'écologie, évidemment nécessaire pour accompagner ou guider la transition environnementale, *l'écologie est une science morale*.

- C'est d'abord une *science* : il faut trier ce qui est scientifique de ce qui est idéologique, j'en ai déjà parlé à propos des OGM. La même exigence se retrouve à propos du nucléaire bien sûr, et de plein de choses... ça c'est un premier point.
- C'est ensuite une *science morale* : il y a en arrière-plan un problème d'éthique fondamental : à quoi sert-il de régler les problèmes climatiques en France s'ils ne sont pas réglés en Afrique et en Inde ? Il y a donc bien un problème de *partage*, problème d'éthique, de morale si vous voulez, avec des conséquences tout à fait pratiques qu'on a vues par exemple dans l'épidémie de Covid-19 : lors de cette épidémie on a vacciné dans les pays en développement avec un certain retard, ce qui a causé plusieurs millions de morts... La question morale, la question du partage, apparaît également dans un autre thème, celui du financement des innovations nécessaires à la transition et du partage des brevets. Une question difficile, qui doit être posée à mon avis.

Le président de séance ouvre alors le débat avec les personnes de l'auditoire.

Les échanges avec l'auditoire

Question de Jacky Rousselle : Je voulais réagir aux propos de Mr Bonnelle sur le fait que le charbon est difficile à déloger de la sidérurgie. Je pense qu'il y a maintenant des projets effectifs, par le sidérurgiste français SACILOR Metal à Dunkerque, de remplacer le charbon par de l'hydrogène, par la réduction directe du minerai, de l'oxyde ferrique de Fer. Ce sont des réalités, en France, en Europe sans doute. En regard aussi aux propos de Mr Kourilsky, ces technologies qui se développent chez nous pour les objectifs de décarbonation ne vont pas se développer de sitôt dans d'autres pays, pour des raisons peut-être de propriété intellectuelle qui ont été évoquées. La banque BNP-Paribas vient d'annoncer qu'elle ne finance plus les projets utilisant le charbon dans la sidérurgie.

Réponse de Denis Bonnelle : Merci. Il y a effectivement une hypothèse que je n'ai pas évoquée par rapport à la sidérurgie, c'est qu'on peut toujours fabriquer du fer avec de l'hydrogène. Mais si l'hydrogène est fabriqué à partir de gaz naturel, ça reste en fait une utilisation d'énergie fossile. Mais dans ces conditions on peut essayer, lors de la fabrication d'hydrogène à partir de gaz naturel, de capturer le CO₂ et ensuite de le stocker géologiquement, c'est alors bien une alternative. J'avais juste comparé, c'est pour ça que je pouvais introduire le théorème de Carnot, et là je suis sûr de ce que je dis, une fabrication d'hydrogène 100 % décarbonée, c'est-à-dire uniquement soit nucléaire, soit renouvelable, mais pas une fabrication d'hydrogène par la voie d'utilisation de gaz naturel et de stockage du CO₂. Je ne suis pas très au courant des projets de la sidérurgie concernant cette technique, en revanche, les statistiques sont claires : aujourd'hui, 99,9 % de l'hydrogène qui est fabriqué, essentiellement pour les

besoins de l'industrie chimique, proviennent du gaz naturel, en laissant le CO₂ s'échapper dans l'atmosphère, même s'il y a peut-être quelques avant-gardistes qui essaient de le capturer. Alors il y a toute une terminologie de couleurs sur l'hydrogène, plein de couleurs possibles... l'hydrogène vert, c'est pour l'avenir... j'ai oublié de préciser... c'est vrai que je réfléchis surtout à un système énergétique tel qu'il sera peut-être dans 20 ans ou dans 30 ans... Je ne suis pas un grand spécialiste de ce qui se passe exactement aujourd'hui.

Question de Jean-Pierre Treuil : Je voulais faire part d'une réaction que j'ai eue lorsque le Professeur Kourilsky a parlé d'idéologie. Parce que le mot idéologie est vu comme négatif, comme quelque chose qui est irrationnel ; mais la question, dans le fond... on peut défendre une position en dehors de tout raisonnement utilitaire ou économique, par philosophie, par souci d'une valeur à opposer à une autre : par exemple, une valeur de respecter la nature, au lieu de la mépriser ou de l'exploiter jusqu'au bout de ce que permettent nos capacités humaines. Bien sûr, si cette position entraîne la faillite de l'humanité, la disparition de l'humanité, parce qu'on ne peut plus la nourrir par exemple, on peut estimer qu'elle est condamnable en soi puisqu'elle fait disparaître un des éléments du problème. Mais, comme beaucoup de gens sans doute, je suis toujours partagé entre une admiration sincère envers l'aventure technologique et scientifique humaine, qui me paraît un fondement de l'humanité, et le discours qui consiste à dire : on a pris une position idéologique, qui nous autorise à exploiter jusqu'au bout la nature, sans respect pour elle, jusqu'au bout le monde vivant, sans respect pour lui... cette position, cette façon que l'humanité a eu d'agir depuis quelques siècles, on peut vouloir la refuser aussi...

Réponse de Philippe Kourilsky : C'est Janus si vous voulez. Un scientifique a le droit d'avoir ses croyances, mais quand il fait de la science, ce n'est pas pareil. S'agissant des OGM, l'opposition qui dit que c'est scandaleux parce qu'on touche à la nature, est hors du champ scientifique. Je reviens au pasteurien que je suis... un vaccin, ça n'a rien de naturel... les médicaments, ça n'a rien de naturel... il y en a quelques-uns qui le sont, mais enfin, il faut encore les utiliser de façon non naturelle... Quand on sait en plus qu'aujourd'hui, 60 à 70 % des nouveaux anti-cancéreux sont des OGM, on nage dans une absurdité complète. C'est cette absurdité-là que je combats. Sachant que cette absurdité-là, elle est pratiquée d'un côté de l'Atlantique et pas de l'autre. Donc en fait on a un témoin, en termes scientifiques, on peut voir ce que ça donne d'un côté, et ce que ça donne de l'autre. La politique française que j'ai suivie en la matière depuis le début, est intéressante parce que – il se trouve qu'il y a déjà presque 25 ans – j'ai été mandaté pour faire un rapport pour le Premier ministre sur le principe de précaution (3), et donc à ce moment-là on a étudié la question des OGM, du nucléaire, etc. Et ce qui est tout à fait frappant là-dedans c'est que l'idéologie dominante sur les OGM en Europe n'était pas du tout partagée aux États-Unis, ni en Inde ni en Chine d'ailleurs, et si en on retrace l'historique, ça remonte de mémoire aux élections européennes de 89, où les partis écologistes se sont retrouvés en capacité d'arbitre. Ils ont négocié leurs voix contre l'interdiction. Après quoi mes rapports avec des membres bien placés dans l'État m'ont fait comprendre à partir de ce rapport, qu'ils ne défendraient pas les OGM, car ils avaient négocié OGM contre nucléaire, pour avoir la paix... Pour vous dire que le respect de la nature a toute sa valeur, ce n'est pas moi qui vais dire le contraire, mais encore une fois, la science c'est la science, et l'idéologie, c'est autre chose. Jacques Monod, pour qui j'ai beaucoup d'admiration, avait cette phrase qu'il utilisait souvent : « il n'y a pas de pire virus que le virus idéologique » (4). Et effectivement, ça me ramène à mon premier propos sur la définition d'une pandémie : ce n'est pas pour rien qu'on utilise le terme

d'information virale. On touche bien d'un côté à un problème biologique, mais d'un autre côté à un problème social, celui des mécanismes de propagation. S'il y a des épidémies d'obésité qui touchent aujourd'hui 2 milliards de personnes, ce n'est pas rien. On peut aussi se poser la question des épidémies de violence, etc. L'existence d'épidémies sociales est bien à prendre en compte.

Question de la salle : Je vais continuer sur le même sujet, un peu... je suis un peu comme tout le monde ici, on a un certain âge, donc un peu d'expérience. J'ai été pendant 40 ans élu local, et je le suis toujours d'ailleurs, entre autres choses, en plus d'être physicien. C'est vrai que dès qu'il y a des milliards en jeu, immédiatement, la guerre économique est derrière, et il faut se méfier beaucoup de la désinformation, de la manipulation. Parce qu'on sait que, quelques personnes bien placées, des hackers, des services plus ou moins secrets, arrivent à manipuler les élections dans les plus grands pays du monde. C'est extrêmement dangereux... Vous avez parlé des OGM, c'est sûr, la transition énergétique c'est pareil. En médecine, entend-on des gens nous expliquer les vraies raisons du rejet de la médecine naturelle : elle ferait concurrence à l'allopathie, les labos pharmaceutiques voudraient capter pour eux seuls 80 % du budget de la Sécu... C'est vrai que la science informative ça aiderait, oui, mais l'information qui circule sur les réseaux sociaux, n'est pas tout à fait celle qu'il faudrait : sans sélection, les gens répètent ce qu'ils ont lu ou entendu, et ils ne vont pas forcément propager les bonnes informations... S'y ajoute la baisse du niveau éducatif, qui est réelle, surtout en France – je suis effaré en voyant mes petits-enfants – et l'influence des réseaux, on voit bien qu'aujourd'hui tout est fait pour la consommation, pour augmenter la richesse des plus riches, et essayer de voir comment on peut capter le maximum d'argent. Il faut en faire de bons consommateurs, c'est le seul but, et pour être de bons consommateurs il faut ne pas réfléchir et subir les images des réseaux sociaux, se voir imposer des publicités qui vont vous pousser, sans que vous vous en aperceviez, à acheter. Donc oui, c'est vrai que pour revenir aux OGM, c'est une des grandes catastrophes... on attend toujours le riz doré...

Réaction d'Isabelle Alvarez : Je voudrais ajouter un petit mot sur le problème des OGM, qui pour moi est lié à une mauvaise articulation entre les sciences fondamentale et appliquée, et sur le transfert de l'innovation des laboratoires vers le monde réel. Je ne suis pas spécialiste du sujet, mais il me semble que le problème des OGM au départ venait de ce que les premiers OGM avaient des marqueurs pour vérifier le fait que l'introduction de gènes avait correctement fonctionné, et qu'en laboratoire on avait utilisé comme marqueurs des gènes de résistance aux antibiotiques. Le problème c'est qu'au moment du transfert de l'innovation vers le monde réel, ces premiers OGM sont restés les mêmes, sans que ces marqueurs gènes de résistance n'aient été retirés. Ce n'est pas quelque chose qu'on peut oublier facilement. Pour moi c'est bien une faute, une faute originelle de cette science des OGM. Je ne dirai pas que les buts des scientifiques sont toujours altruistes et qu'ils cherchent le bien commun, ils cherchent la connaissance. Mais à partir du moment où le résultat de leurs travaux s'intègre dans une activité économique... Je pense que nous ne maîtrisons pas bien, et peut-être qu'on ne l'a jamais maîtrisé dans l'histoire de l'humanité, le passage de la science au transfert de l'innovation dans le monde réel. Je pense que ce n'est pas seulement un problème de désinformation ou d'idéologie. C'est un problème de respect de bonnes pratiques dans le transfert de l'innovation. C'est peut-être un problème qui pourrait se régler de manière politique : on pourrait mettre la question sur la place publique, en discuter et faire en sorte qu'il y ait des règles claires.

Réponse de Philippe Kourilsky : Il y a quand même un problème de posture générale par rapport à la prise de risque. Tout transfert technologique emporte avec lui des risques,

c'est clair, forcément. Les scientifiques ont parfois, et vous avez raison, tendance à ne pas les voir, et la discussion publique est tout à fait essentielle pour mieux les appréhender. Là je suis totalement d'accord avec vous. Mais il y a une différence de posture qu'on voit très bien dans le cas des OGM. Incidemment le fait qu'il y ait un marqueur de résistance aux antibiotiques dans certains OGM n'a créé de problème sanitaire nulle part. S'il y a des problèmes de résistance aux antibiotiques, c'est parce qu'on donne des « vrais » antibiotiques aux poulets, etc.

Concernant les prises de risques, je rappelle l'exemple tout à fait remarquable où la communauté scientifique internationale s'est imposée à elle-même un moratoire, en 1975 sur la pratique du génie génétique. À partir de là, les positions ont commencé à diverger. Je les résume en un mot : aux États-Unis, l'attitude était : il y a des risques, on les analyse, ça doit se maîtriser ; en Europe, l'attitude était : il y a des risques, montrez-nous qu'il n'y en a pas, sinon on interdit tout. Donc dans un cas, vous êtes dans la situation du plus, et dans l'autre, dans la double négation qui finit par faire plus. D'où un sacré retard en matière d'innovation, voilà... Pour moi, cet exemple illustre cette différence de posture, qui fait que certaines sociétés hyper-précautionneuses se privent effectivement de certains modes d'innovations. On le fait démocratiquement, donc on s'incline devant la démocratie. Moi, je m'incline devant le fait qu'on ne peut pas faire d'OGM, bien que j'estime que c'est une bêtise. De la même manière que je m'incline devant le fait qu'on élise X ou Y, bien que X ou Y ne me plaisent pas. Mais d'un autre côté, on peut le déplorer malgré tout.

Réponse complémentaire de Denis Bonnelle : Pour continuer un peu dans ce sens, mais pour revenir peut-être sur les questions d'énergie et de climat, vous avez tout à l'heure parlé du principe de précaution, là vous êtes un peu revenu sur la même idée. Quant à moi, je me pose une question vis-à-vis de l'actualité. Pourquoi applique-t-on si peu le principe de précaution au changement climatique ? C'est-à-dire, pourquoi est-ce qu'on ne fait pas très attention avant de prendre des décisions qui aggravent le changement climatique ? Une décision qui a pesé lourd depuis 15 ans dans le mauvais sens, c'est la décision d'appliquer le principe de précaution à la sécurité routière, et pour cette raison on a fait des voitures de plus en plus lourdes. Et plus les voitures sont lourdes, plus elles consomment, et plus elles consomment, plus le climat se dégrade, il me semble que cette question n'a jamais été posée en ces termes. Il y a deux poids deux mesures ; le changement climatique apparaît pour beaucoup de gens comme quelque chose d'abstrait, de difficile à anticiper. Alors parler d'urgence climatique ?

J'ai fait une conférence il y a quelques années dans un colloque sur le temps⁵, et j'avais donné comme titre « Urgence climatique 2050, oxymore, pléonasme ou litote ? ». Je pense qu'on sera d'accord avec les autres intervenants qui ont avancé un peu la même idée. Quelles que soient nos options, on pense tous que ça va être très difficile d'arriver à respecter les échéances qui ont été définies, entre autres l'échéance 2050. Donc, c'est vraiment une urgence, angoissante lorsqu'on y pense vraiment. En même temps, on imagine bien que l'homme ou la femme « de la rue », quand on discute, lorsque l'on dit que l'urgence est pour 2050, ils en déduisent qu'il n'y a pas urgence. Il me semble qu'il pourrait y avoir un débat, essayer d'arriver à sortir de ces contradictions parce que c'est l'une des causes, me semble-t-il assez grave, des difficultés dans lesquelles on est.

Question de Wolfgang Elsaesser : Je crois que cette année, nous pouvons célébrer le 50^e anniversaire du Club de Rome. Est-ce que nous avons appris quelque chose de cette

⁵ Colloque « Timeworld » 23 novembre 2019 La Villette

initiative ? Est-ce que nous avons changé, est-ce que le monde s'est adapté, est-ce qu'il a changé ? Qu'est-ce que vous en pensez ?

Réponse de Denis Bonnelle : Je peux donner une réponse technocratique, et pour aller dans le sens contraire, il y a des gens qui disent que depuis cette époque-là, depuis 1973, depuis ce qu'on appelait à l'époque la crise de l'énergie, le PIB a fortement crû, et que la dépense d'énergie n'a pas trop crû. Ce qui signifie que l'intensité énergétique des activités économiques est allée en diminuant. Mais par contre on est effectivement en plein effet rebond : plus on fait des progrès en arrivant à émettre moins de CO₂ par unité de production économique, plus les gens se disent qu'on peut consommer davantage puisque l'on ne va pas émettre plus. C'est un deuxième malentendu, sur lequel il faut absolument insister : la pollution du climat n'a rien à voir avec les autres pollutions. La pollution du climat est cumulative, tant que l'on continue à émettre des gaz à effet de serre, leur stock augmente et le changement climatique s'aggrave. Ce n'est pas une stabilisation qu'il faut viser, c'est en théorie une réduction des émissions à quasiment zéro, pour avoir seulement une stabilisation du climat.

Complément de Claire Kerboul : Juste en complément, une petite parenthèse, un petit peu au vitriol : c'est qu'il y a beaucoup de gens qui parlent du rapport du Club de Rome (6) sans jamais l'avoir lu – évidemment ce n'est pas votre cas –, mais on attache un contenu un petit peu fantasmé à ce rapport. Ce rapport, en fait, nous dit pour la première fois, même si les échéances sont à réestimer, si les modélisations sont à améliorer, nous rappelle que les ressources sont en nombre limité, que la Terre est finie. C'est une donnée extrêmement concrète. Et c'est très intéressant de voir que c'est une sorte d'impensé collectif, cette finitude des ressources. Je le vois bien dans le domaine du nucléaire. Cette idée qu'il faudrait raisonner non pas seulement en fonction des déchets, mais raisonner en fonction de la disponibilité de la ressource. Pour une filière industrielle, vous ne verrez aucun responsable développer une stratégie sans se poser d'abord la question : de quelle ressource je dispose pour mon domaine industriel, ma production. Dans le nucléaire, on n'a pas du tout fait ça. Au tout début, les physiciens s'en sont préoccupés, les scientifiques se sont dit qu'il faut vraiment utiliser l'uranium correctement, on ne peut pas faire ce gaspillage. Et puis, on a été embarqué dans d'autres directions. C'est l'époque des années 50, 60, la concurrence avec le développement de l'industrie pétrolière est telle, les succès et la rentabilité de cette industrie sont tels, que le nucléaire, avec la nécessité d'un développement de très haute technicité, ne faisait pas le poids, quelque part...

Cette question de la ressource, elle est clé. J'ai l'impression qu'on se refuse à voir qu'il y a des limites, un peu comme les enfants qui se refusent à avoir des limites. Ces limites sont dans les deux sens : on a des limites dans la ressource, et puis on a des limites dans le fait qu'on ne peut pas se permettre de produire des déchets partout et n'importe comment, au premier rang desquels se trouvent effectivement les gaz à effet de serre, et ça c'est une limitation extraordinaire. Je peux rester des heures devant la figure 2, mais cette figure-là, normalement, c'est 2050... En 2050, on n'a plus comme énergie à notre disposition que celle de la biomasse. Depuis l'origine de l'humanité, elle est toujours à peu près 10 %, pour une raison simple, c'est qu'il faut à la fois garder une forestation suffisante, et garder de quoi nourrir la population. Il n'y a pas un miracle qui ferait que la biomasse puisse nous amener des ressources énergétiques en quantité. On a l'éolien et le photovoltaïque, qui sont certes décarbonés. Mais quand vous installez 1 Gigawatt d'éolien ou de photovoltaïque, qui sont des énergies intermittentes, il faut installer 1 Gigawatt en complément, et en général on fait ça avec des fossiles, parce que c'est ce qu'il y a de plus simple, donc du charbon et du gaz : sur ce point, l'exemple de

l'Allemagne est frappant : c'est le champion européen des énergies renouvelables intermittentes et c'est également le pays le plus émetteur de CO₂ par kWh produit. Donc, pour l'éolien et le photovoltaïque, c'est une limitation de taille. L'hydraulique, est vraiment une ressource merveilleuse, pilotable et décarbonée, mais le nombre de sites est limité, on pourra augmenter un tout petit peu... De fait, ce qu'il nous reste, c'est le nucléaire... et le nucléaire, on est en train de continuer de gaspiller la ressource... – je vais faire un petit peu de politique –, mais dans le programme de relance tel qu'on nous en parle aujourd'hui... ce n'est pas une relance du nucléaire, la relance du nucléaire serait de remettre le TGV nucléaire sur les rails du départ, qui était de faire de l'électronucléaire de fission avec des neutrons rapides, qui est le processus efficace. Je suis très contente qu'on m'ait donné la possibilité d'intervenir dans une assemblée de scientifiques... Se pose effectivement la question de savoir comment faire passer ce message des scientifiques aux politiques. Les politiques des années 60, 70, travaillaient beaucoup plus étroitement avec les scientifiques : vous aviez le Premier ministre qui téléphonait directement aux physiciens neutroniciens de Cadarache ou de Saclay. Là maintenant on a une quantité invraisemblable d'intermédiaires, qui sont très loin, souvent du laboratoire, de la réalité industrielle, de la compréhension de la physique, sans parler du fait qu'ils sont issus de notre système de formation, dont on a vu ici l'échec dans lequel il est pour transmettre les données fondamentales de la science, des mathématiques, du raisonnement, de la rationalité.

J'en profite pour dire... Je suis tout à fait d'accord avec la remarque, évidemment elle a été extrêmement bien éclairée par le Professeur Kourilsky, sur l'idéologie... Une idéologie, ce n'est pas un mot grossier, ça peut exister, dans certains domaines de la pensée. Dans la politique, dans la religion, dans la philosophie... pourquoi pas. Mais dans les domaines de la science, l'idéologie n'a pas sa place, et c'est pourquoi, concernant la durabilité, on a besoin de revenir à sa définition, revenir à ce que l'ONU nous a permis de poser noir sur blanc : c'est quoi la durabilité ? Ça nous permet, en tant que scientifiques, en tant qu'industriels, en tant qu'innovateurs... les gens chargés de faire des passerelles entre la science et ses applications, d'avoir une sorte de code éthique, de morale, à travers la durabilité : économie de la ressource, minimisation des déchets, des solutions socialement et économiquement acceptables... L'économiquement acceptable, c'est trouver des solutions à la portée des 9 milliards de la population de notre planète d'ici à 2050.

Question de la salle : Que nous dire de vrai, qui soit accessible à des gens qui n'ont pas manipulé autre chose que des pourcentages et des fractions, et qui reste vrais pour des scientifiques qui ont à leur disposition les outils mathématiques les plus évolués. L'exemple que je prendrai en lien avec ce que nous venons de dire est le suivant : nous connaissons la consommation énergétique par habitant dans chaque pays, nous connaissons la surface de chaque pays. Quand on fait la division, on voit quelles doivent être les productions par mètre carré des différentes technologies pour satisfaire les besoins par habitant. Et on se rend compte à ce moment-là qu'il y a des technologies qui ne sont pas adaptées, parce qu'elles demandent trop de mètres carrés pour produire les kilowattheures dont nous avons besoin. C'est le cas de l'éolien parce qu'on n'accepte pas une densité d'éoliennes qui continuerait à être, je dirais, une arme de destruction massive de l'environnement, on est à peine au niveau d'équilibre en ce qui concerne le solaire dans les installations solaires les plus performantes, et on s'aperçoit que les seules énergies qui sont susceptibles de répondre à ces besoins énergétiques par mètre carré sont les énergies fossiles et le nucléaire, et c'est un raisonnement de ce type-là, qui est un raisonnement uniquement fait sur des proportions et des chiffres que tout le

monde connaît, on peut à mon sens embarquer les politiques dans ce discours-là, et embarquer également le grand public, parce que, entre guillemets, c'est un peu incontournable : personne ne conteste, les statistiques ne viennent pas des gens qui sont les promoteurs du nucléaire, ou les promoteurs des éoliennes, ou les promoteurs... les chiffres viennent d'ailleurs, et ils sont là, ce sont des faits.

Réponse de Denis Bonnelle : Je vais aller un peu dans votre sens, en vous racontant une anecdote. Il y a une douzaine d'années, dans Libération, il y a eu un petit article signé de Hugues Aufray. Le chanteur expliquait qu'il avait la bonne solution pour résoudre le problème de l'énergie : c'était de revenir au topinambour, dont la distillation, pendant la guerre, permettait de produire un carburant, et il citait deux chiffres ; il citait, en gros, la consommation d'énergie de l'ensemble des automobiles françaises, et il citait le rendement énergétique des topinambours par kilomètre carré. Mais il suffisait de faire le quotient des deux chiffres : le résultat était qu'il fallait 75 % de la superficie de la France en topinambours pour arriver à remplacer l'essence⁶. Ceci pour dire qu'effectivement, dans le raisonnement classique mettant en rapport les énergies au regard des superficies qu'elles nécessitent, les agro-carburants sont un très mauvais élève. Il faut s'en débarrasser le plus vite possible. Pourquoi sont-ils très mauvais ? Il y a deux raisons objectives : la première c'est que la photosynthèse a un rendement à peu près 10 fois plus faible que le photovoltaïque ; la deuxième, c'est qu'avec les opérations nécessaires dans la production et l'exploitation de ces agro-carburants pour produire de l'énergie (fabriquer des engrais, faire avancer des tracteurs, et avec le rendement de Carnot brûler ces agro-carburants dans un moteur⁷...) on retrouve à nouveau un facteur 10 pour le rendement effectif au détriment des agro-carburants par rapport au photovoltaïque plus des batteries, donc au total un rapport 100. Donc, en substituant des fermes photovoltaïques aux agro-carburants, on obtient une production d'énergie utilisée dans les transports (des personnes et des marchandises) 100 fois plus élevée. Pour résumer, par rapport aux filières d'agro-carburants, même les plus performantes, le solaire est toujours bien meilleur ; on peut calculer qu'il faut en équiper à peu près 1 % des terres émergées pour satisfaire nos besoins. Pour l'éolien, c'est à peu près le même ratio, si ce n'est que l'éolien, évidemment, est compatible avec une agriculture en dessous.

Je voulais réagir aussi à ce qu'avait dit mon voisin au début, en disant, il faut promouvoir et utiliser la science citoyenne. Je livre ce qui suit au débat, bien que je sois pour l'éolien. J'ai rencontré des agriculteurs en Picardie, donc là où effectivement il y a des partis politiques qui prospèrent sur un mouvement anti-éolien assez important. Ces agriculteurs disent que quelques centaines de mètres ou quelques kilomètres en aval des éoliennes, il pleut moins qu'ailleurs. Pour quelqu'un qui voudrait vérifier si c'est bien une réalité, cela serait très intéressant ensuite de comprendre quelle en serait la raison physique. Une raison physique qu'il m'intéresserait de comprendre moi aussi. Ceci étant, les éoliennes ne consomment pas d'espace puisque, effectivement, on peut toujours cultiver en dessous. Alors que des fermes photovoltaïques denses n'offrent pas cette possibilité : on peut juste faire brouter quelques moutons. Il y a aussi l'agrivoltaïsme, qui sera peut-être un jour une solution de compromis pour que le

⁶ Partons en effet du ratio de terrain nécessaire pour faire pousser assez de topinambours pour permettre à une voiture de rouler sur 10 000 km : 1 ha, et du nombre de voitures en France à l'époque : 38 millions. En faisant le produit : 38 000 000 ha : c'est bien les 3/4 de l'hexagone (communication de Denis Bonnelle).

⁷ On peut ajouter que dans un champ et sur une année, on n'a pas 100 % du temps des rayons de soleil qui tombent sur de la chlorophylle... (note complémentaire de Denis Bonnelle)

photovoltaïque grignote moins de terre cultivable. Ma réponse, globalement, quand je compare au nucléaire sur ce thème des surfaces nécessaires : le nucléaire est mille fois plus concentré ; mais même s'il était cent mille fois plus concentré, ça ne changerait rien. Je reste du même avis : le photovoltaïque et l'éolien occupent certes plus de surface, mais c'est quelque chose de totalement acceptable. Et je peux aussi répondre, si on me le demande, sur ce qui s'est passé en Allemagne, qui éventuellement a consommé un peu plus d'énergie fossile : si on veut lancer le débat là-dessus, j'ai aussi de quoi répondre...

Complément de Claire Kerboul : Je complète, parce qu'évidemment, je suis d'un avis différent. Je vous montre la figure établie par « Sauvons le climat » il y a une dizaine d'années⁸, pour essayer d'y voir un petit peu plus clair sur la production éolienne et la question de son intermittence. L'éolien est effectivement intermittent. C'est une production très aléatoire, en fonction de la météo. Cependant nombre de personnes dans les ministères avançaient l'argument suivant : il y a du foisonnement en Europe, donc de toute façon s'il n'y a pas de vent à Paris, il y en a à Madrid, il y en a à Berlin, et à condition de mettre suffisamment d'éolien sur le sol européen, on arrivera à avoir la puissance nécessaire pour faire fonctionner l'économie européenne. Et donc, « Sauvons le climat », à l'époque, dans un très beau travail fait par H. Flocard et J.P. Perves, a sommé heure par heure la production éolienne des grands parcs alors installés – l'Allemagne, l'Autriche, la France, l'Espagne, le Danemark, l'Irlande, et le Royaume-Uni – et cette figure montre très bien que le profil des vents est le même partout sur tout le continent européen, et donc, quand vous avez du vent en Grèce, vous en avez aussi à Londres et à Paris, et quand vous n'en avez pas, eh bien c'est pareil pour l'ensemble de l'Europe (7). Donc, encore une fois, c'est bien pour ça qu'un pays comme l'Allemagne, qui a actuellement 50 % à peu près de son électricité assurée par l'éolien, et le photovoltaïque, complète à hauteur de 50 % par le charbon et le gaz, donc en fait, l'éolien et le photovoltaïque, vous asservissent aux fossiles. Je reviens donc à mon transparent du début... la transition écologique, je n'aime pas du tout ce mot-là, mais employons-le : en 2050, on n'a plus de fossiles. L'éolien et le photovoltaïque exclusivement : cela ne peut donc pas être la solution.

Complément de Denis Bonnelle : Concernant ce genre de question, quand j'ai commencé à être en lien avec les gens de l'IPSL où je travaille, qui sont des météorologues, j'ai participé au lancement d'une thèse ; cette thèse, en gros, cherchait à identifier quelle peut être la pire situation possible sur l'ensemble de l'Europe : une longue période sans soleil ni vent. Je pense qu'on peut être pour l'éolien et le photovoltaïque, tout en étant conscient de ce problème, sachant il faut considérer ensemble les deux techniques parce qu'elles sont quand même relativement complémentaires : il y a quand même plus souvent du vent quand il n'y a pas de soleil, donc il existe bien une certaine complémentarité. Quand je regarde cette figure, j'ai l'impression qu'il y a des pics en bleu, et que ceux en vert sont un peu à côté, alors ensuite évidemment, il y a encore des périodes sans rien. À l'IPSL, actuellement, je suis surtout impliqué dans un dialogue avec RTE, puisque RTE, Réseau de Transport d'Électricité, a en charge à la fois la prospective, et l'équilibrage du réseau. On évoquait tout à l'heure la question de savoir où sont les bons scientifiques qui font bien leur travail ? Je me suis alors demandé : soit il y a des gens ici qui sont capables de prouver que RTE sont de mauvais scientifiques qui font mal leur travail, ou de prouver que RTE a une idéologie anti-nucléaire. Mais, RTE étant une filiale d'EDF, ce serait un peu bizarre. Ou alors il faut considérer qu'RTE

⁸ SLC, Jean-Pierre Perves et Hubert Flocard, mars 2012.

fait correctement son travail, et c'est pour ça que tout à l'heure j'avais à cœur de citer le chiffre d'un facteur 13⁹ : il est 13 fois moins difficile d'équilibrer le réseau électrique avec des batteries que de fournir tout le monde en batteries pour des voitures électriques. Donc, *a priori*, pour les questions d'intermittence, on est quand même dans une très bonne voie pour leur trouver une solution, pour que ce ne soit plus un problème, et qu'on n'en parle plus.

Réaction de la salle : Je rebondis là-dessus, parce qu'à RTE effectivement il y a de très bons ingénieurs et de très bons scientifiques, mais il y a aussi des contraintes. Et quand ils publient un rapport par exemple, ils vont se conformer aux instructions gouvernementales, qui disent par exemple, 50 % de nucléaire dans le mix énergétique, donc dans toute cette affaire d'énergie, il y a les interventions de la puissance publique, qui impose des contraintes, qui impose des lois, et les 50 % sont dans la loi. Et donc, les organismes, en bons élèves s'y conforment, mais ça ne les empêche pas d'avoir dans leurs cartons des études différentes, mais qu'ils ne publient pas. Alors, ça m'amène à une chose, ça, à propos de ce qu'on nous a présenté, notamment Claire Kerboul : savoir à mon avis que l'énergie nucléaire a manqué de quelque chose, dans son histoire : c'est des entrepreneurs à la Elon Musk, ou de tout autre nom qui vous viendra à l'esprit, parce que l'énergie nucléaire a été essentiellement l'affaire des États, étant donné les circonstances dans lesquelles elle est née, et la façon dont elle a pu se développer, essentiellement à partir de laboratoires nationaux, et les États, tenant compte du volet militaire, qui est tout de même assez séparé du volet électronucléaire dans la pratique, les États se gardent un pouvoir de contrôle sur son développement. Et il y a une idée qui court, que l'on trouve un petit peu partout, en particulier chez les technocrates. Savoir, dans un pays comme la France, que le nucléaire, si on s'en tient à l'Uranium 235, ne peut être qu'une transition vers un avenir qui serait complètement réservé aux énergies renouvelables ; c'est pour ça que je dirais que pour que se développe un programme de réacteurs à neutrons rapides, et tout ce qui va avec, et bien il faudrait un Elon Musk.

Réaction de la salle : Je voulais simplement aborder brièvement deux sujets. Le premier c'était de soutenir, de partager la question posée par Claire : les neutrons rapides sont effectivement une nécessité pour inscrire le nucléaire dans la grande durée ; ça vient d'être dit. Le nucléaire a soixante ans, et on a eu des pionniers qui ont exploré toute une diversité de filières. L'Elon Musk du nucléaire, il est peut-être à venir, et je pense qu'il y a des potentiels de progrès énormes à faire, dans le domaine des matériaux, du combustible, etc. Je crois qu'il y a beaucoup d'innovations à venir, et c'est un secteur qui a toujours été résistant à l'innovation, parce que la recherche coûte très cher, et parce qu'il y a le poids de la sûreté qui est très fort, pas seulement sur les installations qui fonctionnent, mais aussi sur la recherche. Et donc, pour terminer sur ce sujet-là, je souscris tout à fait à l'importance que la France soit très présente, voire active, en faisant part de sa façon de voir les réacteurs à neutrons rapides, sa façon de voir le cycle du combustible qu'elle est un des rares pays à maîtriser, et il nous manque actuellement une décision de validation d'un réacteur, il faut le définir, il faut y travailler. Mais, à la différence de Claire Kerboul, je suis un peu plus optimiste, au sens où je pense qu'il y a 3 ans, ce qu'il y avait dans la programmation pluriannuelle de l'énergie, c'était d'arrêter 14 réacteurs pour ramener le nucléaire à 50 % de production d'électricité ; depuis quelques mois, et d'une certaine façon, la déclaration de février 2022 a jeté quelques jalons pour commencer à renouveler le parc ; alors, je suis d'accord, c'est un petit pas, mais l'effort international est là, il y a un regain d'intérêt, on l'a vu, pour compter aussi avec le

⁹ Cf. supra, note 2

nucléaire. Je pense que ça va se traduire concrètement, mais il faut le temps, il faut préparer le bon choix ; mais je ne suis pas pessimiste, et j'en prendrai comme exemple le fait que les Américains, qui ont arrêté depuis les années 80, qui ont moins besoin que nous des réacteurs à neutrons rapides, sont en train d'essayer de consolider un projet de réacteur d'essai. Les Japonais, qui étaient dans une situation pire que nous après Fukushima et qui redémarrent un à un leurs réacteurs, viennent de s'organiser pour les neutrons rapides et de mettre en place une coopération avec les États-Unis pour faire quelque chose. Il faut donc qu'on soit présents, non seulement sur le terrain national, mais aussi sur le terrain international, pour faire valoir nos conceptions de la sûreté et de la sécurité de ce type de réacteur, et le cycle du combustible. L'autre sujet, mais il est trop tard, c'est celui que je voulais brièvement aborder, savoir qu'on était condamné à trouver des solutions pour la transition énergétique ou écologique qui conviennent à tout le monde : elles doivent être acceptées, ça renvoie à la complexité, à l'interdisciplinarité, au besoin de connecter les disciplines scientifiques, à l'économie, aux sciences sociales, etc. Il faut trouver des solutions qui soient acceptables aussi en termes techniques, économiques, qui puissent être acceptées en termes de contraintes pour la société, en termes d'impact sur les individus et sur l'environnement. Il faut trouver, je pense, des solutions, faisant peut-être appel à la notion évoquée hier de noyau de viabilité, des solutions qui ne sont pas uniques, d'ailleurs. Chaque pays a son mix énergétique, chaque pays a ses propres ressources, et je crois qu'il faut imaginer des solutions qui puissent être variables, selon les pays, être relativement tolérantes, et d'une certaine façon, sortir de la boîte où on réfléchit par thématique ou pays par pays, en imaginant des solutions hybrides, ou en tolérant des solutions qui ne sont pas tellement acceptées aujourd'hui, mais pour une certaine durée, comme une transition, voire imaginer des mécanismes. Et donc, j'ai trois exemples qui me sont brièvement en tête : il y a le glyphosate, avec son impact économique, il y a la décarbonation du transport, véhicule électrique, décarbonation de la chaleur, pile à combustible, ça coûte très cher, il y a la question des éléments critiques, il faut trouver une voie de passage là-dedans, il y a la question de la transition énergétique de l'Afrique, qui doit développer beaucoup la production d'énergie parce qu'elle va se développer démographiquement, il faut qu'elle se développe économiquement ; est-ce que ce sont du solaire photovoltaïque et de l'éolien, est-ce qu'ils vont pouvoir investir dans ces technologies-là, est-ce qu'on leur donne la possibilité d'utiliser le gaz, qu'on a découvert dans le Kenya et dans d'autres régions, au moins comme solution de transition, est-ce qu'il faut trouver des mécanismes où ce sont les pays développés qui investissent dans des énergies décarbonées dans ces pays-là, en contrepartie de crédits carbone qui seront reconnus chez nous ; il y a tout un ensemble de mécanismes, de complexité à gérer pour lesquels il faut inventer la façon de les traiter, mais d'une façon qui conduise à des solutions.

Conclusion, par Jean Schmets

Je suis à la fois ravi et très mal à l'aise, parce qu'il est 5 heures, et c'était l'heure de la fin de ce questions-réponses... Je vous invite surtout à venir aux prochains colloques de l'Académie.

À la fin de cette table ronde, il me revient de dire quelques mots. Tout d'abord, des mots de remerciement, à vous tous pour votre présence, votre intérêt pour ce sujet fort préoccupant « Interdépendance, pandémies et changement climatique ». Je tiens aussi à remercier très vivement les intervenants de cette table ronde, Denis Bonnelle, Claire

Kerboul, et Philippe Kourilsky, qui nous ont fait part de leurs connaissances. Ne comptez pas sur moi pour tirer les conclusions de l'échange de questions et réponses auquel nous venons de participer. Chacun pourra réfléchir et se faire son idée personnelle. Pandémie et changement climatique constituent des phénomènes que nous côtoyons, que nous vivons, que nous craignons, mais que nous avons la sensation de comprendre, de saisir... Le troisième mot, « Interdépendance » est lui aussi très important, il est apparu dans toutes les conférences, et même dans la plupart des questions et réponses. Pour les scientifiques, il est aussi essentiel que celui d'interdisciplinarité, mot qui intervient dans la dénomination de l'Académie. Je ne résiste pas à vous lire 9 lignes extraites du synopsis de la brochure du colloque :

« On mesure à quel point les questions qui se posent pour la gouvernance des populations mondiales sont enchevêtrées, interdépendantes. Ces complexités exigent des scientifiques qu'ils apprennent à communiquer, et, pour cela, il faut que l'enseignement des disciplines soit décroisé, et que les disciplines, à leurs limites communes, s'interpénètrent. L'interdisciplinarité est aux sciences ce que la coopération est aux êtres vivants. Elle correspond à l'injonction de Newton : "construisez des ponts, pas des murs" ».

Références

(1) Claire Kerboul, *L'urgence du nucléaire durable*, Editions Deboeck Supérieur, 2023. 176 pages, ISBN-13 9782807357488

(2) Rapport Brundtland. *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*. World Commission on Environment and Development (WCED), 1987.

<https://www.bing.com/ck/a?!&&p=80b800a03327b7cb62065af01f9e59add6049757bb335b0ce4b667c9671761b0JmltdHM9MTczMjA2MDgwMA&ptn=3&ver=2&hsh=4&fclid=0d7ae70f-99ed-626d-3b6b-f39a98fd63b9&u=a1aHR0cHM6Ly9zdXN0YWluYWJsZWRI dmVsb3BtZW50LnVuLm9yZy9j b250ZW50L2RvY3VtZW50cy81OTg3b3VyLWNvbW1vbi1mdXR1cmUucGRm&ntb=1>

(3) Philippe Kourilsky, Geneviève Viney, *Le principe de précaution. Rapport au Premier ministre*. Editions Odile Jacob, Paris 2000. Philippe Kourilsky, *Mes années Pasteur*. Editions Odile Jacob, Paris 2023.

(4) Jacques Dufresne, *Les trois virus : biologique, informatique et idéologique*.

<https://www.bing.com/ck/a?!&&p=d8785eadd6312c08997c64c633e049681d4c85b53162cfec1b36f45d5a33bac7JmltdHM9MTczMjA2MDgwMA&ptn=3&ver=2&hsh=4&fclid=0d7ae70f-99ed-626d-3b6b-f39a98fd63b9&u=a1aHR0cHM6Ly9hZ29yYS5ob21vdml2ZW5zLm9yZy9qYWNxdWVzLW R1ZnJlc25lL2xlcY10cm9pcy12aXJ1cy1iaW9sb2dpcXVlLWluZm9ybWFOaXF1ZS1ldC1pZGV vbG9naXF1ZQ&ntb=1>

(5) Denis Bonnelle, *5 défis techniques XXL pour le climat*. The BookEdition.com, pages 157. Lille, France. Référence 295912.

(6) Le Club de Rome. Donella Meadows, Dennis Meadows, Jorgen Randers, William W. Behrens, *Les Limites à la Croissance*. The Limits to Growth, Chelsea Green Publishing, 1 Octobre 1972.

(7) Le Manifeste de Sauvons Le Climat. Copyright@ 2023 Association Sauvons Le Climat (version actualisée).

Quatrième partie :

Agir et Éduquer

Les parties précédentes de l'ouvrage présentent un état de l'art, certes très partiel, des connaissances scientifiques acquises dans les domaines qu'elles abordent. Connaissances de natures diverses, sur des faits, sur des outils de réflexion et des moyens d'action possibles, sur des incertitudes ou des ignorances qui subsistent. Mais il apparaît bien – c'est peut-être une leçon de l'Histoire – que la disponibilité de ces connaissances n'assure pas que les problèmes rencontrés par les sociétés soient effectivement surmontés. Il y a à cela plusieurs raisons. Il se peut, par exemple, que ces connaissances soient très insuffisantes, laissant donc légitimement une grande marge à d'autres critères. Mais à l'époque actuelle, d'autres facteurs se manifestent à différents niveaux de responsabilité dans la conduite des actions : l'ignorance de fait ou choisie, voire le déni ; la difficulté d'appréhender la complexité des choses, d'en évaluer les conséquences probables ; la négligence délibérée, car utile aux intérêts matériels ou sociaux des décideurs ; la perte de confiance dans la parole des institutions scientifiques, qui empêche les populations d'adhérer à certains faits pourtant rigoureusement établis et d'accepter certaines directives.

Tous ces éléments font que les intentions, restons-en ici à celles qui nous paraissent *a priori* aller dans la bonne direction, peuvent, face à « la réalité », n'aboutir que très partiellement et moins rapidement qu'attendu. Les quatre chapitres de cette quatrième partie en fournissent en quelque sorte une illustration. Ils exposent chacun des élans, des volontés, des idées, des projets porteurs, mais dont on perçoit les risques d'épuisement avant que se manifestent les changements espérés. Mais ces risques ne doivent pas décourager.

Le premier chapitre, signé par notre collègue Eric Chenin, présente, face au changement climatique, des exemples de recommandations à mettre en œuvre à un niveau local ou régional, à partir du cas particulier d'une grande région française, la Nouvelle-Aquitaine : recommandations tendant à une baisse des émissions nettes régionales de gaz à effet de serre, et recommandations visant l'adaptation aux évolutions spécifiques anticipées dans cette région. Ce chapitre a été écrit à partir d'un rapport établi par les autorités régionales sous la direction d'un climatologue bien connu, Hervé Le Treut. Le rapport dresse un tableau des vulnérabilités et des facteurs d'inertie présents dans différents secteurs d'activités ou territoires de la Nouvelle-Aquitaine. Si les recommandations émises se sont dans certains cas traduites par des projets précis, leur mise en œuvre effective se heurte souvent à la complexité des choses, d'où d'inévitables incertitudes et tâtonnements.

Dans le second chapitre, Pierre Lenders, spécialiste des placements financiers, analyse les conséquences – à partir des années 2000 – de la montée des inquiétudes climatiques sur les produits financiers proposés et les motivations des investisseurs. Il retrace ainsi l'historique de ce que l'on a appelé la « finance verte », destinée à promouvoir une économie décarbonée ou « décarbonnante ». Il rend compte dans cet historique de sa montée en puissance, en particulier depuis les accords de Paris conclus lors de la COP 21 en décembre 2015. Montée en puissance qui faisait alors espérer que le jeu des marchés financiers pourrait impulser une trajectoire économique vertueuse permettant d'atteindre les objectifs des accords. Mais cette espérance a fait place à une certaine désillusion. En effet, les propositions de la finance verte, analysées dans leur diversité, n'ont pas produit les impacts escomptés, ni sur le plan de l'économie réelle, ni sur celui des performances financières elles-mêmes. Face à ce constat, la fin du chapitre aborde les causes de ces échecs et les conditions d'une réelle efficacité.

La capacité à démêler le réseau des déterminismes physiques, biologiques et sociaux dans lesquels nous sommes pris est liée à notre compréhension des méthodes et des apports des différentes disciplines scientifiques. Mais aussi à la compréhension des relations que ces méthodes et ces apports entretiennent les uns avec les autres. Promouvoir la pluridisciplinarité, développer l'interdisciplinarité s'avèrent donc des actions nécessaires. Mais qui doit-on éduquer à ces manières d'aborder la complexité ? Les jeunes, les décideurs politiques et économiques, ou plus généralement tous les citoyens ? Et comment le faire sans tomber dans l'idéologie et la pression de différents lobbies ? Pour ce qui concerne les jeunes, leur éducation relève du ministère de l'Éducation nationale qui a entrepris de nombreux efforts pour introduire l'interdisciplinarité dans les enseignements scolaires et universitaires. Anne Burban s'attache, dans le troisième chapitre, à en décrire un historique et à en analyser les effets. Elle y retrace la succession des projets, ceux qui se sont maintenus et ceux qui sont tombés dans des impasses, et analyse les causes de ces diverses trajectoires. Ces projets se heurtent tout d'abord à la nécessité que les élèves et les étudiants aient déjà une formation solide dans les différentes disciplines scientifiques pour pouvoir aborder avec profit ce qui relève de la pluridisciplinarité. Ils se heurtent ainsi à la crise que connaît depuis plusieurs années l'Éducation nationale, qui doit notamment faire face à la dégradation du niveau des élèves et à la baisse des vocations d'enseignants.

Les causes et les effets du changement climatique concernent le fonctionnement global de la planète et la vie de l'Humanité dans son ensemble. Le dernier chapitre concerne l'une des actions possibles à un niveau international : celle consistant à faire prendre conscience, aux décideurs, mais aussi au grand public, qu'aucune solution viable ne sera trouvée sans la contribution collective des sciences fondamentales, et plus largement de toutes les sciences. Il s'agit de créer les conditions d'une réelle (et libre) intégration, par les diverses sociétés humaines, de tous les apports scientifiques en lien avec cette problématique. Ceci suppose d'assurer simultanément les conditions – académiques, réglementaires, politiques – pour que la question de la durabilité du développement humain, sous ses divers aspects, puisse être traitée scientifiquement. C'est pour atteindre de tels objectifs que s'est tenue, au début des années 2020, sous le patronage Onusien, une Année Internationale des Sciences Fondamentales pour le Développement Durable, qui va se prolonger, toujours sous le même patronage, par une Décennie Internationale des Sciences pour le Développement Durable. Ce sont ces deux initiatives que Michel Spiro, qui en a été l'un des promoteurs principaux, présente en cette fin de partie. En soulignant que, malgré la conjoncture internationale actuelle, nécessité est de ne pas se considérer vaincu, de garder son optimisme.

Le changement climatique, défi global et action locale : L'exemple de la Nouvelle-Aquitaine

Eric Chenin

AEIS

Abstract

This chapter originates from the presentation given by Hervé Le Treut during the monthly AEIS session on January 9, 2023; the presentation is available on our academy's website. The presentation was entitled "From Climate Models to Environmental Changes: How Can We Grasp Them?" In this talk, Hervé Le Treut recalled the history of the awareness of climate change and its anthropogenic origin. He also highlighted some major data on the recent evolution of temperatures, the growth of annual CO₂ emissions, and the remaining scope for action to limit the temperature increase to 2% above the average level of the pre-industrial era. Hervé Le Treut finally mentioned the AcclimaTerra report, drafted under his direction. This report, entitled "Anticipating Climate Change in Nouvelle-Aquitaine to Act in the Territories," is based on a central idea: while climate change is a global phenomenon requiring global mobilisation, its impact, the measures to mitigate it, and the necessary adaptations are implemented locally. Hervé Le Treut was unable to participate in our conference. Nevertheless, in this publication, under our sole responsibility, we have chosen to include certain elements from the January 9 presentation and the AcclimaTerra report. The aim is to illustrate some concrete manifestations of climate change in a French region and some regional or even local measures to address these manifestations.

1. Introduction

Ce chapitre prend sa source dans l'exposé qu'Hervé Le Treut¹ avait présenté lors de la séance mensuelle de l'AEIS du 9 janvier 2023 ; exposé disponible sur le site de notre académie. L'exposé avait pour titre « Des modèles climatiques aux évolutions environnementales, comment s'en saisir ? ». Dans cet exposé, Hervé Le Treut rappelait l'historique de la prise de conscience du changement climatique et de son origine anthropique. Il rappelait également quelques données majeures sur l'évolution récente des températures, de la croissance des émissions annuelles de CO₂, des marges d'action qui nous restaient encore pour limiter la hausse des températures à 2 % au-dessus du niveau moyen de l'ère préindustrielle. Il évoquait enfin le rapport *AcclimaTerra* et sa mise à jour.

Bien qu'invité pour parler sur le même thème, Hervé Le Treut n'a pas pu participer à notre Colloque AEIS « Interdépendance, Pandémies et Changement Climatique ». Nous

¹ Hervé Le Treut, membre de l'Académie des Sciences, est un climatologue spécialiste de la simulation numérique du Climat. Rappelons seulement ici, parmi ses nombreux titres, fonctions et ouvrages qu'il a dirigé l'Institut Pierre Simon Laplace de 2008 à 2019 et qu'il a participé aux travaux du GIEC.

avons tenu cependant dans cet ouvrage – sous notre seule responsabilité – à reprendre certains éléments de l'exposé du 9 janvier et du rapport *AcclimaTerra*. Ceci, avec l'objectif d'illustrer quelques manifestations concrètes du changement climatique dans une région française, et d'évoquer les mesures de niveau régional qui pouvaient s'envisager pour parer à ces manifestations.

1.1 Le rapport *AcclimaTerra*

Le Rapport *AcclimaTerra* est paru en 2018 sous la direction d'Hervé Le Treut. Ce rapport, intitulé « Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine, pour agir dans les territoires », est riche de plus de 400 pages ; il faisait suite à une première publication en 2013 sur le même thème, focalisée sur ce qui était alors la région Aquitaine. L'idée centrale développée est que si le changement climatique est un phénomène essentiellement global, qui nécessite une mobilisation elle aussi globale, l'impact et les adaptations nécessaires se déclinent localement.

Les manifestations du changement varient en effet selon la région, le milieu, la saison ou les espèces ; et par ailleurs, si des mesures doivent être prises à grande échelle – essentiellement des mesures réglementaires – beaucoup gagnent en précision et en efficacité si elles sont adaptées au contexte local, et leur mise en œuvre requiert des actions concrètes réalisées à une échelle suffisamment fine, typiquement régionale.

En outre, aucune mesure ni action ne peut être parfaite ou définitive, et un retour d'expérience est indispensable pour apporter les corrections nécessaires : il faut pour cela organiser la remontée des résultats locaux vers le niveau global pour améliorer et tenir à jour le dispositif, et une sélection de régions tests est précieuse dans cette perspective.

La région Aquitaine est exemplaire de ce point de vue, et le rapport *AcclimaTerra* détaille méticuleusement le contexte, la logique, les actions et les résultats. Le slogan « Penser globalement, agir localement », généralement attribué à l'américain David Brower, fondateur des *Amis de la Terre* en 1969, qui est appliqué dans de nombreux domaines, est ici d'une pertinence frappante. Ce précepte est un peu le fil rouge du rapport.

1.2. Rappel : le changement climatique, une réalité globale

Depuis les Accords de Paris, signés en 2015 à l'issue de la COP21, la reconnaissance planétaire du rôle des activités humaines dans les changements climatiques a bouleversé la manière dont ces enjeux sont traités. Le consensus scientifique et politique est établi : il faut agir, et l'objectif annoncé est de limiter le réchauffement à 1,5 ou 2 °C.

Mais le passage de l'alerte à l'action se heurte à l'ampleur de la transition nécessaire. Supprimer les émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici la fin du siècle, voire extraire massivement du CO₂ de l'atmosphère, reste un défi monumental alors que 80 % de l'énergie mondiale provient encore des énergies fossiles, et que les émissions continuent à augmenter.

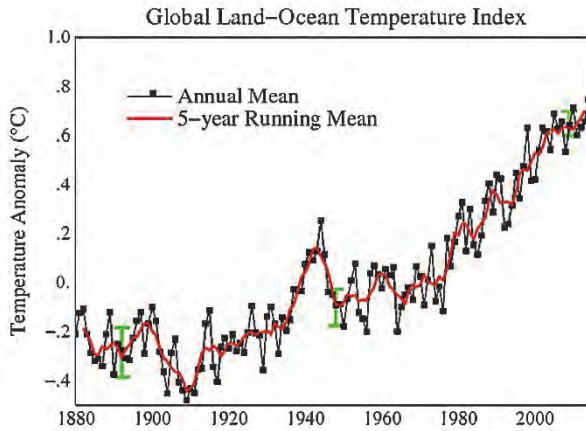


Figure 1. L'évolution des températures depuis 1880. L'écart porté en ordonnée – température anomaly – est la différence entre la température moyenne d'une année particulière (courbe noire) et la température moyenne constatée sur la période 1951-1980. Source : Nasa Goddard Institute of Space Studies.

La COP21 a bien initié un cadre de contributions nationales révisables, mais les engagements actuels demeurent très insuffisants. Le rapport souligne que, même en respectant les engagements actuels des pays, on ne pourra pas éviter des impacts climatiques majeurs. Dans ce contexte global, la réflexion et l'action à l'échelle régionale, notamment en Nouvelle-Aquitaine, deviennent cruciales.

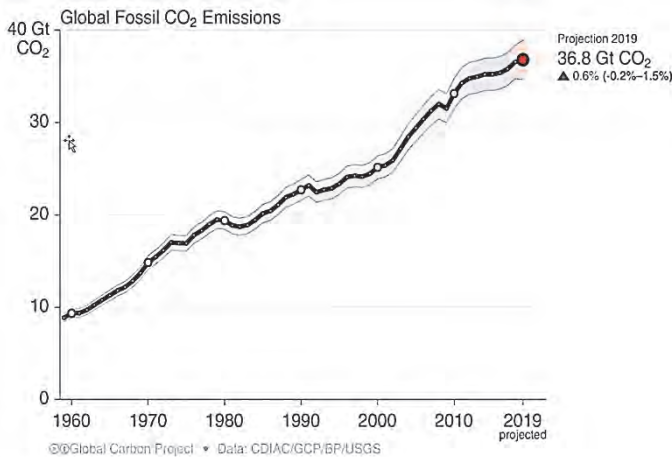


Figure 2. L'évolution des émissions annuelles des émissions CO₂ d'origine fossile. Source : Global Carbon Project.

1.3. Le changement climatique : des impacts et des défis à différentes échelles

Le changement climatique est bien un défi global, car il est lié à des phénomènes planétaires comme l'émission de gaz à effet de serre, leur dispersion dans l'atmosphère et l'élévation des températures à l'échelle mondiale. Ces processus concernent toute la planète, et aucune région ne peut seule enrayer la dynamique globale.

Mais les impacts du changement climatique se manifestent localement, avec des effets très concrets sur les territoires : inondations, sécheresses, canicules, érosion des littoraux, etc. Chaque région doit donc élaborer ses propres stratégies d'adaptation, en fonction de ses spécificités géographiques, économiques et sociales. La Nouvelle-Aquitaine, par exemple, doit adapter sa gestion de l'eau, ses pratiques agricoles, sa politique urbaine ou encore la préservation de ses zones humides. Une part de la réponse au défi climatique passe par des actions concrètes et ciblées à l'échelle locale.

Mais, pour reprendre cet exemple de l'eau, sa gestion doit prendre en compte les solidarités entre bassins versants, entre zones rurales et urbaines : ces actions locales, indispensables, doivent cependant être pensées en lien avec les autres territoires et connectées aux enjeux nationaux et mondiaux.

Il faut aussi souligner l'importance d'une participation active des citoyens. On ne peut pas se contenter de solutions « descendantes » imposées par les dirigeants ou les experts. Trop souvent, les décisions environnementales sont perçues comme technocratiques ou imposées. La réussite des actions locales dépend des habitants et des élus, qui doivent comprendre et s'approprier les enjeux. Elle dépend de l'association des citoyens à la conception des politiques publiques, à leur traduction régionale et à la construction des projets ; ce sont les citoyens qui vivent les impacts effectifs du changement climatique et qui mettent en œuvre concrètement les décisions. Cette implication est un préalable à l'acceptation des mesures et un gage de leur efficacité.

La concertation démocratique est donc présentée dans le rapport comme un levier essentiel pour transformer les territoires et inventer un futur plus résilient. Il défend une nouvelle gouvernance climatique, cohérente entre les différents niveaux (local, national, européen), et participative. L'objectif est d'aboutir à une « adaptation transformationnelle », qui modifie durablement nos systèmes socio-écologiques.

La région Nouvelle-Aquitaine, élargie depuis la fusion des anciennes régions, se trouve à la croisée de multiples vulnérabilités. Elle subit déjà des impacts sensibles : épisodes caniculaires, modification du régime des précipitations, érosion littorale, pression sur les ressources agricoles et hydriques.

Le rapport *AcclimaTerra* dresse en introduction un état des lieux sous différents angles (géographie générale ; économie ; démographie et urbanisation ; eaux continentales, paysages et agriculture ; littoral et ressources côtières ; production et consommation d'énergie, émissions de gaz à effet de serre). Puis il dresse, au cours de onze chapitres un large panorama des domaines à traiter en priorité, domaines dont la figure 3 présente succinctement les interdépendances sous l'influence du changement climatique. Dans ces chapitres, l'approche consiste, dans un premier temps, à rappeler, s'il y a lieu, quelques évolutions récentes, l'état des choses et les pressions qui s'exercent. Puis, dans un second temps, d'envisager dans différents scénarios les conséquences pour le futur et les actions possibles pour y parer ou s'adapter. Nous invitons le lecteur intéressé à se reporter au rapport sachant que chacun de ses chapitres est très riche en diagnostics et recommandations. Notre propos n'est pas ici d'en faire un compte rendu complet, ni même un résumé, mais plutôt d'en illustrer quelques aspects.

2. La Nouvelle-Aquitaine, contributeur et témoin du changement climatique

Dans cette première section, après avoir mentionné la contribution de la Nouvelle-Aquitaine à l'effet de serre, nous nous focaliserons, en nous limitant à quelques exemples, sur quelques constatations concernant ses traductions locales, observées dans le passé ou redoutées pour le futur.

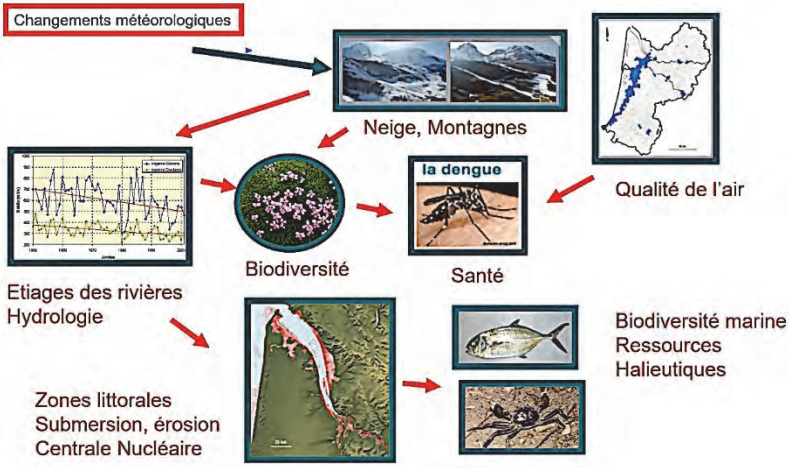


Figure 3. Illustration de quelques interdépendances entre certains des domaines traités par le rapport (image présentée par H. Le Treut lors de sa conférence devant l'AEIS en 2023).

2.1 La contribution de la Nouvelle-Aquitaine à l'effet de serre

En 2018 la Nouvelle-Aquitaine produisait 48,9² millions de tonnes d'équivalent CO₂ ; lors de la même année, la production nationale était de 445 millions de tonnes. La Région prend donc sa part dans la production nationale de Gaz à Effet de Serre (GES) à hauteur d'environ 11 %. Il est utile de comparer cette contribution à celle des autres régions (cf. figure 4) et à la place que la Nouvelle-Aquitaine occupe dans l'ensemble national selon différents critères : environ 15 % de la surface nationale – en fait la plus grande région de France, 8,8 % de sa population – la Nouvelle-Aquitaine est une des régions les moins denses – et des emplois, 7,7 % du PIB. L'évolution globale des émissions de la Nouvelle-Aquitaine dans les années récentes montre une diminution relative de l'ordre de 1 % entre 1990 et 2015. Mais cette quasi-stabilité cache des différences très marquées selon les secteurs. Ainsi, les émissions GES du secteur industriel ont diminué de 26 % pendant la même période, et celles de l'agriculture d'un peu moins de 17 %. Alors que dans le même temps augmentaient celles du résidentiel (13 %), des activités tertiaires (34 %), celles liées au transport des personnes (15 %) et des marchandises (21 %).

² Données du Rapport 2021 du Haut Conseil Pour le Climat. 51,7 millions de tonnes en 2015 dans AcclimaTerra.

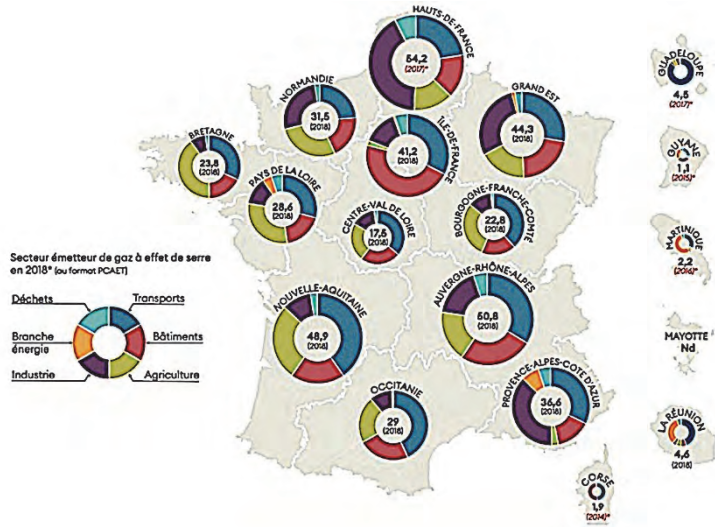


Figure 4. Émission 2018 des GES de la Nouvelle-Aquitaine comparée à celle des autres régions (Source : Rapport 2021 du Haut Conseil pour le Climat).

2.2 Réalité de l’effet de serre en Nouvelle-Aquitaine : températures

L’élévation globale de la température. La figure 5 illustre l’élévation de la température régionale dans les cinquante années précédant le rapport.

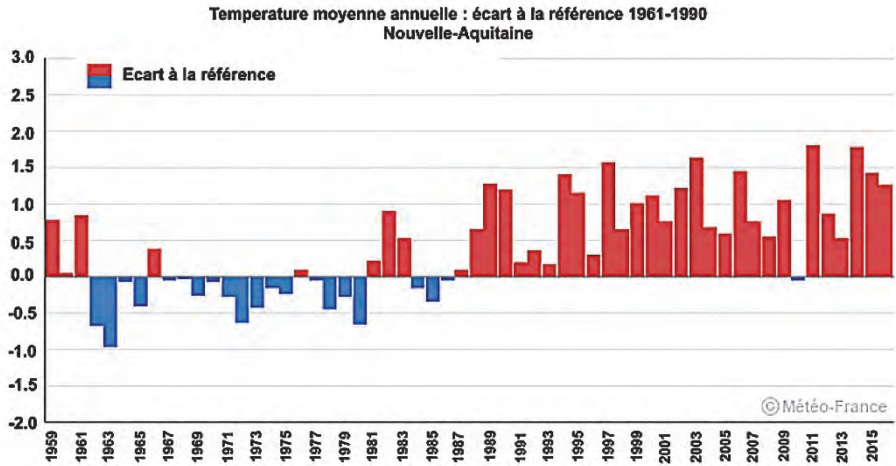


Figure 5. Illustration de l’élévation globale des températures en Nouvelle-Aquitaine, de deux ans en deux ans, entre 1959 et 2015. AcclimaTerra, Prévoir pour agir, N° 2 p. 40 (source Météo France).

À une échelle locale, plusieurs indicateurs confirment cette élévation. Reprenons ici l’élévation des températures minimales et maximales en moyenne altitude dans les Pyrénées (figure 6), celle des températures de l’eau et de l’air dans l’estuaire de la Gironde (figure 7) et enfin celle de l’eau des rivières dans le nord de la Région (figure 8).

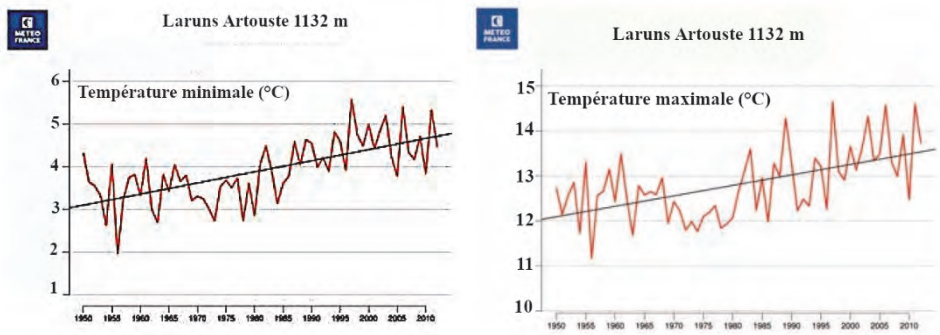


Figure 6. Évolution des températures minimales et maximales annuelles sur le site de Laruns (1132 m) entre 1950 et 2013. Source : AcclimaTerra, Prévoir pour Agir N° 2, p. 371.

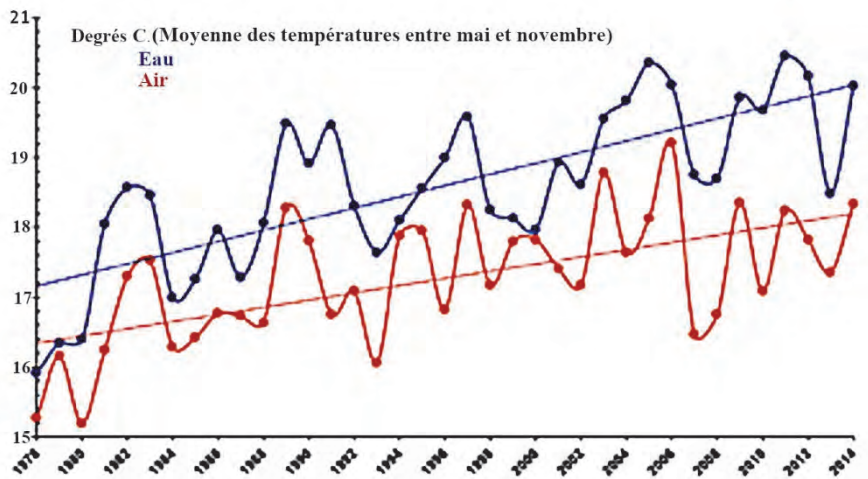


Figure 7. Évolution des températures de l'eau et de l'air au cours de la période 1971-2014 au niveau de Blaye dans l'estuaire de la Gironde. AcclimaTerra, Prévoir pour Agir N° 2, p. 129.

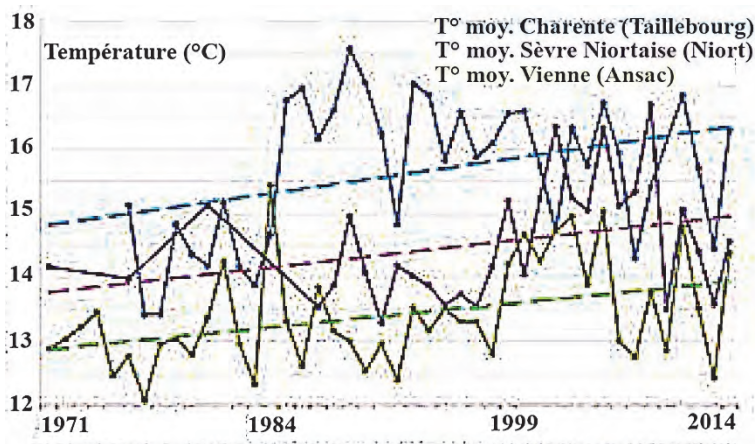


Figure 8. Augmentation des températures de l'eau de trois rivières du nord de la Nouvelle-Aquitaine, de 1971 à 2014. Source : AcclimaTerra, Prévoir pour Agir N°2, p. 129.

2.3 Réalité de l'effet de serre en Nouvelle-Aquitaine : précipitations, débits des rivières, enneigement

Le problème de l'eau est important en Nouvelle-Aquitaine. Aussi est-il abordé dans deux chapitres. Le chapitre « Qualité des milieux naturels » traite ainsi – à côté de celle de l'air et des sols – de la qualité des eaux – de surface, souterraines, côtières, à travers des indicateurs tels que la température, les matières dissoutes, la flore et la faune, en s'aidant du concept de « bon état écologique ». Le chapitre suivant traite de la disponibilité de l'eau et de l'évolution que l'on peut en prévoir, constatant la modification des cycles hydrologiques et ses conséquences en agriculture.

Globalement sur l'ensemble de la région et la période 1959-2016, les données pluviométriques (cf. figure 9) ne montrent pas une évolution nette, ni dans un sens ni dans l'autre. La fréquence des périodes de sécheresse généralisée – se manifestant sur des proportions importantes du territoire, plus de 50 % de la surface régionale – semble cependant s'être accrue, et des indicateurs locaux – étiages plus sévères et plus longs, débits en diminution (figure 10) – apportent des éléments significatifs.

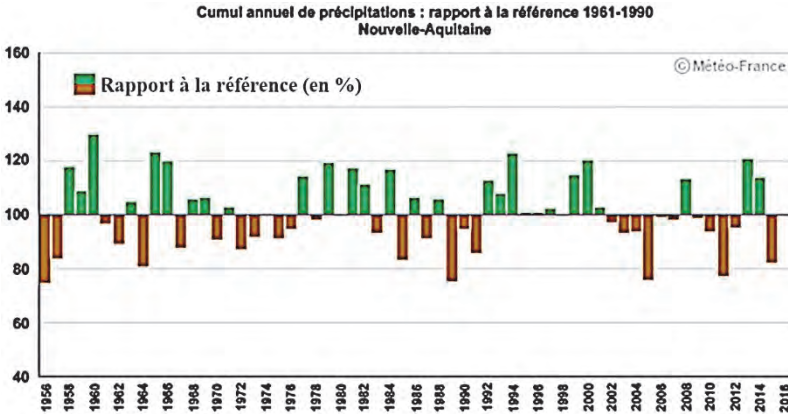


Figure 9. Évolution des cumuls annuels de précipitations, en moyenne sur la Nouvelle-Aquitaine, au cours de la période 1959-2016. AcclimaTerra, Prévoir pour Agir N°2, p. 41.

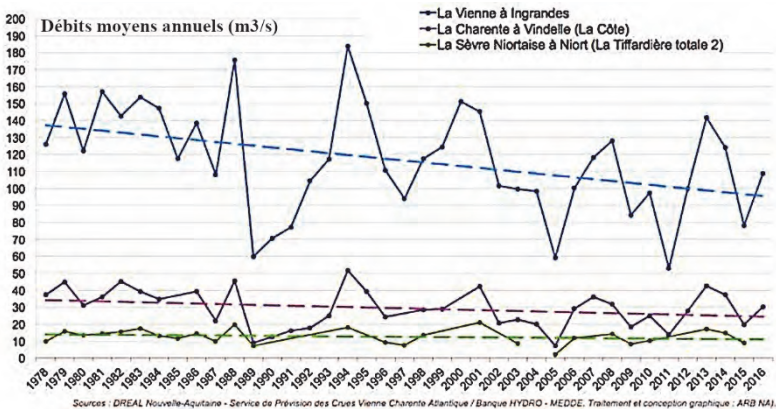


Figure 10. Évolution des débits des trois rivières de la figure 8, de 1978 à 2016. Source : AcclimaTerra, Prévoir pour Agir N° 2, p. 160.

De par leurs spécificités géographiques, les Pyrénées sont particulièrement sensibles au changement climatique. L'évolution de l'enneigement, notamment, est une source de préoccupation importante pour les activités touristiques d'hiver.

Si la diminution du nombre de jours d'enneigement représentée sur la figure 11 paraît réelle, mais faible (2-3 jours d'enneigement par décennie) – peut-être en relation avec une relative stabilité de la pluviométrie, les perspectives quant à la hauteur du manteau neigeux d'ici la fin du siècle paraissent sombres (cf. figure 12).

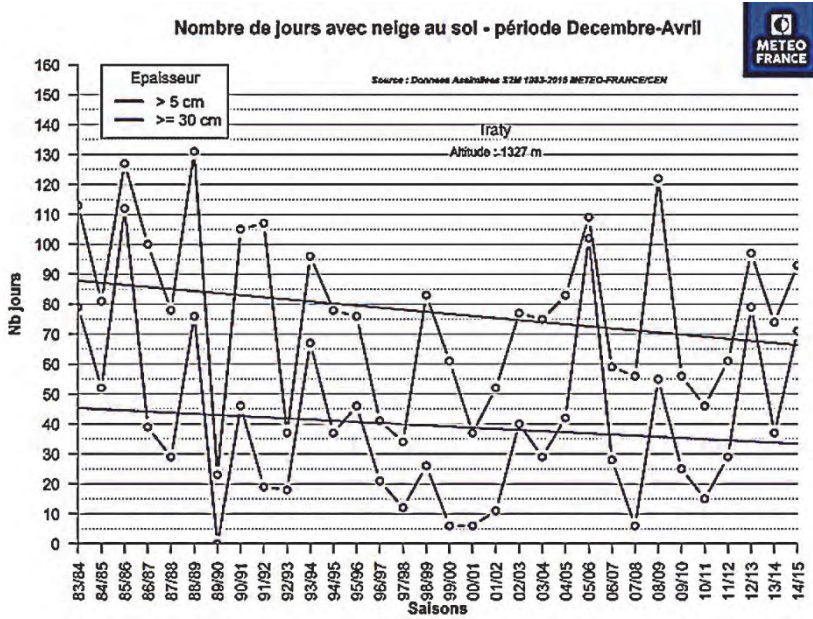


Figure 11. Évolution de l'enneigement : exemple de la station d'Iraty, 1327 m, depuis l'hiver 1983/1984 jusqu'à l'hiver 2014/2015. Source : AcclimaTerra, Prévoir pour Agir N° 2, p. 372.

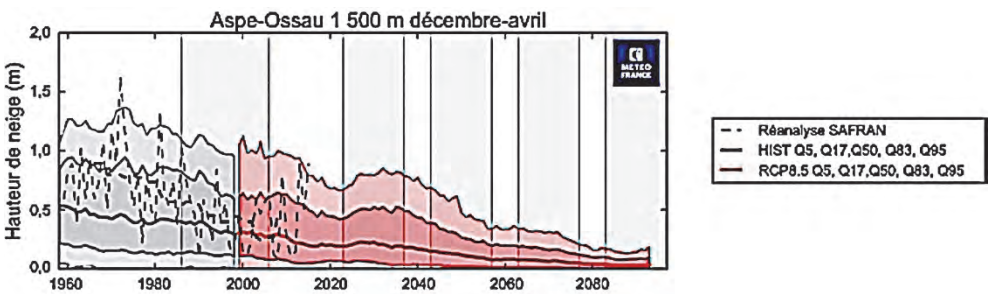


Figure 12. Évolution historique effective (de 1950 à 2000) et projection de la hauteur de neige en mètres, sur le site d'Aspe-Ossau, à 1500 mètres. Source : AcclimaTerra, Prévoir pour Agir N°2, p. 373. La plage de valeurs la plus large – Q95, en gris clair sur la période historique, en rose clair sur les projections correspond pour chaque année, au fait que 95 % des valeurs annuelles de hauteur de neige reprises sur les 15 années précédentes s'inscrivent dans cette plage. L'étendue de cette plage est la marque des fortes variations interannuelles pendant cette période de 15 années. Le graphique montre une nette tendance à la diminution.

2.4 Réalité de l'effet de serre en Nouvelle-Aquitaine : l'augmentation du niveau des mers et l'érosion marine

L'élévation du niveau de la mer constitue bien un élément majeur pour une région ayant une aussi grande façade maritime (longue de 970 km) avec 4 îles, hébergeant plus d'un million d'habitants sur une largeur de 30 à 50 km le long de l'Océan Atlantique. Comme pour de nombreuses autres côtes du globe, cette élévation entre en concurrence avec des processus ayant des effets contraires comme, par exemple, le comblement de baies. Si le trait de côte a globalement reculé (au détriment des terres) en Nouvelle-Aquitaine depuis 1950, les évolutions peuvent être contrastées. Le recul est net au nord du bassin d'Arcachon, où il a pu atteindre localement, au cours des 70 dernières années, un rythme supérieur à trois mètres par an. Au sud du même bassin, on a constaté globalement une stabilité, voire une légère progression des terres émergées, progression que l'érosion massive des côtes suite aux conditions météorologiques très « énergétiques » de l'hiver 2013/2014 a largement effacée.

Ici encore, ce sont donc des séries de valeurs d'indicateurs locaux qui fournissent les images les plus nettes de la diversité des changements en cours. Par exemple, le recul de la côte (vers l'intérieur des terres) a, entre 1950 et 2014, dépassé 300 mètres sur nombre de sites, citons le sud de l'île d'Oléron, la côte sauvage prolongeant la côte landaise au nord de la Gironde, ou encore le Cap Ferret. Alors qu'à l'inverse, la flèche sableuse de la Pointe de Grave, au sud de la Gironde s'est avancée de 400 mètres pendant la même période.

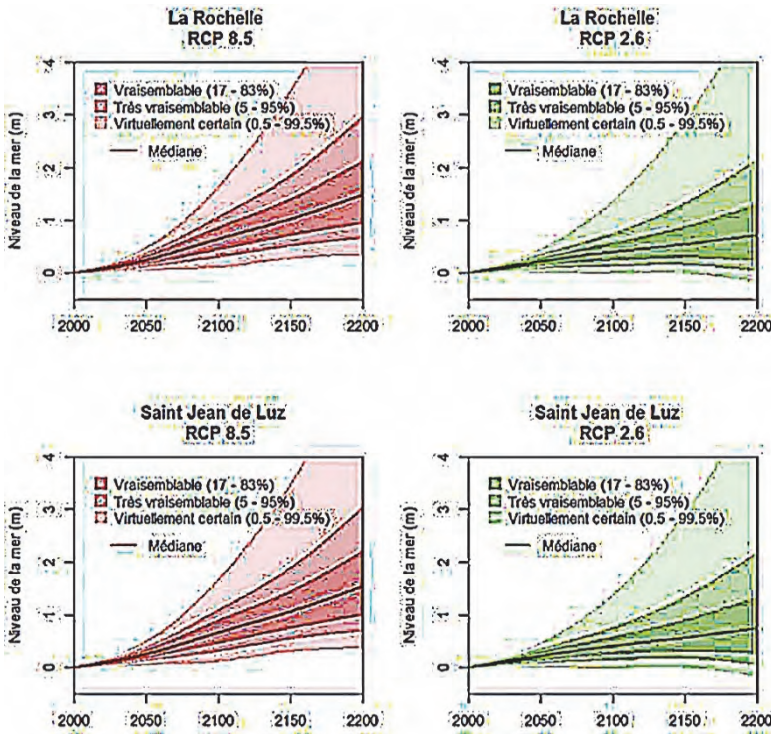


Figure 13. Élévation du niveau de la mer à La Rochelle et à Saint-Jean-de-Luz, rapporté au niveau de l'an 2000. À gauche : scénarios pessimistes. À droite : scénarios optimistes. Source : AcclimaTerra, Prévoir pour Agir N° 2, p. 312.

Quoi qu'il en soit, c'est bien à des scénarios d'augmentation du niveau des mers auxquels le littoral de la Nouvelle-Aquitaine devra faire face (figure 13). En conséquence, à l'horizon 2050, est-il envisagé (Observatoire de la côte Aquitaine) sur la quasi-totalité du littoral au sud de la Gironde, en tenant compte de l'occurrence d'évènements majeurs, un *recul annuel moyen* du trait de côte d'un à deux mètres par an.

3. Atténuer et faire face au changement climatique en Nouvelle-Aquitaine

Le rapport AcclimaTerra affiche, chapitre par chapitre, une analyse des vulnérabilités puis émet des propositions et des recommandations en rapport avec le changement climatique, soit pour s'adapter aux conséquences prévues dans différents scénarios, soit pour l'atténuer. De ce point de vue, un tableau particulièrement clair des deux aspects adaptation/atténuation concerne l'agriculture. Sont détaillés différents leviers d'action, par exemple la méthanisation des effluents d'élevage (+++ pour l'atténuation), ou encore la mobilisation de nouvelles ressources en eau (+++ pour l'adaptation). Avec pour chaque levier, une synthèse des conditions de mise en œuvre et des limitations. Sans reprendre un tableau systématique des chapitres du rapport, cette section illustre quelques points qui nous ont paru significatifs de la complexité des choix à faire face au changement climatique.

3.1 Capter et stocker le CO₂ : l'exemple mitigé de Lacq

Recycler le site de Lacq vidé de son gaz en le remplissant de CO₂ : l'idée est séduisante. Et de fait, capter et stocker le CO₂ émis est une solution prometteuse pour décarboner la plupart des industries lourdes : sidérurgie, cimenterie, raffinage, chimie et pétrochimie. En effet, celles-ci ne disposent pas à ce jour de technologies de substitution leur permettant de réduire massivement leurs émissions de CO₂, alors que ces émissions sont concentrées et se prêtent bien au captage et au stockage de CO₂ (CCS).

Cette solution occupe donc logiquement une place importante dans les scénarios de décarbonation du GIEC. Même si elle a ses limites : le captage du CO₂ génère en effet 15 à 20 % d'émission de CO₂ supplémentaire et le stockage génère à son tour 20 à 30 % d'émission supplémentaire³ : c'est-à-dire que le captage-stockage permet au maximum de réduire des 2/3 ou des 3/4 l'émission globale de CO₂, ce qui reste très intéressant. Le CCS est donc un outil de décarbonation prisé, et l'Agence Internationale de l'Énergie estime les besoins mondiaux en CCS à plus de 5 milliards de tonnes de CO₂ captées annuellement à l'horizon 2050 (à comparer aux 40 millions de tonnes captées en 2020, ce qui implique de multiplier les capacités actuelles de CCS par un facteur supérieur à 100).

Pour ce qui est du stockage du CO₂, il se pratique essentiellement dans des réservoirs d'hydrocarbures épuisés ou dans des aquifères salins à une profondeur d'au moins 800 m afin de stocker le CO₂ sous une forme dense. Dans les deux cas, le stockage consiste à utiliser une structure géologique réservoir fermée recouverte par une couche

³ Institute Open Diplomacy, Sacha Courtial, 10 septembre 2021

imperméable au CO₂ qui permet de le piéger de façon sûre et permanente. Les anciens réservoirs pétroliers ou gaziers constituent l'option la plus facile à mettre en œuvre : il est en effet possible d'injecter le CO₂ *via* des puits déjà existants. De plus, l'industrie pétrolière a plusieurs décennies d'expérience dans l'injection de CO₂ dans des réservoirs, technique utilisée en fin d'exploitation afin de fluidifier les hydrocarbures et de les récupérer plus facilement. Et la France dispose en outre de compétences historiques dans le stockage souterrain de gaz (principalement du méthane), avec plusieurs sites déjà exploités depuis des dizaines d'années.

Lacq est un site emblématique de la région Aquitaine, laquelle possède par ailleurs la plus grande capacité de stockage de CO₂ du territoire français, de loin, avec environ 100 millions de tonnes dans les aquifères salins et 650 millions de tonnes dans les réservoirs d'hydrocarbure épuisés. Le seul site de Lacq a une capacité de stockage de 250 millions de tonnes de CO₂ (soit les 2/3 de la production annuelle en France), et en outre, dans un rayon de 200 km, de nombreuses sources industrielles de CO₂ peuvent alimenter le site, avec un stockage de CO₂ envisagé de 5 millions de tonnes par an.

Cependant, ce potentiel est pour l'instant gelé, car les 262 milliards de m³ de la réserve initiale de gaz naturel ne sont pas encore totalement épuisés : il en reste environ 3 %. Si l'exploitation commerciale entamée en 1957 a été officiellement stoppée en 2013, l'opérateur maintient depuis lors une exploitation résiduelle. Pour préparer le recyclage du site en réceptacle de CO₂, l'opérateur a testé l'approche à échelle réduite, de 2010 à 2013, sur le site de Rousse tout proche. Cette expérience a été un succès, et la transposition au site de Lacq lui-même a été envisagée, mais il a finalement été jugé inefficace, voire potentiellement dangereux, de tenter de combiner l'injection de CO₂ dans le site de Lacq avec l'extraction de gaz naturel, même résiduelle. Le 24 octobre 2024, l'opérateur a annoncé qu'il suspendait le processus qu'il avait entamé en vue de recycler le site d'extraction de gaz naturel en site de stockage de CO₂.

3.2 Faire face à l'érosion marine : l'exemple de Lacanau

Face à l'érosion marine, dont on a vu l'ampleur dans la section précédente, trois types de réaction sont envisageables : la protection, la relocalisation et l'atténuation. Ces trois modes de réaction sont généralement combinés, et les mesures concrètes ont tout à y gagner, y compris en termes d'efficacité, à être bien adaptées au contexte local sous tous ses aspects, et à être bien acceptées par les populations concernées. Pour cela, l'idéal serait que les mesures soient conçues et mises en œuvre dans le cadre d'une concertation itérative et suivie avec ces populations, et que celles-ci soient non seulement consultées, mais également impliquées dans la décision, de la conception à la mise en œuvre.

La commune balnéaire de Lacanau, située dans une zone soumise à un fort recul annuel du trait de côte, fournit un exemple emblématique de cette situation. En 2012 a été lancée à Lacanau une analyse sociologique visant à observer les dynamiques collectives face à l'érosion côtière. L'objectif était de bâtir différents scénarios de relocalisation et un scénario de protection à l'horizon 2100, afin d'explorer les trajectoires possibles d'adaptation : protection, ajustement et/ou relocalisation. Il s'agissait aussi d'identifier toutes les difficultés qui pourraient être rencontrées aux plans juridiques, financiers, techniques et sociopolitiques pour relocaliser plusieurs centaines de logements, des infrastructures publiques et des activités commerciales.

Un processus participatif a réuni habitants, professionnels et représentants associatifs locaux, sur une commune où ces populations se sentent très concernées et connaissent la problématique. Cette expérimentation, considérée comme pionnière en France, a permis d'engager l'ensemble des acteurs locaux dans un régime d'exploration des possibles ouvert à l'imagination, à l'expérience du débat contradictoire et aux « surprises » qui peuvent s'observer face aux situations projetées dans des récits prospectifs. Les idées et propositions principales mises en avant par les participants ont porté sur les enjeux à prendre en compte dans la scénarisation, incluant des arguments formulés en termes de cohésion sociale de la future station balnéaire. L'articulation maintenue entre un dispositif d'expérimentation sociale et un espace de concertation et d'exploration collective des futurs a bénéficié d'un engagement important des élus locaux, d'une animation prospective propice à ce régime d'exploration et d'une posture d'ouverture et d'écoute chez la plupart des participants. Le maintien du comité de concertation pour le suivi de la stratégie locale de gestion de la bande côtière résulte pour partie de ces dynamiques d'apprentissage social.

Malgré toutes les avancées permises par cette démarche, le choix entre protection et relocalisation n'a jusqu'à présent pas été acté faute de certitudes aux plans réglementaires et financiers. De nouvelles lignes de débat ont cependant été ouvertes au regard de la législation actuelle sur l'aménagement du littoral, ainsi que de nouvelles propositions d'outils juridiques et financiers destinés à permettre aux habitants de choisir entre la conservation de leur logement et la relocalisation de leurs biens et de leurs activités en fonction de la temporalité du risque. Certaines propositions ont été retravaillées dans le cadre du comité de suivi de la stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte puis formalisées dans une proposition parlementaire de loi déposée en juillet 2016.

3.3 Faire évoluer le vignoble

L'effet du changement climatique sur les vignobles et sur les vins varie selon les pays et les régions. Globalement, il est perçu comme plutôt positif dans les zones froides et comme plutôt négatif dans les zones chaudes. Et cet effet ne date pas d'hier : l'augmentation de la température enregistrée ces dernières décennies a déjà provoqué des changements observables sur la physiologie de la vigne : avancement de sa phénologie (floraison, véraison) et de la période de récolte (près de deux semaines en moyenne par rapport à la période avant 1980) ; augmentation du degré alcoolique ; baisse de l'acidité du raisin à la récolte ; modification des profils aromatiques et polyphénoliques ; évolution du rendement...

En région Aquitaine, en particulier dans les terroirs emblématiques du Bordelais, l'impact du changement climatique est ressenti depuis de nombreuses années. Par exemple, dans le cas de Saint-Émilion, la date des vendanges a déjà avancé de 15 jours en 26 ans, la floraison a été décalée de 2,4 jours, et la véraison de 3 jours. Au niveau de la vinification, le degré d'alcool potentiel a augmenté en moyenne de 0,9°, et l'acidité a baissé de 1 g/L.

La viticulture a déjà évolué avec le climat, mais cette évolution semble devoir s'amplifier. Cela passe par une adaptation des pratiques de culture et de récolte et de leur calendrier, mais aussi par une évolution de la sélection et de la répartition géographique des cépages, et partant, par une évolution inévitable du profil des vins produits sur les différents terroirs.

La stratégie bordelaise se concentre sur le risque qualitatif et sur le changement de cépages. Le merlot (cépage rouge le plus planté en France) est particulièrement dans le viseur : d'ici la fin du siècle, la maturité de ce cépage pourrait arriver dès le 12 août dans le Bordelais, selon le scénario pessimiste d'un réchauffement à +4 °C. Le cabernet sauvignon, jusqu'ici, s'est bien adapté aux fortes températures ; mais à l'avenir, il faudra vraisemblablement introduire de nouveaux cépages encore plus résistants à la chaleur.

Mais le changement de cépages n'obéit pas seulement à des critères physiologiques. Il doit aussi prendre en compte la qualité des vins, et la filière « vin de Bordeaux » souhaite avant tout garder son identité. Pour cela, les chercheurs qui accompagnent la filière dans son effort d'adaptation se penchent sur les types de vin, et cela conditionne l'intérêt accordé à chaque cépage. Par exemple, le grenache est un cépage très adapté au climat chaud et sec, mais il est trop éloigné de la typicité des vins de Bordeaux : ce cépage n'est donc pas prioritaire dans les recherches. Heureusement, les ressources en termes de cépages candidats à tester en vue de les introduire ne manquent pas : il y a notamment des cépages très intéressants provenant du Portugal, qui ont une spécificité aromatique proche des vins du Bordelais, tout en étant résistants aux températures plus élevées.

Depuis 2020, Bordeaux teste ainsi de nombreux nouveaux cépages, par exemple : alvarinho et liliorila en blanc, l'arinarnoa, castets, marselan, et touriga nacional en rouge. Le changement de cépages est donc bel et bien testé et au centre de l'effort d'adaptation en cours. Toutefois, cette orientation n'est pas consensuelle, et plusieurs appellations bordelaises n'ont encore lancé aucun projet dans ce sens pour l'instant.

En tout cas, l'impact potentiel de l'adaptation sur l'économie de la région est évidemment très important, la filière vitivinicole de la région de Bordeaux étant le premier employeur de Gironde avec 5.400 viticulteurs. Et les choix effectués en matière de cépages doivent être mûrement pesés, puisqu'ils engagent le long terme : la durée d'une vigne allant de 30 à 50 ans, les vignes que l'on plante aujourd'hui seront encore là dans la seconde moitié du siècle. Or, ces choix relèvent d'une alchimie des plus délicates, qui doit combiner les considérations physiologiques, écologiques et phénologiques, mais aussi œnologiques et économiques. Et l'innovation dans cette alchimie se heurte à une triple inertie : la longévité des plants de vigne d'une part, l'expertise parfois séculaire dans la vinification et les assemblages, et la renommée acquise de longue main par chaque terroir et chaque cépage.

Toujours est-il qu'il semble inéluctable que la proportion des cépages traditionnels diminue progressivement. Les cépages qui seront préférés -conservés ou introduits- sont *a priori* les cépages plutôt tardifs et/ou à maturation lente et n'accumulant pas trop de sucres, car ils seront le plus à même de donner des vins équilibrés dans un contexte climatique plus chaud. Or, l'adaptation ne doit pas se faire du jour au lendemain, mais petit à petit : les inerties écologiques et économiques en jeu nécessitent en effet un haut degré d'anticipation.

3.4 Faire face aux vulnérabilités des forêts

L'augmentation des températures et l'impact de périodes de sécheresse accrue vont affecter de manière différenciée d'ici 2050 la distribution spatiale des espèces forestières. Des simulations ont ainsi pu être effectuées montrant l'évolution possible des volumes de bois sur pied et des mortalités dans une sous-région donnée, ou encore

les vitesses de migration spontanée vers le Nord de certaines espèces cherchant à s'adapter au changement climatique. Il faut rappeler ici que le changement climatique, *via* sa composante continue, mais aussi *via* l'occurrence d'évènements extrêmes, influence le devenir des forêts par de multiples canaux, physiologiques – niveau de fructification par exemple – et phytopathologiques – extension de certaines maladies.

Dès lors, il faut choisir une stratégie d'adaptation : investir pour initier (ou favoriser) l'implantation des espèces menacées dans d'autres régions situées plus au Nord, ou bien introduire sur place des espèces mieux adaptées aux futures conditions climatiques, en les « translocant » depuis des régions plus méridionales, comme l'Espagne par exemple. Il faut décider au cas par cas, et le rapport mentionne les difficultés rencontrées par certains choix qui au départ paraissaient évidents.

De plus, ces questions se croisent avec celle des priorités accordées aux services possibles des forêts et aux différentes filières bois : production du bois pour l'énergie, production de bois pour le bâtiment et l'industrie, lutte contre le réchauffement climatique, maintien de la biodiversité. À ce sujet le rapport s'interroge sur la priorité donnée jusqu'ici par l'Union européenne au « bois énergie ». En l'occurrence, le bois vu comme substitution aux énergies fossiles, vu en somme comme une énergie renouvelable. Au détriment d'une stratégie dite « bois stockage » consistant au stockage du carbone dans les forêts. Alors que selon certaines études citées dans le rapport *« de plus en plus de travaux convergent autour de l'idée que la stratégie de développement intensif du bois énergie n'est pas nécessairement la plus performante du point de vue économique ni du point de vue du bénéfice climatique à long terme »*.

Gérer une parcelle forestière nécessite une appréhension du moyen et du long termes, sur une période d'au moins 25-30 ans pour les variétés à croissance rapide. Or le changement climatique introduit une incertitude nouvelle, de par ses effets complexes et difficiles à quantifier à l'échelle locale. On conçoit que les propriétaires privés de parcelles (90 % des forêts de Nouvelle-Aquitaine) soient poussés à la prudence. Le rapport note par exemple qu'à la suite de la tempête Klaus en 2009, le plan « Chablis » a bien réussi à nettoyer dans les Landes environ 200 000 hectares de forêt détruite. Mais cet évènement n'a pas été l'occasion d'un changement massif de stratégie de la part des propriétaires de parcelles, puisque ces derniers ont opté *« pour des itinéraires standards ou légèrement raccourcis et à 95 % à base de pins maritimes »*. Dans ce domaine où prévaut le long terme, les purs mécanismes du marché ne sont que partiellement efficaces. Il faut comprendre les facteurs déterminant la capacité des propriétaires de parcelles à s'adapter et les accompagner de façon soutenue.

3.5 Milieux urbains de Nouvelle-Aquitaine et changement climatique

Sur le volet *Adaptation* le rapport AcclimaTerra traite bien sûr des risques spécifiques aux fortes concentrations d'habitat, ceux associés aux « îlots de chaleur » consécutifs aux épisodes de canicules et ceux associés aux crues fluviales, notamment dans l'agglomération bordelaise. Concernant les pics urbains de chaleur, le rapport cite quelques chiffres spectaculaires ; ainsi dans la ville d'Agen, le nombre moyen de journées à plus de 30° est passé d'une façon relativement continue de 15 journées dans les années 1970, à plus 45 autour de 2015-2020. En analysant la carte des îlots de chaleur (et de fraîcheur) de la ville de Bordeaux et en la comparant à celle de Poitiers lors des canicules de l'été 2016, le rapport confirme le lien avec l'usage qui est fait des

sols et leur degré d'artificialisation. La présence de végétation (jardins, parcs, ceinture boisée, zones humides...) est nettement un facteur de rafraîchissement. En effet, dans de tels espaces *« près de la moitié de l'énergie solaire reçue est transformée par le biais de la photosynthèse et de l'évapotranspiration. L'eau en s'évaporant des sols et des feuilles absorbe l'énergie, refroidissant 1000 m³ d'air de 2 °C ».*

Aussi, pour lutter contre la formation de ces îlots de chaleurs lors des épisodes de canicules, « une extension des espaces arborés en ville... apparaît comme une priorité de l'action publique ».

Mais c'est sur le volet *Atténuation* qu'AcclimaTerra s'étend davantage. Il est connu que le chauffage et la climatisation des habitations, ainsi que les déplacements de personnes et de marchandises, comptent parmi les principaux émetteurs de GES. Or nombre d'agglomérations de Nouvelle-Aquitaine ont pour caractéristiques d'être peu *denses* relativement à la moyenne nationale des zones urbaines. Pour donner deux exemples cités dans le rapport, *« la surface de la zone urbanisée à Bordeaux est similaire à celle de Lyon et de Lille, mais la population y est deux fois plus faible »* et quant à Limoges, sa surface urbanisée a progressé, entre 1960 et 2010, quatre fois plus vite que sa population. Cet étalement urbain accentué par rapport à ce qui se passe dans d'autres régions a de multiples causes, l'afflux migratoire et l'abondance de parcelles disponibles notamment. Il présente aussi certaines spécificités, comme l'utilisation d'un habitat ancien ne répondant pas aux normes actuelles et *« dont la rénovation, en particulier sur le plan de l'économie d'énergie est au-delà des capacités financières des occupants ».*

Face à ces constatations, le rapport aborde les actions possibles sur le plan de la mobilité, dans son lien avec la morphologie urbaine, et sur le plan de la rénovation et de l'émergence de quartiers « zéro émission ».

En Nouvelle-Aquitaine, ce qui a été dit sur les spécificités de l'étalement urbain – mais sans doute aussi, globalement, les distances à parcourir dans la région – se traduit sur le niveau des émissions de GES liées au transport. Celles-ci représentent selon le rapport, 38 % du total des émissions, contre 26 % en moyenne nationale. Aussi le rapport développe-t-il toute une réflexion autour de la densification, de ses limites, et des structures spatiales des agglomérations susceptibles de supporter une mobilité durable. Raisonner quantitativement à propos de la densification nécessaire ne saurait suffire. Le rapport mentionne des outils de modélisation réalisés ou en cours⁴, pour aider à penser globalement l'extension des agglomérations en lien avec le développement des transports en commun et pour appréhender finement les conséquences de telle ou telle opération en tenant compte des interactions. Le rapport cite les conditions matérielles, mais aussi *sociales* du développement des mobilités douces. Il souligne à ce propos les résistances observées, la lenteur des évolutions, en constatant que jusqu'à ce jour *« la réduction des gaz à effet de serre réside davantage dans l'amélioration des moteurs des automobiles que dans les conséquences de la planification territoriale ».*

Concernant les émissions liées à l'habitat proprement dit, le rapport analyse les opérations d'urbanisme, notamment dans l'agglomération bordelaise, réalisées ou en cours lors de sa rédaction, répondant *« à l'enjeu d'un développement durable »* : constructions nouvelles ou rénovations respectant un cahier des charges exigeant en

⁴ Clim'Way Gironde, ou encore MUST-B, Modélisation intégrée de l'Usage du Sol, Transport, application à l'agglomération bordelaise

matière énergétique (normes BBC et THBE), mais aussi en matière d'usage de l'eau, d'impact paysager, de place de l'automobile, ou d'architecture des bâtiments. Certaines de ces opérations ont ainsi reçu le label « d'écoquartiers », et d'autres, sans être labellisées ou même avoir cherché à l'être, visent le même objectif. L'espoir est en effet que cet élan, initié par le plan national « Ville durable » en 2008, et conforté en 2012 par la création d'un label national, soit un moteur d'un urbanisme « permettant d'anticiper et de s'adapter au changement climatique ».

Mais le rapport constate que « ces vitrines que sont les écoquartiers n'ont pas toujours l'effet d'entraînement escompté sur le reste du tissu urbain ». Il constate également des effets pervers, déjà observés ailleurs, conduisant à une discrimination socio-spatiale, ces écoquartiers étant le plus souvent occupés par des populations aisées. Plus largement, la rénovation des centres historiques les rend plus attractifs, « *accélère la pression immobilière et leur gentrification* » externalisant les nuisances et les populations pauvres en périphérie. Ces mécanismes sont particulièrement manifestes dans certains secteurs « prisés » de la Nouvelle-Aquitaine (littoral, proximité d'espaces protégés). Elle est la source d'une « *inégalité environnementale* » qui vient se superposer aux autres inégalités. Toutefois l'expérimentation architecturale à proximité des centres anciens s'avère souvent une manière de retenir certaines populations et donc de restreindre l'effet de ces mécanismes de discrimination.

4. En conclusion : pour une culture politique de l'environnement

Le rapport souligne l'insuffisance des données et des outils scientifiques pour suivre, modéliser et anticiper les effets du changement climatique à l'échelle régionale. Il appelle à la création d'indicateurs, à la mutualisation des bases de données et au développement d'observatoires locaux. Il insiste également sur l'utilité de la mise en récit et de la médiation scientifique. L'appropriation citoyenne est un fil conducteur de l'ensemble du rapport. La transition climatique ne pourra aboutir sans un engagement fort de la société civile, et sans des dispositifs de concertation innovants, sincères et inclusifs.

Le rapport plaide pour un véritable changement culturel, politique et institutionnel face à la crise climatique. Loin de se limiter à une collection de recommandations techniques, il propose une véritable réflexion de fond sur notre manière de penser et de gouverner l'environnement.

La lutte contre le changement climatique ne pourra réussir que si elle s'accompagne d'un renouveau profond de la gouvernance territoriale, fondée sur la transparence, la participation active des citoyens, la co-construction des politiques publiques, et le respect des spécificités locales. Ce changement repose aussi sur un nouveau récit collectif – plus solidaire, plus résilient, plus connecté au vivant. La Nouvelle-Aquitaine est invitée à devenir un territoire pionnier de cette transition, un laboratoire d'innovation écologique, sociale et démocratique. Cette transformation ne pourra aboutir que si elle implique pleinement l'ensemble des forces vives : collectivités, citoyens, chercheurs, entreprises, associations.

En somme, l'adaptation réussie au changement climatique ne relève pas seulement de choix techniques, mais bien d'un choix de société.

13

La finance verte : changement de paradigme ou bulle spéculative ?

Pierre Lenders

Abstract

In this chapter, the evolution of green finance, in its various forms, motivations, expected effects, and real impacts is explored. Initially, a reminder of Milton Friedman's ideas on corporate social responsibility, which boils down to maximizing profits within the framework of existing rules. However, with climate change and rising inequalities, green finance has emerged as a response to environmental and social challenges. Its history is traced, from the birth of ethical finance, through the emergence of "clean tech" funds and ESG (Environment, Social, Governance), to sustainable investment and impact investing. The varied motivations of responsible investors are then highlighted, ranging from ethics to the pursuit of financial performance, risk minimization, and the search for positive impact. The results obtained are then analyzed, noting that despite declarations and commitments, greenhouse gas emissions continue to rise and biodiversity loss accelerates. Green finance is thus criticized for its lack of real impact on the economy. To achieve consistent effects, an ambitious industrial policy and better coordination between financial actors and governments appear necessary. Suggestions are made to improve the effectiveness of green finance, emphasizing the need for more reliable data, a better understanding of the mechanisms of impact transmission, and more strategic shareholder engagement. The conclusion calls for a profound reform of green finance so that it can truly contribute to the ecological transition.

1. Introduction

Le 13 septembre 1970, le New York Times publiait un article signé Milton Friedman qui se concluait par ces mots : « *there is one and only one social responsibility of business – to use its resources and engage in activities designed to increase its profits so long as it stays within the rules of the game* ». La responsabilité de l'entreprise, si tant est qu'on puisse imaginer que cette notion ait un sens, se résume à faire le plus de profit possible dans le cadre des règles en vigueur. Les dirigeants de grandes entreprises sont en effet au service d'actionnaires dont ils doivent avoir à cœur de protéger les intérêts, puisque ce n'est que pour cela qu'ils sont payés, et il serait par ailleurs non démocratique qu'ils se substituent à l'État en se mettant à la poursuite d'ambitions sociétales qu'ils n'ont pourtant aucune légitimité à imposer. Dans sa vision, il y a toujours un sacrifice à faire, un coût à payer, pour celui qui décide de poursuivre le bien commun plutôt que, ou en sus du profit. Une démarche d'apparente générosité peut bien sûr s'avérer profitable lorsqu'elle est entreprise dans une optique commerciale, en vue d'améliorer la réputation de la marque et ses ventes, mais la règle qu'il énonce n'est alors pas invalidée puisque le véritable objectif reste la maximisation du profit.

Plus d'un demi-siècle plus tard, les choses semblent avoir bien changé, et on peut se demander si Milton Friedman, si c'était à refaire, aurait écrit le même article. D'abord, le socialisme, alternative menaçante au capitalisme, a sombré avec la chute du Mur et le combat idéologique a cessé. La révolution néo-libérale est passée par là, les inégalités se

sont fortement accrues, et, dans bien des cas, au moins dans la « tech », les principaux actionnaires sont aussi les dirigeants, ce qui limite le conflit d'intérêts potentiel qui le gênait tant. Enfin, et surtout, un consensus s'est graduellement formé, à partir de travaux scientifiques que plus personne de sérieux ne remet en cause, sur les risques existentiels posés à nos sociétés du fait de la dérive du climat et de l'implosion de la biodiversité. Quand on intègre cette nouvelle donne, la poursuite aveugle du profit ne peut donc rationnellement conduire à terme qu'à la ruine. Au contraire, « faire le bien » serait à nouveau un moyen rationnel, fondamental, pas juste cosmétique, de « se faire du bien », rendant caduque la proposition de Milton Friedman. Pas étonnant dans ces conditions qu'au fil des deux dernières décennies se soit largement répandue cette idée que l'on pourrait résumer d'un slogan : la finance sera verte ou ne sera pas !

Pourtant, ces trois dernières années, une fois de plus, le vent a changé de direction. S'agit-il d'une simple pause, ou s'agit-il d'une remise en cause bien plus radicale de cette trajectoire ? C'est ce que ce document se propose d'explorer, en plusieurs étapes.

On posera d'abord quelques définitions et rappels historiques, on décortiquera ensuite les différentes motivations et formes d'impact recherchées par les investisseurs « responsables » avant de présenter les résultats atteints jusqu'ici et de chercher quelques explications aux phénomènes observés. On conclura par une exhortation faite aux institutions financières de changer leur façon de pratiquer la finance verte de manière à la faire travailler plus effectivement et efficacement dans la bonne direction. On verra que cette exhortation n'est qu'une réinterprétation de la pensée de Milton Friedman.

2. La finance verte : définitions et survol historique

2.1 Naissance de la finance éthique

Les origines de la finance verte, concept qui ne sera inventé que plus tard, nous ramènent à Milton Friedman. Il s'agit, de la part d'un groupe particulier et au départ très minoritaire d'investisseurs, de considérer que l'économiste de Chicago a sans doute raison de dire qu'on ne peut se targuer de faire le bien autour de soi qu'à condition d'accepter certains sacrifices personnels. Ces investisseurs, typiquement chargés de gérer les avoirs d'églises, de fondations ou d'organisations sans but lucratif, se méfient du capitalisme désinhibé et redoutent les désastres humains et environnementaux dont il se rend coupable et que les médias rendent bien visibles. Ils estiment que rester en alignement avec leurs valeurs doit passer avant la performance financière¹. Ils entendent pratiquer l'investissement « éthique » ou « socialement responsable »². On verra comment ils mettent typiquement en place cet alignement, plus esthétique que performatif, par des politiques d'exclusions normatives, sectorielles et/ou individuelles, et on pourra discuter de la pertinence pratique de ce choix dans les sections suivantes.

2.2 Naissance de la finance verte

Un peu plus tard, avec la montée des enjeux climatiques, mais surtout aussi la forte montée du prix du pétrole dans les années 2004 – 2008, apparaissent des fonds *clean*

¹ Values before value

² ISR en Français, et SRI en anglais pour Socially Responsible Investing.

tech, généralement fonds de *private equity*³, voire de *venture capital*⁴, parfois aussi des fonds de valeurs cotées sur les grandes places financières et qui, comme cette dénomination l'indique, se positionnent sur les solutions décarbonées ou décarbonantes, censées être bientôt indispensables, une fois passé le « pic pétrolier ». Ces investisseurs sont à la recherche de profits par le biais de paris technologiques et industriels de moyen terme. Ils ne prêtent généralement guère attention aux autres externalités ou dimensions sociales qui pourraient faire hésiter un investisseur socialement responsable. Ce sont les premiers représentants de la « finance verte » et sans doute l'expression naît-elle à ce moment-là.

2.3 Naissance de l'ESG

En même temps que se développent les fonds clean tech, de plus en plus d'investisseurs voient qu'il pourrait y avoir un intérêt à formuler une réponse systémique à la montée des externalités de toutes natures. Pour ce faire, il faut accélérer la marche des sociétés, sous l'impulsion de ces investisseurs, vers des formes plus respectueuses des droits et intérêts de l'ensemble des parties prenantes⁵ humaines et naturelles. On recherche une façon de parer au manque de qualité des signaux donnés par les marchés, car ceux-ci fonctionnent selon une rationalité de trop court terme (les états financiers trimestriels des sociétés) et négligent d'intégrer des facteurs qui pourraient jouer un rôle significatif dans la soutenabilité physique ou dans l'acceptabilité sociale à long terme de telle ou telle entreprise ou activité. Sans qu'un lien très fort soit encore fait avec la performance boursière, on voit poindre la possibilité d'un renforcement de l'argument dans cette direction. Poussé plus loin, il donnera naissance à « l'investissement durable »⁶, un investissement qui doit se préoccuper de ce que la poursuite des activités qu'on finance ne crée pas les conditions d'une perte à terme de la capacité à opérer de façon toujours profitable. Quoi qu'il en soit, il s'agit donc, de façon systématique cette fois, de passer tout investissement au crible d'une batterie de questions qui se veut exhaustive car portant, avec force détails, sur trois types de caractéristiques : celles ayant trait aux questions environnementales (E)⁷, sociales (S)⁸ et de gouvernance (G)⁹. L'ESG était né.

³ Capital investi dans une entreprise non cotée en bourse

⁴ « Capital risque » en français : capital investi dans une entreprise jeune et innovante

⁵ Stakeholder en anglais

⁶ Sustainable investing en anglais

⁷ E => l'activité ou les activités de cette entreprise polluent-elles, sont-elles exposées à des risques climatiques, à des risques de modification des règles prudentielles en matière d'environnement, apportent-elles au contraire des solutions à des problématiques environnementales, etc.

⁸ S => l'activité ou les activités de cette entreprise comportent-elles des risques en matière d'accidents du travail, de risques réputationnels en raison de maltraitance ou non-respect de droits humains, droits du travail ou autre norme sociale considérée comme minimale (UNGC, OECD), apportent-elles au contraire des solutions à des communautés locales, des minorités, ou valorisent-elles particulièrement le capital humain, créant ainsi des dynamiques positives et facilitant l'acquisition de talents.

⁹ G => gouvernance de l'entreprise aussi bien dans la dimension classique de respect des droits des actionnaires et de capacité de contrôle des dirigeants, que dans la dimension plus nouvelle de mise en place des outils, moyens et contrôles permettant une bonne mise en place des stratégies E et S, assurant une diversité au niveau des organes dirigeants, des mesures de prévention de la corruption, etc.

Une étape décisive a été franchie lorsqu'en octobre 2005 une opinion de Freshfields¹⁰ fut publiée sous le titre « A legal framework for the integration of environmental, social and governance issues into institutional investment ». Son message clé, sous forme de feu vert légal, indiquait que le fait pour un investisseur institutionnel de prêter attention aux caractéristiques ESG des titres de son portefeuille et de son univers d'investissement ne constituait pas en soi un manquement à ses obligations fiduciaires. Dans les années suivantes, des agences de notation ESG ont mis sur le marché des bases de données de plus en plus fournies couvrant d'abord, sur des dizaines puis des centaines de KPIs, les plus grandes valeurs des marchés nord-américain et européen, puis, progressivement, la plupart des pays du monde ainsi que les sociétés de taille plus modeste. Des dizaines de milliers d'entreprises sont aujourd'hui notées.

2.4 Naissance de l'Investissement responsable

Assez vite, la dénomination ESG a néanmoins posé problème. Si, au début, les investisseurs utilisaient assez volontiers les scores des agences de notation « extra-financière » pour toutes sortes de politiques d'exclusion ou de best in class¹¹, ils se sont vite rendu compte qu'il était impossible que toutes ces données soient de qualité et fiabilité égales. Ils ont donc préféré abandonner la référence à l'ESG pour plutôt adopter la dénomination assez vague d'« investisseurs responsables », leur permettant des définitions plus « à la carte » de leurs pratiques et de leurs outils. La référence au « Social » qui était très visible dans l'appellation ISR a disparu, permettant ainsi une répartition plus libre de l'attention entre social et environnemental, quitte à oublier complètement l'un des deux.

2.5 Naissance du *sustainable investing*

L'« investissement durable » est un terme très peu pratiqué en français, on emploie plutôt l'expression anglo-saxonne *sustainable investing*. Là où la dénomination « investissement responsable » permet de rester totalement discret aussi bien sur le constat que l'on fait de l'état du monde, les priorités E et/ou S que l'on se fixe, que sur l'approche choisie (exclusions fondées sur l'éthique, recherche d'impact, engagement), l'investissement durable part d'un présupposé qui est la fragilité du monde et son risque avéré de dégradation sous les coups de boutoir de l'économie « irresponsable », et du besoin de s'assurer, par ses choix d'investissement, que sa richesse aussi bien humaine que naturelle ne soit pas compromise à terme. Il y a néanmoins aussi une ambiguïté consistant à noter que dans un univers fortement dégradé il y a peu de chances que des investissements s'avèrent très florissants, donc *sustainable investing* peut aussi renvoyer à l'idée de s'assurer de la capacité non pas du monde à se préserver,

¹⁰<https://www.unepfi.org/wordpress/wp-content/uploads/2022/07/Freshfields-A-legal-framework-for-the-integration-of-ESG-issues-into-institutional-investment.pdf>

¹¹ L'exclusion consiste à éliminer certaines valeurs de l'univers d'investissement du fait de scores E, S, G ou de score « ESG agrégé » en dessous d'un minimum donné, le « best-in-class » consiste à préférer se concentrer, dans chaque segment ou secteur du marché, sur les meilleurs notés. Alors que la première approche peut conduire à un portefeuille final contenant des biais sectoriels marqués, excluant par exemple la majorité du secteur énergie, la seconde permet d'intégrer l'ESG tout en maintenant une exposition sectorielle proche de celle du marché, ayant fortement surpondéré à l'intérieur du secteur énergie les quelques sociétés déjà fortement impliquées dans les produits et services décarbonés.

mais de l'investisseur à continuer de performer financièrement sur le long terme. On pourrait proposer d'appeler cette variante le *sustainability aware investing*.

2.6 Naissance de l'*Impact Investing*

Aucune des approches mentionnées ci-dessus, à part dans une certaine mesure le *clean tech*, ne vise à impacter positivement et directement l'économie réelle. Il y a une dizaine d'années se sont ainsi développés, sur la base du succès des premiers fonds de microfinance, des fonds « impacts ». Souvent de plus petite taille, procédant à des investissements dans des micro-sociétés, ils cherchent à offrir à leurs propres investisseurs un mélange d'impact sociétal et/ou environnemental positif et de performance financière. Au départ il s'agissait de crédit, mais le choix des instruments de financement s'est élargi (action, convertibles). Le fait qu'ils soient prêts à sacrifier de la performance financière pour de l'impact sociétal est ce qui les distingue des fonds *clean tech*. Ce n'est pas pour autant de la philanthropie, mais plutôt un pari sur le fait qu'on peut avoir de très bonnes surprises, au moins au plan humain et en termes de lien social, sinon en terme financier, lorsque l'on donne leur chance à des acteurs économiques plein d'énergie et de potentiel, mais dont l'horizon professionnel était jusque-là limité pour toutes sortes de mauvaises raisons. Outre l'impact direct positif qu'ils créent immédiatement autour d'eux, leur enthousiasme peut s'avérer communicatif et l'impact peut être démultiplié à terme.

Pour la suite, sauf cas particulier qu'on signalera, on utilisera indifféremment les expressions *finance verte* ou *investissement responsable* partout où l'on voudra parler de l'une quelconque de ces différentes variantes énumérées ci-dessus.

2.7 Survol historique, un succès hyperbolique ?

Une mesure possible du succès de la finance verte est d'observer la hausse spectaculaire du nombre d'asset owners¹² et asset managers¹³ signataires des PRI¹⁴ (figure 1).

Le chiffre d'encours en terme absolu de 121 mille milliards de dollars en 2021 est à prendre en gardant à l'esprit qu'il contient du double comptage, puisqu'une partie significative des actifs dont les institutions financières ont la charge est confiée à des gérants externes. Lorsqu'un fonds de pension confie 1 milliard à une société de gestion, ce montant apparaît ainsi deux fois pour peu que les deux parties soient signataires. Mais indépendamment de ce problème, la tendance est claire : l'investissement responsable ne représentait qu'une infime fraction du marché au début de ce siècle ; en moins de 20 ans, il est devenu presque impensable, pour un acteur institutionnel, de ne pas avoir mis le sigle PRI sur son site Web. La messe semblait avoir été dite.

¹² Fonds de pension, caisses de retraite, compagnies d'assurance, fondations, etc.

¹³ Sociétés de gestion : gestion passive, active, indicielle ou non, fonds de couverture (hedge funds), ETFs

¹⁴ PRI : Principles for Responsible Investing, promoted by the PRIs, an industry association regrouping asset managers, asset owners and service providers having committed to promote ESG integration. This association was given its formal kickstart in 2006 under the umbrella of the United Nations.

Building the responsible investment community

Signatory numbers have increased 10% year on year, reaching 5391 signatories (4851 investors and 550 services providers) by 31 march 2023

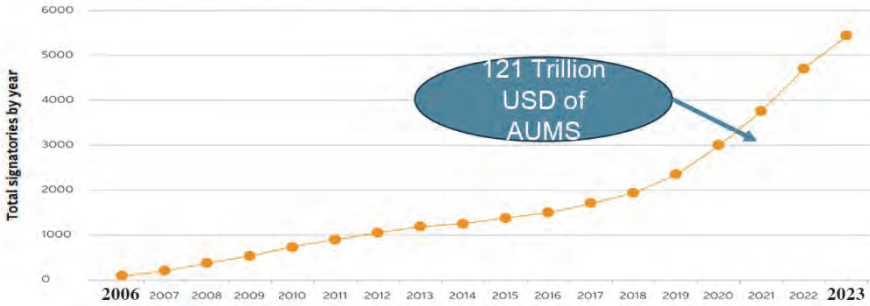


Figure 1. Croissance de « l'Investissement Responsable (PRIs) », 2006-2023.

2.8 L'ESG ennemi du peuple ?

Une altération notable est cependant apparue depuis quelques années, trouvant sa source dans le discours « anti-woke » de certains conservateurs américains, et amplifiée, depuis le retour des tensions internationales et de l'inflation, par toutes les extrêmes-droites du monde, qui voient une opportunité politicienne à se positionner contre toute politique qui semble en contradiction avec la défense du pouvoir d'achat et qui exigent que les transformations présentées comme indispensables au vu de la dégradation des conditions d'habitabilité de la planète soient dé-prioritisées. Le retournement récent, mais indiscutable de nombreux indicateurs de popularité de la finance verte oblige, en 2024, à ne pas prendre pour acquis qu'elle s'est définitivement imposée et à avoir plutôt le courage, si l'on veut sérieusement voler à son secours, de remettre en question ses fondamentaux et ses pratiques. Pour cela, et pour pouvoir en chercher les faiblesses et points d'amélioration possibles, il faut d'abord bien les connaître.

3. Quelles motivations, quels impacts recherchés ?

3.1 Les cinq motivations possibles

Lorsque l'on s'engage dans une politique d'investissement responsable, on peut agir sous l'impulsion de plusieurs motivations, pas forcément mutuellement exclusives.

3.1.1 L'éthique

La motivation éthique est historiquement la plus ancienne, on l'a vu, mais est à présent minoritaire. Elle consiste à préférer ne pas financer des sociétés se livrant à des activités considérées comme non désirables en référence à des dogmes, des interdits moraux ou religieux, ou des préférences éthiques¹⁵, ni avoir ses titres en portefeuille. Kant serait la figure philosophique incarnant cette approche. Deux remarques s'imposent.

¹⁵ Ces sociétés sont parfois désignées en anglais comme les « sin stocks », « sin » voulant dire péché.

D'abord, son univers « investissable », c'est-à-dire l'ensemble des titres dont il pourrait se porter acquéreur, ayant été réduit sur la base d'*a priori* non financiers, l'investisseur éthique est prêt à se priver de certaines opportunités de profit. Il est par nature sacrificiel, dans la ligne de ce que Milton Friedman avait indiqué (cf. introduction : il y a un prix à payer si on s'écarte de la seule recherche du profit).

Ensuite, il ne se pose pas non plus vraiment la question de savoir si ses choix auront des implications positives dans le monde réel. Il s'agit davantage de maintenir l'apparence d'une cohérence entre, d'une part, les valeurs que l'on porte (on aime la paix plus que la guerre, surtout nucléaire, le tabac et l'alcool entraînent des addictions parfois dévastatrices, la faim est un fléau qu'il faut combattre, les émissions de CO₂ font dangereusement dériver le climat, etc.) et, d'autre part, le contenu des portefeuilles (pas de sociétés d'armement ni de nucléaire, même civil, pas de sociétés impliquées dans la production ou le commerce de tabac ou de boissons alcoolisées, pas de spéculation sur les matières premières agricoles, pas de sociétés pétrolières).

La meilleure preuve de ce qu'on ne recherche pas vraiment un impact sur le monde réel est qu'il n'est pas seulement question d'interdire d'acheter des titres de sociétés se livrant à des activités non désirables, il est aussi question d'interdire les « shorts » sur ces mêmes sociétés. « Shorter », activité pratiquée par les fonds de couverture¹⁶, consiste à emprunter des titres et à les vendre en vue de les racheter moins chers plus tard. Au lieu d'une exposition économique visant à profiter d'une appréciation du titre¹⁷, il s'agit de l'exposition économique contraire : on gagne si le prix du titre baisse¹⁸. Cette position étant l'opposé algébrique d'une position « longue », elle a donc logiquement l'effet sociétal inverse. Si on l'interdit également, c'est bien que l'effet sociétal n'est pas celui recherché¹⁹.

¹⁶ Fonds de couverture ou « hedge funds ». CFM est un hedge fund quantitatif et systématique, mais il y en a bien d'autres types, le point commun étant le recours au shorts.

¹⁷ En plus du rendement courant que l'on peut en tirer dont il faut déduire le coût de financement pour avoir le rendement net total.

¹⁸ Sachant que pour « porter » cette position short pendant toute la période depuis la vente des titres sur le marché jusqu'au rachat des titres et clôtures de la position, symétriquement, on paie le rendement du titre, lié au coupon ou au dividende et on reçoit le taux de financement éventuellement diminué des commissions des intermédiaires.

¹⁹ Il y a cependant un élément de complexité de plus. Certains acteurs institutionnels, surtout dans le monde protestant (Hollande et pays scandinaves) considèrent en effet que, paradoxalement, shorter bénéficie aussi à l'entreprise sous-jacente puisqu'elle augmente la liquidité du titre. À condition de considérer les marchés comme efficients, niant à l'investisseur toute possibilité d'influencer, par ses décisions d'acheter ou de vendre, le prix des actions ou des obligations (donc le coût d'accès futur au capital pour ces sociétés ou leurs semblables), il n'y aurait que la liquidité du titre qui serait le facteur à prendre en considération, et puisque cette liquidité est fonction de la valeur absolue des transactions, les ventes « short » autant que les achats « longs » contribuent également et seraient à proscrire. Encore faudrait-il savoir mesurer le décalage de prix à la hausse résultant d'une augmentation de la liquidité. Un élément de comparaison peut être trouvé sur un exemple presque parfait qui est celui de l'écart de prix, sur les marchés des obligations du Trésor US, entre le « on-the-run » et les « off-the-run » qui ne se distinguent pratiquement que par leur liquidité, celle du premier étant plus d'un ordre de grandeur supérieure à celle des autres. On trouve dans ce cas un écart de rendement qui gravite autour de 0,05 % (5 bps) en allant rarement jusqu'au double. Cette justification de refus de « shorter » les « sin stocks » sur un argument de liquidité qui serait significatif et prépondérant par rapport à l'impact sur le coût en capital nous paraît peu crédible, mais on laissera le lecteur juger, et de toute évidence le débat académique n'est pas tranché.

3.1.2 La recherche d'impact sociétal ou environnemental positif

S'il y a bien un point commun avec le cas précédent, à savoir un consentement à ne pas faire de la performance financière le seul objectif de gestion, et probablement aussi une motivation d'ordre éthique au départ, l'effet recherché est radicalement différent puisqu'il ne s'agit plus d'instaurer une cohérence d'apparence entre son portefeuille et ses valeurs, mais de viser à un impact positif et mesurable dans le monde réel. La figure philosophique incarnant cette démarche serait l'utilitariste Jeremy Bentham.

L'idée est de ne pas attendre que le monde politique, économique et financier se mette en ordre de marche, il faut plutôt lui servir d'éclaireur. On va tâcher de démontrer que des solutions encore peu testées peuvent réussir, qu'un peu de capital injecté aux bons endroits dans la micro-économie proche des réseaux associatifs, lorsqu'il se combine à des ressources jusque-là inexploitées d'inventivité et à des acteurs qui n'occupent pas le devant de la scène médiatique, mais qui veulent en découdre, peut donner des résultats surprenants. On vise, au minimum, une amélioration sensible des conditions ou du cadre de vie pour ces acteurs et leurs communautés, mais aussi potentiellement, par effet d'entraînement, on vise à contribuer à écrire ou au moins accélérer des développements positifs de l'histoire humaine. On peut penser à des solutions visant à permettre à des jeunes de quartiers défavorisés d'apprendre à coder, ou à lancer leur commerce local, ou leur librairie ambulante, ou de permettre à des foyers mal équipés de devenir plus économes et autonomes en matière énergétique, ou de permettre à des fermiers endettés et coincés dans un modèle sans avenir d'opérer leur transition vers l'agroécologie.

3.1.3 La minimisation du risque financier

Avec l'observation souvent rapportée par les fournisseurs de données ou de notations extra-financières que les entreprises les mieux notées semblaient moins sujettes, lors des crashes de marché, à des baisses violentes, certains investisseurs ont acquis la conviction que, peut-être les valeurs bien notées sur le plan ESG étaient plus chères que les autres et avaient un rendement moindre, mais qu'il y avait à cela une contrepartie plus qu'utile sous la forme de cette protection au moment des tempêtes boursières.

Même en dehors des situations de crise systémique, le même argument existerait, à savoir que les titres de telles sociétés devraient être capables de mieux résister à de mauvaises nouvelles, toutes choses étant égales par ailleurs, une baisse temporaire du prix de l'action servant de point d'entrée à des investisseurs conscients de l'intérêt d'une bonne notation. On pourra à ce titre se référer aux travaux de G Serafeim, et à cet article en particulier : « Public Sentiment and the Price of Corporate Sustainability »²⁰.

Enfin, toutes choses étant égales par ailleurs, il faut, selon ce cadre de pensée, éviter les sociétés mal notées, en particulier en matière de gouvernance, celles dont les dirigeants ont des pouvoirs trop concentrés, ou dont les auditeurs sont devenus au fil des années trop complaisants. Elles auront en effet tendance à maximiser le profit à court terme au détriment du renforcement de la capacité de création de valeur à long terme. Elles

²⁰ https://dash.harvard.edu/bitstream/handle/1/37374943/serafeim_public-sentiment.pdf. L'auteur y développe l'idée que la meilleure capacité des titres bien notés à résister aux aléas boursiers fait qu'ils sont en général plus chers (l'ESG est « dans les prix ») sauf à l'occasion de mauvaises nouvelles auxquelles les marchés ont tendance à surréagir et dont il faudrait par conséquent tenter de profiter.

prendront des risques excessifs vis-à-vis des réglementations en place, vis-à-vis de leurs obligations de respecter leurs clients et/ou leurs employés, et ne permettront pas que s'accroisse le capital humain de l'entreprise ni que se développe le dialogue interne.

Cette motivation – une meilleure gestion du risque –, reste traversée par deux interrogations.

D'une part, ce risque est-il correctement reflété, ou non, dans les prix ? S'il l'est, l'avantage recherché n'existe plus vraiment : un moindre risque n'étant que la contrepartie d'un rendement plus faible. Il faut au contraire penser que le risque n'est pas dans les prix pour considérer qu'intégrer son appréciation dans la politique d'investissement par l'ESG améliore le profil de risque à rendement égal puisqu'on prend ici, en quelque sorte, un coup d'avance par rapport aux marchés. On peut mentionner, à ce titre, un débat toujours ouvert à propos de la question de savoir si sont correctement appréciés par le marché le risque climatique²¹, et, plus récemment, le risque lié à l'implosion de la biodiversité²².

D'autre part, même à supposer que le risque ESG soit insuffisamment reflété dans les prix, n'est-il pas nécessaire, pour penser qu'une politique d'intégration de critères ESG soit raisonnable, de pouvoir compter sur le fait que les données ESG soient de bons indicateurs du risque ex-ante ? Or sur les quelques épisodes de débâcles boursières liées à un scandale environnemental ou social, dans la grande majorité des cas, les notes ESG des sociétés en question, jusqu'au jour du scandale, étaient typiquement plutôt neutres à positives. De plus, même à supposer que les notes ESG soient en ligne avec le risque réel encouru, il faut que ce type de risque se matérialise suffisamment souvent pour faire statistiquement la différence entre un portefeuille pratiquant une politique ESG et un portefeuille ne la pratiquant pas. Enfin, on peut aussi compter sur le fait que des évolutions réglementaires interviennent qui donnent raison aux investisseurs responsables avant et donc sans que les risques aient besoin de se matérialiser. Mais c'est alors faire un pari bien hasardeux relatif aux ambitions de la classe politique à faire leur travail sur ce plan-là, comme il sera discuté plus loin.

Le point de vue de l'auteur de cette note, à propos des risques environnementaux, est qu'il ne sont quasiment pas reflétés dans les valorisations, principalement parce qu'ils ne peuvent pas vraiment l'être pour ce qui est des risques physiques attachés à une entreprise particulière, car ils sont trop difficiles à prévoir précisément (manque de données fiables et consensuelles, pas de vision précise des chaînes de valeur, imprécision des zones qui seront affectées par les extrêmes climatiques) et parce qu'il n'est pas du tout certain que des politiques publiques se mettent en place qui pénalisent les entreprises particulièrement coupables d'émettre des gaz à effet de serre et/ou exposées, directement ou par le biais de leurs chaînes de valeur, à un durcissement des politiques climatiques. Il en va différemment des risques liés à la gouvernance, facteur qui se rapproche du facteur « qualité » bien connu des analystes

²¹ Voir "Does the Carbon Premium Reflect Risk or Mispricing?" (Atilgan, Demirtas, Edmans & Gunaydin, 25 Sep 2023 https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4573622) et "Carbon Premium: Is It There?" (Shaojun Zhang 26 Jun 2023 https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4490555) qui répondent, en les contredisant, aux conclusions de "Do investors care about carbon risk?" (Bolton & Kacperczyk, 20 Nov 2020 https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3398441)

²² Dans "Biodiversity Risk", Giglio, Kuchler, Stroebel et Zeng suggèrent que les risques sont partiellement, encore faiblement dans les prix https://www.nber.org/system/files/working_papers/w31137/w31137.pdf

financiers et investisseurs actions²³ et dont on peut penser qu'il est déjà plus largement intégré aux prix.

3.1.4 La performance financière

Moins décomplexée encore, mais dans la continuité de la précédente, une motivation s'affiche depuis les années 2015-2018 qui annonce que l'intégration de l'ESG mène à la performance financière, non seulement parce qu'une plus grande résilience éviterait les mauvaises surprises, ce qui ramène au cas précédent, mais aussi parce qu'une entreprise plus vertueuse sera plus apte à capturer les opportunités du futur. Entretenir un climat positif et respectueux avec toutes ses parties prenantes (régulateurs, autorités fiscales, communautés locales, employés, sous-traitants, clients, espaces naturels) est ce qui permet à une entreprise de construire une stratégie de croissance solide et durable. Ses opérations et process industriels seront mieux acceptés, ses produits et services mieux adaptés à une demande en constante évolution, elle attirera à elle, et surtout saura retenir les meilleurs talents sans avoir à mener des politiques salariales agressives. Cette idée est progressivement apparue depuis les années 2015-2018, et s'est largement répandue jusqu'à la fin 2020, s'appuyant sur des analyses quantitatives concluant à une corrélation positive entre performance financière et performance non-financière.

Deux questions se posent néanmoins.

Premièrement, une partie significative des analyses démontrant cette corrélation est le fait d'agences de notation non-financières, à propos desquelles doit se poser la question du potentiel conflit d'intérêt²⁴, ou de chercheurs indépendants, mais qui n'ont typiquement eu la possibilité d'avoir accès à coût faible ou nul aux données qu'à condition d'accepter de soumettre leurs conclusions au fournisseur de ces données avant publication. Si on élargit à l'ensemble des travaux de recherche produits aussi par des gens dont on peut penser qu'ils ont pu travailler de façon totalement indépendante, on arrive grosso modo à un équilibre entre les conclusions positives et les conclusions neutres. Quoi qu'il en soit, on pourrait cependant se dire que ce n'est pas si mal, puisqu'au moins ce n'est qu'une partie très infime des analyses qui pointent vers une sous performance de l'ESG²⁵.

L'autre question qu'il faut se poser est celle du sens de la causalité. Corrélation, certes, mais des entreprises performant-elles mieux financièrement *parce qu'*elles sont plus vertueuses du point de vue de l'ESG, ou n'est-ce pas juste que des entreprises très florissantes du fait de leur positionnement produit, de la réputation de leur marque, ou de la place qu'elles occupent à un moment particulier de l'histoire ont de ce fait des moyens supérieurs à ceux de leurs concurrentes et donc la possibilité d'investir dans des politiques vertes plus ambitieuses, et de dépenser plus d'énergie et d'argent pour communiquer à leur sujet, se faire mousser en quelque sorte, pour améliorer leur image ou tout simplement se faire plaisir ? Quoi qu'il en soit, même dans ce cas, après tout, et comme le remarquait Milton Friedman, si l'entreprise y gagne en image

²³ <https://www.cfm.com/wp-content/uploads/2022/12/179-2018-Is-ESG-an-equity-factor-or-just-an-investment-guide.pdf>

²⁴ Il semble même avéré que, dans le cas d'un fournisseur de données ayant pignon sur rue, des chercheurs aient identifié des modifications *a posteriori* dans les notes de certaines sociétés qui, coïncidence ou pas, ont permis que les « back-tests » de stratégies basées sur ces notes s'améliorent.

²⁵ <https://www.stern.nyu.edu/sites/default/files/assets/documents/ESG%20Paper%20Aug%202021.pdf>

et que cela renforce encore ses ventes, pourquoi pas. Ce qui amène à la cinquième motivation possible pour faire de la finance verte

3.1.5 La motivation commerciale

À partir du moment où l'on ressent une préférence sensible de ses clients pour une formule verte, et à condition que cela ne coûte pas grand-chose, toute entreprise, quelle qu'elle soit va se mettre en ordre de marche pour satisfaire ce besoin. C'est vrai des entreprises commerciales et industrielles, il n'y a qu'à voir l'explosion de slogans verts ayant fait intrusion dans les publicités, et la multiplication d'engagements à « net zéro²⁶ » d'ici 2050. C'est vrai également des institutions financières, d'autant que les coûts ressentis aujourd'hui pour mettre en place des politiques et des moyens qu'on puisse présenter comme suffisants pour commencer à se préparer à honorer de tels engagements sont assez faibles. Il y a bien des efforts louables des régulateurs pour mettre sur pied une « taxonomie verte » qui dit ce qui est vert et ce qui ne l'est pas²⁷, et pour éviter le greenwashing, mais ils ne peuvent en vérité viser qu'à interdire les manipulations les plus grossières dans la présentation des offres produit. Certes, des associations d'acteurs financiers acquis à la nécessité de construire des feuilles de route crédibles et contraignantes à toutes les étapes intermédiaires se mettent en place, mais face au risque de départ d'une partie significative de leurs membres, ils font machine arrière en matière d'exigences²⁸.

3.2 De quel impact parle-t-on et comment se mesure-t-il ?

En matière de mesure de succès, tout dépend évidemment de la nature de l'objectif fixé au départ. Tant qu'il ne s'agit que d'éthique, on ne se pose pas la question de la mesure de l'impact, puisqu'il s'agit simplement de se conformer à des impératifs catégoriques (ne pas être associé de quelque manière que ce soit avec des activités jugées incompatibles avec ses valeurs) et d'en accepter les conséquences.

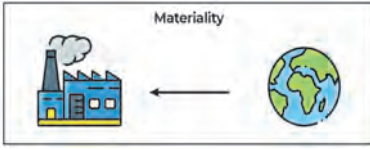
Pour les autres formes de finance verte, au contraire, on ne peut se satisfaire d'avoir mis des contraintes autour du processus d'investissement, on va aussi vouloir en mesurer les effets et les comparer aux attentes, effets sur la performance des portefeuilles, et/ou effet sur l'économie réelle.

²⁶ La formule signifie qu'on fera en sorte de réduire au maximum ses émissions et de compenser intégralement celles qu'on n'aura pu faire disparaître au plus tard en 2050, contribuant ainsi à l'objectif de rester sous les 1,5° de réchauffement planétaire. Il est à noter cependant que l'objectif de non-dépassement semble déjà largement compromis, et que les dirigeants qui aujourd'hui font ces magnifiques déclarations savent pertinemment qu'ils ne seront plus aux commandes, donc pas tenus responsables au moment de constater, en 2050, si leurs engagements auront ou non été respectés.

²⁷ La Taxonomie européenne qui s'applique non aux entreprises, mais aux activités économiques distingue en réalité plus de catégories, et cherche à mieux cerner le cas des activités qui permettent le verdissement d'autres secteurs, ou des activités indispensables et pour lesquelles il n'y a pas d'alternatives vertes déjà disponibles.

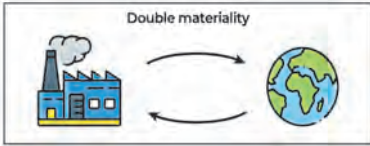
²⁸ <https://www.reuters.com/sustainability/un-climate-alliance-scrap-emissions-rules-insurers-2023-07-05/>
UN climate alliance scraps emissions rules for insurers after exodus (Tommy Wilkes, July 6, 2023)

3.2.1 Simple matérialité, double matérialité



de ses obligations fiduciaires. L'ESG est au service de la bonne tenue des investissements.

La première dimension correspond à la matérialité simple, celle retenue par l'ISSB29, qui convient au cadre prudentiel américain et qui considère que l'investisseur responsable est inattaquable tant qu'il ne se préoccupe d'ESG que dans le cadre strict



significant harm inscrites dans la SFDR.

Lorsqu'on rajoute la deuxième préoccupation, celle de mesurer l'impact sur l'économie réelle, on parle de double matérialité. C'est le cadre choisi par la réglementation européenne, et qui transparaît dans les notions de *principal adverse impact* et de

Pour qu'une activité soit « verte », il n'est pas suffisant qu'elle contribue significativement à certains des objectifs de la taxonomie européenne, il faut aussi qu'elle ne nuise pas substantiellement par ailleurs aux autres.

Pour cette première différence marquée entre l'approche américaine et l'approche européenne, les premiers restant pour ainsi dire proches de la pensée de Milton Friedman alors que les seconds s'en écartent délibérément, on peut déjà noter que la coexistence de ces deux doctrines crée une difficulté pour les entreprises internationales, industrielles, mais aussi financières, car elles se voient confrontées à des juridictions prétendant toutes au même objectif général de promouvoir la *sustainability*, mais selon des modalités et avec des implications radicalement différentes.

Ensuite, comment fait-on pratiquement pour mesurer l'impact de sa politique « responsable », que ce soit sur ses propres performances financières ou en matière d'impact sociétal ?

Pour le premier sujet, on peut en théorie imaginer de comparer la performance effectivement obtenue à ce qu'aurait produit un portefeuille géré selon des principes identiques, mais sans intégration ESG. Mais d'une part cette analyse est rapidement très difficile à faire si on veut remonter loin dans le temps, et d'autre part à quoi sert de savoir qu'on a légèrement sous-performé si l'on ne sait pas encore combien de catastrophes futures on va peut-être s'éviter en ayant fait le choix de la prudence. Aucun investisseur, à notre connaissance, ne fait cette analyse, fastidieuse et de peu d'utilité. On se contente de regarder les indices ESG, et de voir à quel point on s'y corréle, pour s'informer sur le signe probable de la contribution de sa politique ESG, si tant est que l'indice en question en soit un proxy acceptable.

Pour le second sujet, celui de la mesure des impacts sociétaux, il va falloir chercher à mesurer à quel point les politiques d'engagement actionnarial auxquelles on a participé ont eu un effet sur des changements de cap stratégique des entreprises concernées. Il va falloir mesurer combien de personnes se sont vu offrir un travail, combien de villageois ont pu boire ou se nourrir à leur faim, combien de litres d'eau ont été économisés, de combien les émissions ont diminué (ou augmenté moins vite), etc. Tout

²⁹ <https://www.ifrs.org/groups/international-sustainability-standards-board/>

cela par rapport à d'hypothétiques scénarios de référence. Il faudra aussi se montrer honnête et exhaustif dans la mesure d'impact, et ne pas citer que les impacts positifs si ceux-ci ont été accompagnés, et n'ont été rendus possibles que par des impacts collatéraux négatifs.

3.2.2 Les outils de mesure d'impact dans l'économie réelle

Un cadre d'analyse souvent évoqué pour cette mesure est fourni par les « objectifs de développement durable » des Nations Unies³⁰ (figure 2). Chacun des 17 objectifs se décline lui-même en un nombre variable de « cibles » qui sont autant de sous-objectifs précis qu'il s'agit de chercher à atteindre.



Figure 2. Les 17 objectifs de développement durable des Nations Unies.

Ce cadre est l'objet de deux types de critiques.

La première critique est d'ordre pratique et consiste à relever le risque d'utilisation abusive et donc de greenwashing. D'abord parce que l'entreprise industrielle ou financière cherchant à travailler son image pourra choisir l'assortiment d'objectifs, parmi les 17, à propos desquels elle pourra mettre en avant des impacts positifs même si, par ailleurs, elle contribue à des externalités négatives massives. On peut penser à de grandes sociétés fabricantes de pesticides et autres produits phytosanitaires qui mettront en avant qu'ils contribuent à donner du travail à certains et de la nourriture à d'autres, mais sans parler de la dégradation des sols et de l'implosion de la biodiversité auxquelles elles contribuent. En réponse à ce risque d'utilisation abusive, les directives relatives à la finance responsable³¹ ont introduit l'obligation faite à toute entreprise financière, à partir d'une certaine taille, de se préoccuper des PAIs (principal adverse impacts³²) dont les sociétés présentes en portefeuille pourraient être responsables, et

³⁰ <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/objectifs-de-developpement-durable/>

³¹ SFDR Sustainable Finance Disclosure Regulation

³² La réglementation définit une quinzaine de dimensions que tout gérant d'une certaine taille se doit de considérer relativement à ses portefeuilles actions et/ou obligations et incluant par exemple les émissions de gaz à effet de serre, la gestion de l'eau et des déchets, les droits humains et du travail. Au-delà, elle prévoit une soixantaine de dimensions supplémentaires, pour le moment optionnelles. D'autres réglementations existent ou sont en train de se mettre en place imposant aux entreprises industrielles, de manière similaire, de se préoccuper de ses parties prenantes, y compris le long de leurs chaînes de valeurs (cf. les discussions actuelles relatives à la réglementation européenne contre la déforestation et celles imposant un devoir de vigilance CSDDD).

l'Union européenne exige à juste titre qu'une activité ne puisse être considérée verte, au titre de sa « taxonomie », qu'à condition, entre autres, qu'elles ne causent pas d'externalité négative significative³³.

La seconde critique que l'on peut adresser est d'ordre plus ontologique. Est-il vraiment légitime d'accoler les concepts de durabilité et développement dans la même expression alors qu'il pourrait s'agir d'un magistral oxymore? Surtout si, par « développement » on entend GDP³⁴, qu'on n'a jusqu'ici jamais été capable d'augmenter sans aggraver les destructions naturelles. Il nous faut donc urgemment faire émerger et s'imposer de nouveaux indicateurs de développement pour que ce cadre de réflexion ne soit pas intrinsèquement douteux. On peut penser à l'Indicateur de Développement Humain (IDH) qui considère aussi l'espérance de vie et le niveau d'éducation, ou, mieux encore, à l'Indicateur de Progrès Véritable (IPV) qui intègre davantage de dimensions de bien-être social et de durabilité environnementale, le Compte du bien-être économique (CBE) ou encore bien d'autres indicateurs de durabilité environnementale ou de bien-être objectif ou subjectif.

Déjà, une première manière de répondre à la critique ontologique serait de reconnaître une hiérarchie naturelle qui s'impose entre ces 17 aspirations au développement durable, fondée sur le fait que les hommes peuvent changer les lois humaines, mais pas les lois de la nature. Cette observation a été popularisée par Johan Rockström sous la forme du *wedding cake*³⁵ qui place les 4 objectifs relatifs à la Nature à la base de la construction. Sans une biosphère habitable, les autres objectifs seront de toute façon tous compromis. Il y a donc urgence maximale à œuvrer à la durabilité des fondations naturelles de nos civilisations et à mieux comprendre et gérer nos « limites planétaires »³⁶.

3.2.3 Les trois canaux par lesquels les investisseurs ont un impact

Cela fait bien longtemps que l'investissement responsable existe, et ses encours ont crû de façon exponentielle. Pourtant il n'existe pas de consensus sur la manière dont on peut considérer que le comportement et les décisions des investisseurs impactent le monde. Pour débroussailler cette question épineuse, il faut d'abord distinguer les décisions d'investissement, tout ce qui mobilise du cash ou du capital (prêt, achat ou vente de titres, produits dérivés, options, garanties), des interactions ne mobilisant pas d'instrument financier et n'affectant aucun bilan, mais consistant à faire usage ou pas de ses droits de vote et à pratiquer l'engagement actionnarial.

Il n'y a pas vraiment débat concernant ces dernières. Il semble aller de soi que des investisseurs peuvent se montrer influents auprès des entreprises dont ils sont actionnaires, et même aussi auprès d'entreprises dont ils ne sont pas actionnaires, car ils pourraient le devenir, et cela d'autant plus qu'ils disposent de nombreux droits de vote, de nombreux capitaux mobilisables, et/ou d'une capacité reconnue à formuler des propositions de bon sens, de façon privée ou publique, qu'il serait difficile à un dirigeant

³³ En anglais : "Do No Significant Harm" (DNHS) – Pour être verte, une activité doit contribuer significativement à l'un au moins des piliers de la taxonomie, mais aussi, outre l'obligation de respecter des niveaux minimums de protection sociale, ne pas nuire de manière significative à aucun des 5 autres.

³⁴ GDP Gross Domestic Product –Produit Intérieur Brut en français

³⁵ Gateau de mariage – Stockholm Resilience Center

<https://www.stockholmresilience.org/research/research-news/2016-06-14-the-sdgs-wedding-cake.html>

³⁶ <https://www.stockholmresilience.org/research/planetary-boundaries.html>

d'entreprise et/ou son conseil d'administration de ne pas sérieusement considérer. S'il n'y a donc aucune difficulté théorique à reconnaître la possibilité d'un impact par l'engagement, il reste quand même une difficulté pratique de taille : comment le mesurer ? Concernant les votes, on peut les compter, mais la réalité est que dans l'immense majorité des cas, les propositions d'actionnaires visant à exiger de l'entreprise un meilleur comportement ESG sont rejetées. Concernant l'engagement actionnarial, mis à part quelques cas plus ou moins bien médiatisés, il est difficile d'attribuer une modification dans le comportement d'une entreprise à l'engagement actionnarial plutôt qu'à un changement d'opinion spontané de l'entreprise, ou trouvant sa source ailleurs, et il sera encore plus hasardeux de l'attribuer au rôle précis de l'un ou de l'autre des investisseurs. Une fois de plus, on pourra noter des corrélations, pas identifier des causalités.

Concernant l'impact potentiel des prises de décision mobilisant du cash et/ou du capital, il y a en revanche un vrai débat académique opposant les tenants des marchés efficients aux tenants de la thèse inverse. Fama contre Shiller³⁷. Selon que les marchés sont ou non efficients, les décisions des investisseurs peuvent ou non affecter le coût du capital des entreprises et la marche de l'économie réelle sera ainsi, ou non, guidée aussi, impactée, par leurs décisions d'investissement.

Les débats concernant l'appréciation des impacts dans l'économie réelle redoublent encore si l'on s'écarte des formats habituels (long only), typiquement investis dans des titres boursiers ou obligataires, et qui restent souvent longtemps assis sur leurs positions, pour aller vers des formats dits « alternatifs » comme les fonds de couverture qui font grand usage de dérivés et de « short », et qui ont une rotation de portefeuille plus élevée. Pour une majorité d'investisseurs « long only », seuls comptent « vraiment » les titres physiques, les autres instruments n'ayant d'effets éventuels qu'indirects. Cette vue est assise sur un *a priori* idéologique. Si l'on veut bien examiner les choses sans préjugé, on se rend vite compte qu'elle ne repose sur aucune évidence rationnelle. Le point clé est qu'il faut dissocier « cash » et « capital », ou, dit autrement, financement (avec du cash) et « dé-risking » (avec du capital). La mesure des impacts résultant de flux de cash entre investisseurs et entreprises est une chose, elle indique à quel point une banque ou un investisseur a apporté des fonds à une entreprise. La mesure des impacts résultant des modifications imposées par l'investisseur au prix des titres boursiers du fait de ses décisions d'achat et de vente (y compris dans le marché secondaire), si on retient l'hypothèse de Shiller, en est une autre. On peut en effet, sans lui apporter ou lui retirer du cash, modifier la valorisation d'une entreprise, donc les

³⁷ Eugene Fama et Robert Shiller ont tous deux reçu le prix Nobel d'économie en 2013. Eugene Fama a développé l'hypothèse d'efficacité des marchés, qui affirme essentiellement que les prix des actifs financiers reflètent toutes les informations disponibles, de sorte qu'il est impossible de battre systématiquement le marché en essayant de prédire les mouvements de prix. Selon lui, les marchés financiers sont généralement efficaces et les fluctuations de prix sont principalement le résultat de l'arrivée d'informations nouvelles et imprévisibles. D'un autre côté, Robert Shiller a développé des théories qui remettent en question l'efficacité des marchés financiers. Il a mis en avant des concepts tels que les bulles spéculatives et les comportements irrationnels des investisseurs. Shiller a également travaillé sur la finance comportementale, qui étudie comment les émotions, les biais cognitifs et d'autres facteurs psychologiques, influencent les décisions financières. Selon lui, les marchés financiers peuvent être sujets à des erreurs systématiques et à des mouvements de prix excessifs qui ne sont pas entièrement justifiés par les fondamentaux économiques. Le débat entre Fama et Shiller repose donc sur la question fondamentale de savoir si les marchés financiers sont efficaces et rationnels, comme le soutient Fama, ou s'ils sont sujets à des distorsions et à des irrationalités, comme le suggère Shiller. Cette question a des implications importantes pour la théorie financière, la gestion de portefeuille, la régulation des marchés financiers et... la finance verte.

conditions auxquelles elle pourra, dans le futur, si elle le souhaite ou en a besoin, se refinancer, en dette ou en actions. En achetant et vendant des titres, même simplement sur le marché secondaire, on modifie plus généralement aussi d'ailleurs, par-delà les entreprises sous-jacentes, les « multiples » associés aux activités économiques dans lesquelles celles-ci sont engagées. Cela pourra aussi modifier l'appétit d'un CEO et augmenter sa participation à une activité s'il la perçoit comme plus relative. Il y a donc un effet puissant dans le monde réel à distinguer du seul « financement », de la même façon qu'on sait bien que les garanties d'État, comme la garantie apportée par les parents quand leur enfant étudiant cherche une location, changent la donne. Il faut bien toujours projeter les impacts de toute transaction sur ces deux dimensions indépendantes si l'on veut analyser correctement les choses. Dans le cas d'un prêt bancaire, par exemple, la banque prêteuse peut, dans la foulée du prêt, se débarrasser du risque de crédit par un CDS³⁸. Elle aura bien eu un impact en termes d'apport de financement (cash), et doit en être comptable pour cette dimension-là, mais ce n'est ensuite plus elle, mais un autre investisseur, qui joue la fonction de « dé-risking », et s'il s'agit d'une entreprise émettant de grosses quantités de CO₂, il doit, lui, en porter la responsabilité, et non la banque, au titre de ce deuxième canal. À ce propos, on peut citer un papier récemment publié par SBAI³⁹ qui décrit avec tous les détails nécessaires comment faire la part des choses, pour la mesure d'impact, entre les trois piliers (i) vote et engagement, (ii) apport de cash et financement (iii) apport de capital et dé-risking.

La conclusion déplaisante qui devrait s'imposer, mais qui ne fait pas consensus pour le moment, est que les investisseurs semblent exagérer beaucoup l'influence qu'ils ont, individuellement, sur la marche des entreprises, et que le seul phénomène vraiment frappant est la manière dont, presque toujours, les engouements collectifs vont faire monter plus que d'apparemment raisonnable les valorisations, avant qu'une vague de désaffection ne ramène tout vers le bas. Ceci a été très bien décrit par des praticiens et/ou académiques émérites comme George Soros⁴⁰, Fisher Black⁴¹, Jean-Philippe Bouchaud⁴² ou encore Xavier Gabaix et Ralph Koijen⁴³. **L'effet net n'est pas nécessairement nul, cela dit : si, du fait de la hausse, d'autres acteurs se mettent en mouvement et changent le cadre réglementaire, ce qui aura commencé comme une bulle vouée à imploser peut en réalité catalyser un véritable changement de paradigme.** Pourra-t-on dire que la finance verte a eu au moins cette utilité dans l'histoire ?

³⁸ Credit Default Swap : permet de se couvrir contre un risque de défaut sur instrument similaire.

³⁹ SBAI Standard Board for Alternative Investment.

<https://www.sbai.org/resource/principles-for-ghg-emission-accounting-in-alternative-strategies.html>

⁴⁰ « boom and bust » et réflexivité des marchés : George Soros, *The Alchemy of Finance, reading the mind of the market*. John Wiley & Sons, Inc.. New York, 1987. ISBN : 978-0-471-04313-3.

⁴¹ « NOISE », de Fisher Black – peu de papiers académiques d'importance ont un titre aussi court ! <http://www.e-m-h.org/Blac86.pdf>. Les prix évolueraient typiquement entre la moitié et le double de leur valeur fondamentale, si tant est que cette notion existe.

⁴² Jean-Philippe Bouchaud, *Capital Fund Management*. In *Trades, Quotes and Prices*. Cambridge University Press, 2018. ISBN 9781316659335

⁴³ <https://bfi.uchicago.edu/working-paper/in-search-of-the-origins-of-financial-fluctuations-the-inelastic-markets-hypothesis/>

3.3 Récapitulatif intermédiaire

- La finance responsable, sous ses diverses formes (SRI, ESG, verte, durable, etc.) est partie d'investisseurs soucieux d'injecter de l'éthique dans leur gestion en refusant toute association avec les entreprises les plus directement responsables des externalités les plus choquantes. On accepte une perte de rendement comme prix à payer pour rester éthique.
- Au fil des 50 dernières années, la critique du capitalisme s'est trouvée fortement diluée, le mouvement étant rejoint par pléthore d'investisseurs aux motivations diverses. Quelques investisseurs « impact » sont apparus, dans la foulée de la microfinance, et la majorité des acteurs institutionnels pratiquent, sous une forme ou l'autre, l'engagement actionnarial et/ou l'intégration de facteurs ESG, mais en escomptant au contraire un impact neutre ou positif sur leur rentabilité, par le biais de risques extrêmes mieux circonscrits, d'une meilleure capacité à anticiper les opportunités futures, et/ou par l'amélioration de leur image.
- Une différence substantielle existe entre l'approche anglo-saxonne qui se concentre sur la matérialité simple, c'est-à-dire le besoin pour l'investisseur de considérer tout risque financier auquel il serait significativement exposé du fait de certaines externalités⁴⁴, démarche restant en parfait accord avec la définition traditionnelle de ses obligations fiduciaires, et l'approche européenne qui considère que, au-delà de se préoccuper ainsi d'elles-mêmes, les entreprises et leurs financiers ont également une obligation d'identifier et de diminuer les externalités. Les réglementations américaines et européennes créent un espace difficile à naviguer pour les gérants internationaux, les activités en Europe étant soumises à davantage d'obligations.
- Il n'y a guère de consensus quant à l'impact des décisions des investisseurs sur le monde réel. Si on rejette, comme il semble raisonnable à l'auteur de cette note, l'hypothèse d'efficience des marchés, on arrive assez vite à la conclusion que l'effet le plus significatif est obtenu lorsque des investisseurs se mettent à simultanément boudier ou au contraire favoriser tel ou tel segment du marché qui voit alors ses valorisations baisser ou s'élever. Mais à moins que ces mouvements ne donnent lieu à une transformation substantielle du cadre fiscal et réglementaire, cet effet aura tendance à refluer et à s'annuler au bout d'un certain temps.

4. Les résultats obtenus par la finance verte

Cette partie se contentera de décrire les dynamiques récentes au niveau des économies et au niveau des écosystèmes financiers pour tâcher de déceler en quoi l'investissement responsable aurait pu être la cause d'un changement de paradigme transformationnel, en quoi il n'aurait au contraire été qu'une mode passagère. Une recherche d'explications et de leçons à en tirer sera l'objet de la partie suivante.

⁴⁴ Voir la récente annonce de la SEC (le gendarme américain de la bourse) portant sur les obligations faites aux entreprises de transparence en matière d'émissions directes. <https://www.sec.gov/news/press-release/2024-31>

4.1 Impacts dans l'économie réelle

Force est de constater que, en dépit de toutes les déclarations, exhortations et engagements à verdir nos économies, relayés aussi bien par les états que par les acteurs de l'industrie et de la finance, la planète est toujours sur une trajectoire fort dangereuse.

Bien sûr on peut se réjouir d'un fléchissement dans l'intensité carbone de la plupart de nos activités humaines, de nombreuses améliorations techniques n'ont pas encore été déployées à grande échelle et bien d'autres à n'en pas douter verront bientôt le jour, l'ingéniosité humaine n'ayant jamais déçu. Mais pour autant, en valeur absolue, les émissions continuent d'augmenter. L'effet « rebond » joue en effet à plein dans un monde dont l'alpha et l'omega restent la consommation et le commerce. Par ailleurs, et même si on avait tendance à en parler beaucoup moins jusqu'à très récemment, la destruction de la vie sur terre, dans les océans et dans les sols intensément cultivés s'accélère. La 6^e extinction de masse a commencé et nous en sommes la cause⁴⁵. Ce phénomène est bien plus préoccupant encore que la dérive du climat causée par les gaz à effets de serre car il est déjà largement engagé, mais reste plus complexe à analyser, à attribuer et à contrer ou compenser.

S'il n'y avait que le climat, on aurait de quoi être optimiste : les alternatives aux énergies fossiles existent, ainsi que les véhicules électriques, les pompes à chaleur et autres procédés de fabrication d'acier à l'hydrogène pour ne citer que quelques exemples⁴⁶. Le problème devient plus ardu lorsqu'on se pose la question de l'extraction de toutes les quantités de métaux qu'une telle transition énergétique requiert, sachant que l'éolien et le solaire en font une consommation très élevée par unité de capacité électrique. Les concentrations de métal dans les mines de cuivre, par exemple, ont été divisées par 20 environ en quelques décennies, et il nous faudra, d'ici 2030, en extraire plus que tout ce qui a déjà été extrait depuis l'antiquité. D'après la personne en charge des études de l'IEA⁴⁷ sur ce sujet, l'écorce terrestre contient sans doute ce qu'il nous faut, mais le coût social et environnemental sera énorme, surtout s'il faut aller miner le fond des océans. Un problème similaire secoue le monde du transport aérien en ce moment. On sait bien que pour décarboner ce secteur à volume égal sans créer d'externalité supplémentaire par ailleurs, on devrait n'utiliser que des déchets organiques, qui sont en quantité limitée, ou des carburants synthétiques encore à inventer. Si l'on tient à faire croître encore les volumes de km*passagers transportés, ce qui est ce que l'industrie souhaite et prévoit, et ce que les financiers financent, il faudra dédier plus encore de terres agricoles à des cultures de maïs ou de soja⁴⁸, ce qui renforcera les problématiques de déforestation, de stress hydrique et de destruction des écosystèmes.

Tous ces problèmes sont, depuis peu, aggravés par la recrudescence des tensions internationales qui ont tendance à faire passer les problématiques environnementales au second plan. C'est peut-être un paradoxe car ces tensions et conflits pourraient bien être en partie au moins reliés à l'anticipation de déficits futurs en ressources clés. Mais

⁴⁵ <https://www.worldwildlife.org/stories/what-is-the-sixth-mass-extinction-and-what-can-we-do-about-it>

⁴⁶ "Project Drawdown The Most Comprehensive Plan Ever Proposed to Reverse Global Warming" 2017 liste 80 technologies déjà existantes « qu'il n'y a qu'à » faire grandir. <https://drawdown.org/the-book>

⁴⁷ <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>
Agence Internationale pour l'Énergie.

⁴⁸ Voir à ce sujet https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2023-29/SR-2023-29_EN.pdf et <https://theshiftproject.org/article/quelle-aviation-dans-un-monde-contraint-nouveau-rapport-du-shift/>

avec la poussée inflationniste post-Covid, la montée des taux d'intérêts qui s'en est suivie, et le renchérissement voire l'indisponibilité de certains composants critiques venant d'Asie, les perspectives de rentabilité de l'industrie verte ont été brutalement remises en cause, et les financiers ont brutalement perdu leur bel enthousiasme pour la cause climatique.

L'histoire n'étant pas une science expérimentale, on ne pourra jamais dire précisément quel a été l'impact véritable de la finance verte sur l'économie réelle, c'est-à-dire à quel point nous en serions, sans elle, dans nos tentatives de réduction des fractures sociales et/ou de la dérive climatique. On peut néanmoins constater, comparant pays par pays, une absence flagrante de corrélation entre l'intensité avec laquelle on parle de finance verte, ou l'intensité avec laquelle on la régule, et les progrès observés dans le verdissement de l'économie réelle. La Chine est le pays où les progrès en matière d'installation de capacités de production d'électricité solaire et où la vitesse de progression vers la voiture électrique sont les plus impressionnants. Les États-Unis font moins de finance verte que les Européens, leurs financiers restent plus dans la logique de Milton Friedman et ne pratiquent pas la double matérialité (c'est même chez eux qu'a commencé la vague anti-ESG sous la houlette de certains ténors du parti Républicain), pourtant on voit des entreprises vertes quitter l'Europe pour aller bénéficier des conditions plus favorables de l'IRA. Quant à la France, grande championne par le passé de politiques industrielles réussies, elle est aujourd'hui en pointe de la régulation et de la finance ISR et vertes, mais reste à la traîne sur bien des points, en matière de production d'électricité solaire notamment, d'isolation des bâtiments, de protection de la biodiversité et de transition agricole, et on y fait toujours du 130 km/h sur autoroute !

Si donc on fait exception des réalisations de l'*impact investing* qui, bien que limitées par leurs taille et capacité à changer la donne au niveau systémique, n'en constituent pas moins un beau catalogue de *proofs of concept* qui pourraient s'avérer utile par la suite, force est de constater que l'impact de la finance verte sur la marche de nos économies a été bien modeste, sinon carrément inexistant.

Le seul changement de paradigme qui semble s'être opéré récemment concerne l'attitude de nos sociétés démocratiques face à la nécessité, mais aussi la possibilité de changer de cap. L'idée au départ prometteuse qu'on puisse orienter toute l'économie, par le levier de la finance, dans une direction « net zéro », décarbonée, à temps pour ne pas trop remettre en cause nos modes de vie, de consommation et de production semble de plus en plus abandonnée au profit de la constatation amère qu'il va plutôt falloir s'occuper, comme l'annonçait en janvier 2023 le ministre français de la Transition écologique, Christophe Béchu, de faire émerger les solutions d'adaptation à un monde bien moins habitable⁴⁹.

4.2 Impacts dans le monde financier

Au vu des maigres impacts décelés dans l'économie réelle, on est en droit de se demander jusqu'à quel point, et de quelle manière, les institutions financières ont vraiment changé leurs pratiques.

Si on prend d'abord la question du crédit aux entreprises, une finance verte aurait dû,

⁴⁹ <https://reporterre.net/Vivre-a-40C-le-gouvernement-prepare-son-plan>

selon toute logique, accorder des conditions plus favorables aux industries vertes, celles dont on dit qu'elles ont un avenir brillant devant elles, et soumettre à des tarifications plus élevées les industries carbonées, en vue de les décourager ou de manière à intégrer un risque plus grand de faillite à terme. En particulier, on peut regarder les prêts à l'industrie pétrolière et gazière et voir si oui ou non la finance a pratiqué des taux en ligne avec son discours. Or un article du Financial Times paru le 17 novembre 2023 donnait la parole à l'agence de rating S&P qui expliquait, par la voix de Michael Altberg, qu'il n'en était rien⁵⁰, et produisait un graphique (figure 3) montrant que ce n'était que lorsque le pétrole ne valait pas grand-chose, et que la profitabilité immédiate des sociétés de ce secteur était en question, que les taux de financement étaient majorés.

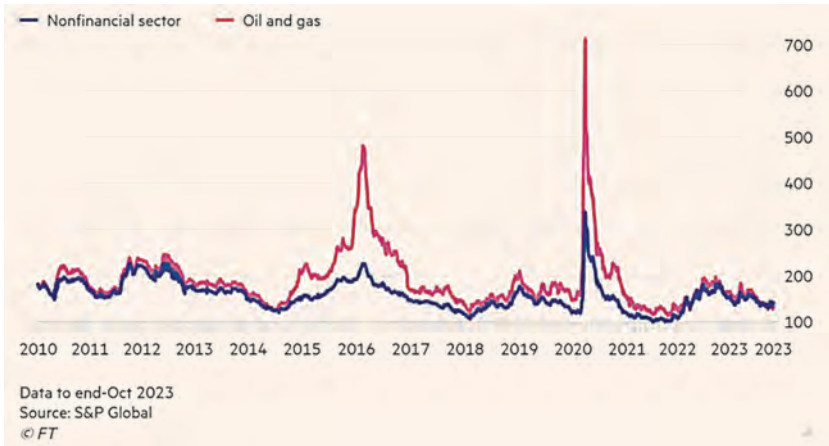


Figure 3. Financement indifférencié entre industrie pétrolière et gazière et autres industries non financières.

Pas de politiques de crédit différenciées, donc, en dépit du nombre impressionnant de banques et d'investisseurs signataires des PRIs ! Ceci, *a contrario*, et comme on en parlera plus loin, milite pour des taux différenciés de refinancement à la Banque Centrale⁵¹.

Mais qu'en est-il allé du côté des investissements en action ?

On fera ici trois remarques, une à propos des données disponibles en amont de la prise de décision, une à propos de la performance financière de l'ESG et de ses rapports avec les « flux ESG »⁵² observés, et la troisième, revenant vers l'emblématique secteur pétrolier, à propos de la théorie des « actifs échoués » qui souvent justifie une politique d'exclusion à son égard.

(i) Notons d'abord que, pour qu'on puisse imaginer que la finance ait modifié ses pratiques d'investissement en action pour intégrer de façon significative l'ESG, il eut fallu qu'elle ait disposé d'une information exhaustive et fiable pour déceler les sociétés les plus performantes et délaissier celles dont on peut vraiment dire qu'elles le sont moins. Or les données ESG n'ont pas le même degré de fiabilité que les données

⁵⁰ <https://www.ft.com/content/830e3ae6-0c3c-4da9-87e7-4ff72aa3e249>

Oil and gas firms face virtually no extra borrowing costs, S&P finds

⁵¹ <https://alaingrandjean.fr/2024/01/04/leviers-daction-de-bce-climat/>

⁵² Par flux ESG on entend des investissements allant vers des produits se déclarant « éthiques », « ESG », « verts », « responsables », « socialement responsables », « de transition », etc.

financières, loin s'en faut. Imaginez la vie d'un analyste financier qui devrait recommander des valeurs particulières à son gérant de portefeuille, mais qui, ne disposerait pas de chiffres spécifiques à l'entreprise, comme son taux de dividende, son Ebitda, son taux de marge opérationnelle ou la croissance de ses ventes, mais seulement la moyenne de ces indicateurs-là pour certaines entreprises du même secteur. Non seulement il devrait faire des recommandations en s'appuyant sur des moyennes sectorielles plutôt que sur des chiffres idiosyncratiques, mais il devrait en plus tâcher d'estimer le biais de transparence : celles qui ont communiqué et qui contribuent à établir la moyenne sont plutôt celles qui sont mieux positionnées que les autres. Exiger des fournisseurs de données ESG une meilleure qualité relève de la quadrature du cercle : si on ne paie pas cher, comment espérer avoir des centaines de KPIs correctement mesurés sur plusieurs dizaines de milliers de titres ? Mais si ces données ne sont pas en mesure d'aider au stock-picking, si tout ce qu'on peut en faire c'est du reporting, pas de l'investissement, comment justifier de payer plus cher ? On se heurte ici à un problème d'autant plus complexe que certains sujets, et souvent les plus pertinents, requièrent une analyse non pas seulement de ce qui se passe au niveau des opérations de l'entreprise elle-même, mais de toute sa chaîne de valeur. Il en va par exemple de l'exposition au risque de voir augmenter le prix de la tonne de CO₂, ou de causer de la déforestation, pour lesquels il faut connaître, parfois sur plusieurs rangs successifs, les contreparties significatives impliquées en amont du point de vue des impacts potentiels, et/ou connaître les usages aval et l'endroit où ils se produiront car les réglementations sont loin d'être homogènes dans l'espace. En conclusion, on peut douter de ce que des données vraiment pertinentes et spécifiques aux entreprises aient été utilisées pour du stock picking. Le gros des flux vers l'ESG s'est donc appuyé sur des notations échouant à capter l'essentiel, car ne reflétant que des critères binaires sans matérialité financière fondamentale, ou trop facilement manipulables⁵³, ou alors au contraire très pertinentes, mais alors modélisées et insuffisamment idiosyncratiques.

(ii) La question de la performance financière de l'ESG ne s'est posée que depuis que l'investissement responsable est sorti de son cercle initial d'investisseurs éthiques, pour qui elle ne comptait pas vraiment, et a intéressé d'autres investisseurs moins naturellement sacrificiels. Une des raisons de l'engouement pour l'ESG, à partir des années 2012-2015, a été l'observation qu'il ne semblait pas, ou plus, qu'intégrer ces facteurs causait la sous-performance financière théorisée par Milton Friedman. On peut remarquer que cette constatation reposait sur des bases encore très ténues, car souvent l'analyse était faite par les fournisseurs de données non financières eux-mêmes, avec potentiellement un choix de fenêtre d'analyse et/ou d'échantillon optimisé pour la circonstance⁵⁴, ou par des chercheurs qui ne se faisaient souvent offrir ces données qu'à condition d'accepter de soumettre leur publication à un droit de véto. On peut même imaginer qu'au fur et à mesure où davantage d'investisseurs achetaient des jeux de données ESG et les utilisaient pour des approches best in class, dans la mesure où il y

⁵³ Par exemple le « nombre de femmes au conseil d'administration » : il faut aller plus loin pour mesurer si une entreprise pratique une diversité de nature à améliorer son agilité fondamentale.

⁵⁴ Un cas a même été relevé de notations financières revues après-coup par leur promoteur, ou de modifications de méthodologie de notation qui avait pour effet de rendre le jeu de données plus attrayant à un investisseur soucieux de bonne performance financière qui allait sélectionner son fournisseur de données sur la base de back-tests. Un back-test consiste à simuler une stratégie d'investissement dans le passé pour voir comment elle se serait comportée.

avait une certaine homogénéité dans les notations⁵⁵, on a pu commencer à avoir un effet prix : les stocks les mieux notés étant les plus achetés, ils ont commencé à mieux performer relativement aux autres. Ce phénomène s'est rapidement auto-alimenté. En effet, de la constatation que l'« ESG ne sous-performe pas », on est passé à l'affirmation que l'« ESG surperforme financièrement », et l'investissement responsable est devenu doctrine dominante. Jusqu'au moment où ce qui n'était donc qu'une bulle implose, à la sortie de la Covid, au tout début de l'année 2021. On le voit sur le graphique de la figure 4, comparant la performance des titres de sociétés associées à la transition (S&P Global Clean Energy Index), à l'indice de marché (S&P500) et à son sous-secteur énergie, principalement pétrolier (S&P500 Energy).

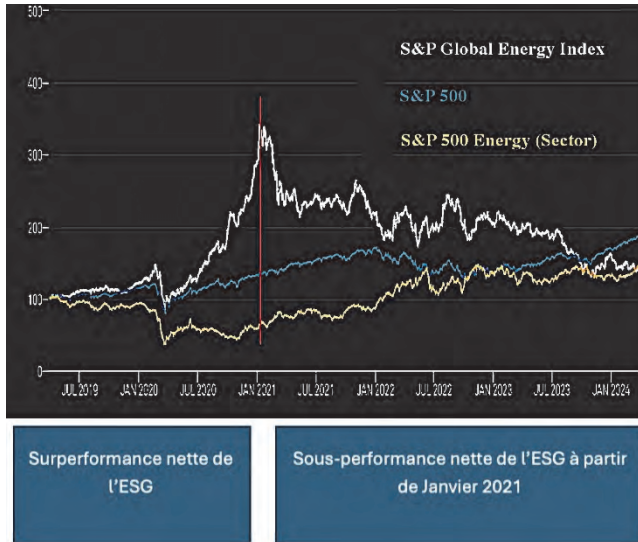


Figure 4. Bulle de performance de l'ESG.

(iii) La théorie dite des « actifs échoués⁵⁶ » de l'industrie pétrolière, mérite aussi d'être mentionnée ici car elle a été un des marqueurs de l'investissement responsable, et a subi une trajectoire similaire. Initialement nourrie de l'observation qu'on s'approchait rapidement d'un pic de production du pétrole, les ressources s'épuisant assez vite, détenir les titres d'une société pétrolière, selon cette théorie, c'était s'exposer à des pertes significatives puisque de telles sociétés étaient vouées à l'extinction. Lorsque les gaz et pétrole de schiste sont apparus aux États-Unis, repoussant le pic d'offre de pétrole, la théorie a été réarrangée. Elle est cette fois partie de ce que la demande allait forcément devoir baisser de façon significative, qu'il allait falloir laisser dans le sol des quantités considérables de charbon, mais aussi de pétrole et de gaz de façon à limiter le réchauffement des températures, et que donc une partie substantielle de la valorisation de ces titres, à savoir celle correspondant à la valeur des ressources fossiles à leur disposition, mais aussi celle correspondant aux actifs engagés dans l'exploration et l'exploitation des champs et non encore amortis risquait d'être revue à la baisse voire

⁵⁵ Un article amusant de Berg, Köbel et Rigobon, "Aggregate confusion: The divergence of ESG ratings", (19 8 2019) insiste sur la caractéristique inverse, à savoir la relative et surprenante faiblesse des corrélations des notes entre agences de notation. Elles sont néanmoins positives, ce qui suffit pour l'argument présenté ici. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3438533

⁵⁶ Stranded assets.

annihilée. Cet exemple en dit long sur le manque de pertinence dont se rendent parfois coupables les vendeurs de données ESG. D'abord, **ce n'est pas parce qu'une entreprise vit d'une activité sur le déclin et promise à disparaître que l'actionnaire est condamné à des pertes**. Au contraire, si la direction de cette entreprise est disciplinée et ne réinvestit que tant qu'il y a matière à continuer l'exploitation, réduit la voilure et procède à temps à des distributions de dividendes exceptionnels et à des rachats d'action pour accompagner, en l'anticipant correctement, la baisse de l'activité, il n'y a aucune raison de s'inquiéter outre mesure. De plus, il est faux de dire que toutes les sociétés sont pareillement exposées. Si certaines ont des coûts de production plus bas, même si leurs réserves sont plus importantes, elles pourront continuer à fonctionner plus longtemps que celles qui, même si elles ont des réserves plus petites, ont des coûts de production plus élevés⁵⁷. Quoi qu'il en soit, ceux parmi les investisseurs responsables qui ont voulu joindre l'acte à la parole et qui ont sous investi dans le secteur pétrolier tout en renforçant leurs positions « vertes » ont pu s'en réjouir car cela leur a donné de la surperformance financière, jusqu'à décembre 2020, mais les dernières années ont été épouvantables, forçant grand nombre d'entre eux d'ailleurs à revenir sur leur décision. Les courbes jaune et blanche ci-dessous résument tout. On voit le secteur pétrolier plus que doubler de valeur à partir de 2020, alors que l'indice des valeurs vertes (courbe blanche) implose littéralement, reperdant 63 % depuis son sommet.

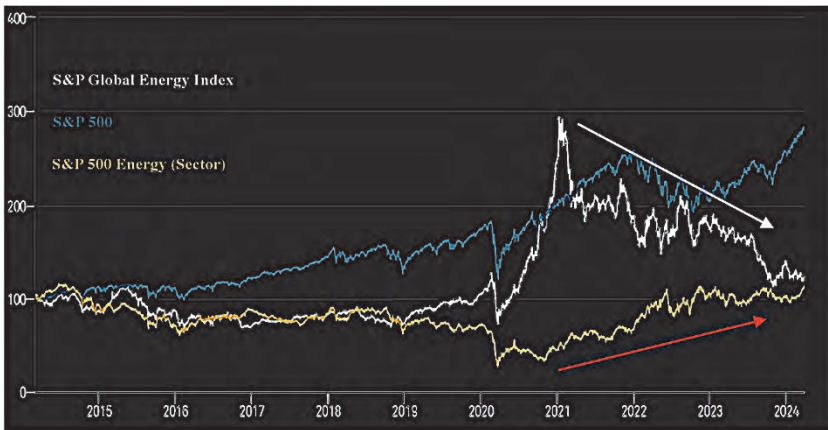


Figure 5. Chute des valeurs vertes après 2020, alors que le secteur pétrolier double de valeur.

5. Quel changement de cap opérer ?

Dans cette dernière partie, on proposera une explication par la finance comportementale aux phénomènes observés ci-dessus. Cela ouvrira la voie à la formulation de suggestions d'ordre pratique pour que, enfin, la finance verte serve à quelque chose.

⁵⁷ On peut citer un parfait exemple de cette manière de raisonner dans un document de Client Earth "The future consequences of Shell's flawed climate plans could cause the company's value to plummet, costing jobs and running the risk of shareholders and investors losing significant amounts of money, including people's pension funds." (<https://www.clientearth.org/latest/news/we-re-taking-legal-action-against-shell-s-board-for-mismanaging-climate-risk/>).

5.1 Analyse causale des impacts observés

5.1.1 Les trois phases de la finance verte

Nous avons vécu, depuis une vingtaine d'années, trois régimes bien distincts. Première période, de la naissance de l'investissement responsable en tant que mouvement significatif en 2006, jusqu'à la prise de conscience par les États de leur responsabilité, la COP21 à Paris en 2015. Deuxième période, allant de 2015 jusqu'à la relance massive des économies une fois le vaccin anti-Covid mis à disposition du public, en janvier 2021. Troisième période, le retour de l'inflation, les tensions internationales, et l'effondrement des ambitions vertes sous la pression du populisme.

La première période est marquée par une lente maturation des idées et une mise en place progressive des systèmes de pilotage des activités ESG. On commence à avoir la main sur plus de données depuis 2009 et, à partir de 2012 les agences de notation extra-financière commencent à couvrir des univers suffisamment larges de titres boursiers pour que des analyses quantitatives, convaincantes pour qui veut être convaincu, puissent être produites. La seconde période voit alors une forte accélération de la mise en œuvre de stratégies d'investissement responsable, ESG au sens large et clean tech. Les gouvernements réunis à Paris en 2015 pour la COP21 l'annoncent: la finance sera verte ou ne sera pas, il s'agit de ne plus perdre une minute, les flux augmentent, et donc les prix, et donc les flux, de façon hyperbolique, jusqu'à ce que ceci s'inverse et qu'on rentre dans la troisième phase.

5.1.2 Explication par les flux réflexivité des marchés, flux et prix

Dans un stimulant article intitulé *flow-driven ESG*⁵⁸, s'appuyant sur des considérations d'élasticité des prix aux flux, Philippe Van der Back démontre que la surperformance financière de l'ESG dans la période 2017-2022 est plus qu'expliquée par les flux vers les produits ESG et « verts », en d'autres termes que cette surperformance ne tient pas à des caractéristiques fondamentales financièrement matérielles sur lesquelles les entreprises les mieux notées en ESG seraient plus performantes, et qui se seraient alors exprimées. Au contraire, sans les flux, il conjecture que ces mêmes titres auraient sous-performé.

Bien sûr ce n'est qu'une analyse parmi tant d'autres. MSCI, un acteur leader dans la notation financière, a publié en 2021 une note prétendant démontrer au contraire que, même lorsqu'elles se renchérisaient sous le fait de flux positifs, la surperformance de ces titres les mieux notés serait néanmoins restée en dessous de ce qu'elle aurait mérité d'être sur la seule base de l'amélioration de leurs fondamentaux, mesuré par le ROE. Quoi qu'il en soit, la coïncidence paraît trop forte pour ne pas être tenté de voir une explication causale entre flux et prix, d'autant que ce schéma de causalité est renforcé lors de la troisième période qui voit cette fois des flux et des prix simultanément à la baisse pour les valeurs vertes. Un dessin de Roger Schillerstrom paru dans P&I en 2017 résume bien ce qui s'est joué ici.

⁵⁸ https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3929359 – « Connaissant les flux entrant dans les "stocks verts" (ESG), si par ailleurs on peut évaluer les élasticités de substitution, alors on peut savoir de combien les prix du vert auraient bougé sans ces flux ». Philippe Van der Beck : "Flow-Driven ESG Returns" – Sep 2021 – SFI / "I find that \$1 flow into ESG-flow raises the aggregate market capitalization of high ESG-taste firms by \$2 to \$2.5".

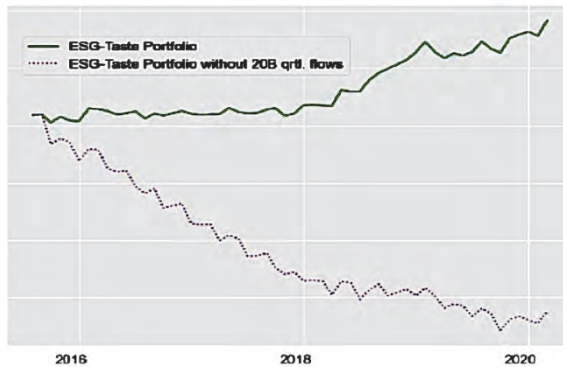


Figure 6. Ce graphe, extrait de l'article de Philippe Van der Beck, montre ce qu'aurait été la performance des titres ESG les mieux notés et retenus pour constituer les indices ESG, donc ayant bénéficié des flux vers les produits ESG (en vert), si ces flux n'avaient pas existé (en violet), le calcul étant fait après estimation des élasticités de substitution.

5.1.3 Le rôle clé des États

Mais pourquoi ce retournement précisément à ce moment-là ? Même si la volatilité est largement endogène, il y a généralement des éléments qui jouent le rôle de catalyseur en de telles inflexions.

Parmi les explications les plus fréquemment citées pour expliquer leur revers de fortune à partir de 2021, on entend souvent cités (i) la hausse des taux d'intérêts, pénalisante pour des industries qui ont des temps longs de retour sur investissement, (ii) les tensions dans les chaînes de valeur, certains composants devenant très chers, ou difficiles à trouver en temps et en heure, et (iii) des problèmes de qualité notamment dans l'éolien, ainsi que les ont illustrés les problèmes rencontrés par Siemens Gamesa⁵⁹. Mais ces explications ne sont pas entièrement satisfaisantes, car ces facteurs n'ont pas varié assez pour justifier l'ampleur de la chute. Il faut chercher une cause plus profonde et radicale.

L'hypothèse la plus vraisemblable est que les marchés se sont progressivement mis à douter de la volonté et de la capacité des États à maintenir des ambitions qu'ils avaient précédemment affichées. Cela a semble-t-il commencé dans la foulée de la flambée des prix du gaz et donc de l'électricité en Europe, à la suite de la guerre menée par la Russie en Ukraine. Les institutions européennes s'inquiétant de l'impact de l'inflation sur les ménages et cherchant des moyens de baisser la pression, décident de mettre en œuvre une politique de gestion des quotas carbone visant à faire baisser le prix de la tonne de CO₂ sur l'ETS, le marché des crédits carbone obligatoires⁶⁰. L'Angleterre emboîte le pas rapidement, et alors que le prix y était monté au-delà de £100 la tonne en 2022, on verra ce prix baisser de plus de la moitié l'année suivante. Le parti conservateur s'est en effet rendu compte qu'il a peut-être encore une chance de se maintenir au pouvoir s'il entretient et amplifie le « narratif » dont on observe qu'il grandit partout en Europe, et qui a déjà pris largement pied aux US, selon lequel le vert « coûte trop cher » au contribuable et serait donc l'ennemi du peuple. Il décide donc de réorienter sa politique

⁵⁹ <https://www.reuters.com/business/energy/what-are-issues-with-siemens-gamesas-wind-turbines-2023-06-23/>

⁶⁰ <https://www.euractiv.fr/section/energie-climat/news/le-parlement-europeen-souhaite-reduire-le-prix-du-co2-pour-baisser-les-prix-de-lenergie/>

énergétique en remettant au goût du jour des projets de mines de charbon et de forage gazier off-shore, et en baissant ses ambitions d'expansion des énergies renouvelables, ce qu'il manifeste avec éclat en septembre 2023 en proposant des contrats d'achat d'énergie éolienne à un prix si bas (£44/MWh) qu'aucune entreprise du secteur ne vient participer à l'adjudication⁶¹. On verra par la suite le contrat européen des *carbon allowances* de l'ETS reperdre lui aussi à peu près la moitié de sa valeur, ajoutant aux déboires des producteurs d'énergie propre qui voient leur mérite relativement à leurs concurrents plus pollueurs récompensé deux fois moins qu'un an plus tôt.

À ce contexte défavorable s'ajoutent (i) l'explosion des dettes publiques, un peu partout, qui crée des difficultés à mettre en place des dispositions fiscales ou des subventions nouvelles pour aider l'industrie verte, (ii) les impératifs du réarmement militaire, face à la montée des périls, (iii) la concurrence de la Chine qui, de son côté, subventionne très massivement son industrie verte et cherche en Europe des débouchés que l'Amérique lui refuse et (iv) à plus court terme, les prix bas du gaz aux US dus à la faiblesse relative de la demande face à une forte production, non élastique aux prix, de gaz de schiste et, en Europe, l'arrivée massive de gaz naturel liquéfié consécutive aux efforts faits depuis 2024 pour pouvoir se passer intégralement du gaz russe et qui, compte tenu de la douceur de l'hiver, maintient les prix de l'électricité aussi plutôt bas en Europe également. On verra ainsi en mars 2024 un grand fabricant suisse de panneaux photovoltaïques exposé à de lourdes pertes fermer définitivement une usine de production en Allemagne qui n'avait pourtant été inaugurée en grande pompe que trois ans plus tôt⁶².

5.1.4 Grid parity et profits

Pendant longtemps, en effet, l'argument principal entendu en faveur du solaire ou de l'éolien avait été : lorsqu'on passera en coût de production en dessous de *grid parity* (le prix de production d'électricité déterminé par le gaz) le plus dur sera fait. On se rend compte aujourd'hui qu'il n'en est rien, et qu'on a plus que jamais besoin d'une politique industrielle ambitieuse, d'une visibilité forte sur les commandes publiques, sur l'évolution ciblée des réglementations, sur la modernisation des infrastructures et la montée en puissance de capacités de stockage centralisées et décentralisées à même de gérer l'intermittence des sources une fois que celles-ci seront prépondérantes, sur la mise en place de barrières douanières pour contrer le dumping chinois et sur le prix du carbone. Sans un cadre aménagé par les États plus rassurant et fiable qu'il ne l'est aujourd'hui, même si le prix de production de l'électricité à partir d'un panneau solaire est à présent bien en dessous du prix de l'électricité sur le marché européen, cela ne suffit pas. Ce que les acteurs financiers regardent, avant de prendre du risque, c'est la perspective de rentabilité dans le temps. Or il y a trop de facteurs et d'inconnues sur le temps long qui pourraient venir peser sur ces marges, et ce n'est que si le marché sent une volonté et une capacité des États à faire advenir la transition « quoi qu'il en coûte »⁶³, ce n'est que si le marché reprend confiance dans l'idée que les gouvernements attacheront un degré de priorité suffisant à ces sujets, qu'il se remettra à investir.

⁶¹ [https://enodatech.com/news-insight/unravelling-the-uks-failed-offshore-wind-auction#:~:text=Why%20Did%20the%20UK's%20Offshore,1%20\(numbers%20are%20fictitious\).](https://enodatech.com/news-insight/unravelling-the-uks-failed-offshore-wind-auction#:~:text=Why%20Did%20the%20UK's%20Offshore,1%20(numbers%20are%20fictitious).)

⁶² https://www.srf.ch/news/wirtschaft/solarunternehmen-in-schiefelage-meyer-burger-ein-unternehmen-in-der-dauerkrise?utm_medium=referral&utm_source=ground.news

⁶³ Comme ils l'avaient fait à l'échelle mondiale pour sortir de la grande crise financière dès fin 2008 et au moment de la Covid, et, au niveau européen, pour sortir de la crise de la dette en 2012 et « sauver » l'Euro.

5.1.5 De l'effort de réduction des externalités à la résignation et à l'adaptation

En attendant, l'attentisme des gouvernements en matière de transition énergétique, de protection de la nature, de transition agroécologique et de justice fiscale est fortement communicatif. On voit évoluer le consensus concernant l'importance relative des risques de transition par rapport aux risques physiques. À moins que les gouvernements ne redressent la barre, s'ils continuent à préférer l'inaction relative pour des raisons politiciennes, la finance risque de se détourner des solutions de décarbonation et de s'intéresser bien plus qu'elle ne l'a fait jusqu'ici aux seules solutions d'adaptation, renforçant ainsi le risque qu'on se prive de ce qui nous reste de possibilités d'éviter le pire.

Il y a en effet une différence substantielle entre les solutions de réduction des externalités et les solutions d'adaptation. Les premières demandent des efforts potentiellement importants s'ils sont faits à une échelle permettant d'être efficace, mais dont les effets seront bénéfiques à tous, les secondes peuvent être mises en place à plus petite échelle, mais n'ont d'effet bénéfique que pour celui ou celle qui fait l'investissement. Si on prend l'exemple du climat, on compare des projets de captation du CO₂ ou de protection des forêts primaires, qui prennent des années et n'offrent aucun retour sur investissement immédiat à ceux qui s'en chargent, mais qui auront de multiples bénéfices sur le temps long pour la collectivité humaine, à la mise en place de climatiseurs qui augmentent le réchauffement global, mais permettent à leurs propriétaires, immédiatement, de ne plus souffrir de la chaleur. Tragédie des Horizons⁶⁴ : ce qu'il faudrait faire n'est pas ce que les marchés, laissés à eux-mêmes, vont faire advenir. Il est urgent, pour éviter le pire, qu'un « réarmement » des États s'opère face à cette défaillance du marché. La question pour les investisseurs est de savoir s'ils veulent et s'ils peuvent le favoriser.

5.2 Que faut-il faire ?

Pourtant rien n'oblige à se résigner à ce scénario. À travers les PRIs, et autres associations où se forgent les modes opératoires de l'investissement responsable, les institutions financières pourraient encore faire un pas de côté, tirer les leçons des échecs enregistrés jusqu'ici et repartir d'un meilleur pied.

5.2.1 Cesser d'être les idiots utiles du système

Pour le moment, mis à part quelques critiques isolées^{65 66 67}, la pratique ESG dans son

⁶⁴ « Tragédie des horizons ». Prononcée en septembre 2015 dans un discours de Mark Carney, alors gouverneur de la Banque d'Angleterre, l'expression a fait date. Elle renvoie au paradoxe d'une finance qui sera sur le long terme affectée par le changement climatique, alors que les acteurs privés et publics de la gouvernance financière sont avant tout mus par des considérations de court terme, déterminées par les cycles d'affaires ou leurs mandats politiques et technocratiques. <https://www.touteleurope.eu/economie-et-social/investissements-de-long-terme-comment-mettre-un-terme-a-la-tragedie-des-horizons/>

⁶⁵ Terrence Keeley "Our approach so far to ESG is 'fundamentally flawed,'" conversation with Rajgopal.- <https://leading.business.columbia.edu/main-pillar-business-society/climate-sustainability/future-esg-think-bigger>

⁶⁶ Tarik Fancy "it is irresponsible for the investment industry to pretend it can solve the world's problems with responsible capitalism" <https://www.fn.london.com/articles/former-blackrock-exec-tariq-fancy-many-esg-experts-are-underqualified-20230829>

⁶⁷ Carole Crozat "ESG's 'biggest sin' is conflating finance, impact and ethics" <https://www.ipe.com/news/blackrock-research-head-esgs-biggest-sin-is-conflating-finance-impact-and-ethics/10069914.article>

ensemble consiste surtout à perpétuer des habitudes de pensée installées depuis la phase « faste » de l'ESG (2015-2020) et à faire tourner une bureaucratie de reporting et de prises de position incantatoires sans prise sur le réel. Mais le constat pourrait être bien plus sévère encore. Par ses effets de manche et ses engagements très médiatisés, la finance verte a sans doute contribué à créer les conditions du désengagement des États, qui ont pu s'exonérer de la tâche qui leur incombait puisque la finance déclarait se charger de modifier la trajectoire. **Non seulement l'investissement responsable n'a produit aucun effet positif notable dans le monde réel, mais il a aussi potentiellement contribué à empirer les choses.**

Reprenons les trois canaux d'influence. Ceux liés au financement par apport de cash et au dé-risking par apport de capital ne sont compatibles avec les obligations financières qu'à condition que puisse être articulé un raisonnement convaincant sur la profitabilité de telles démarches. Or l'investissement responsable ne pourra à nouveau être pensé et présenté comme une activité profitable qu'à condition de voir les États reprendre leur rôle planificateur et transformateur de l'économie réelle. Pour le moment, le seul canal légitime restant du point de vue des obligations fiduciaires est l'engagement. Les deux autres canaux ne devront être activés qu'une fois que les États auront répondu présents et fait leur travail.

5.2.2 Le name and shame étant inopérant, la transparence ne peut suffire

Concernant le troisième canal, celui de l'influence par le vote et l'engagement, la doxa dominante est qu'il convient d'amener les entreprises à devenir plus vertueuses et que, pour celles qui hésitent, il suffit d'utiliser le *name and shame*⁶⁸. Mais n'y a-t-il pas là une grande naïveté, sincère à moins qu'elle ne soit cyniquement feinte, à penser qu'une entreprise soit sensible à cette pression au point de changer de stratégie même quand elle retient que cela heurterait sa profitabilité à court et moyen terme ? On peut prendre l'exemple de Shell qui, bien que pris à parti à de multiples reprises ces dernières années, à partir du moment où un tribunal ne l'a pas officiellement condamné⁶⁹, a récemment annoncé qu'il revenait sur ses engagements⁷⁰. La finance verte doit partir d'une analyse critique des leviers à sa disposition, d'une *theory of change* valable. Le *name and shame* ne suffisant pas, on ne peut laisser les régulateurs penser que leur seule obligation puisse être d'organiser la transparence. Il faut chercher ailleurs les leviers encore disponibles qui permettront de travailler à la réduction des externalités sans rentrer en contradiction avec l'obligation fiduciaire principale de viser à la performance financière.

5.2.3 Réinterpréter correctement Milton Friedman

Revenant à Milton Friedman, il est temps de reconnaître en quoi il avait raison, à savoir que les investisseurs, lorsqu'ils sont des agents⁷¹ économiques, et même lorsqu'ils se proclament « responsables », ne peuvent en réalité faire autrement que

⁶⁸ La locution en anglais *name and shame* (litt. « nommer et couvrir de honte »), traduite par « mise au pilori », désigne le fait de « déclarer publiquement qu'une personne, un groupe ou une entreprise agit de manière fautive » (Wikipedia).

⁶⁹ <https://www.gide.com/fr/actualites/affaire-clientearth-c-shell-vers-un-risque-de-mise-en-cause-des-dirigeants-sociaux-au>

⁷⁰ <https://www.carbonbrief.org/shell-abandons-2035-emissions-target-and-weakens-2030-goal/>

⁷¹ Lorsqu'un agent agit en tant que « principal », il n'a de compte à rendre à personne, donc le cas est parfois différent, mais il est aussi plus rare et représente une fraction minoritaire des encours gérés.

de chercher à maximiser leurs profits à l'intérieur des règles en vigueur. Ils ne peuvent utiliser l'argent qu'on leur confie pour poursuivre d'autres agendas que leur dicterait leur conscience. Mais peut-être est-ce au niveau de ce cadre légal en place que l'équation comporte néanmoins encore quelque degré de liberté insoupçonné ? S'il n'est pas le bon, il faut œuvrer à en changer. **Comment changer les règles du jeu, tout est là !** Plusieurs formes d'action sont envisageables, à mener de front, et présentées ici sans ordre particulier :

(i) S'obliger à comprendre les mécanismes de transmission et les impacts qu'on produit. On est très loin du compte dans la plupart des cas. Par exemple, peu d'investisseurs responsables savent qu'il leur faudrait commencer par décider entre Fama et Shiller.

(ii) S'assurer qu'on établisse les priorités non pas en fonction de l'intensité des émotions associées à tel ou tel sujet (c'est plutôt le travail des ONG que de s'appuyer sur l'émotion pour alerter le grand public), ni en fonction de la disponibilité des données (effet de réverbère), mais en fonction des interdépendances naturelles. Par exemple, ne s'occuper que de carbone et pas de biodiversité est tentant, mais totalement contre-productif.

(iii) Œuvrer en faveur de la mise en place de jeux de données plus crédibles et moins coûteux à produire. Il est effarant de penser par exemple que, pour disposer des données scope3 (émissions indirectes, amont et aval, le long des chaînes de valeurs), il faille s'adresser à un marché de vendeurs de données qui vont tous, à leur façon, modéliser l'économie entière et arriver tous à des résultats différents. Ne serait-il pas urgent que les États prennent le sujet à bras le corps pour créer des mécanismes centralisés permettant un calcul plus juste et bien moins coûteux, et s'il le faut munis de dispositifs permettant de ne produire l'information que selon des règles d'accès préservant le secret des affaires ?

Une initiative européenne de mise en place de point unique d'accès pour données ESG existe⁷² ; elle ne va pas assez loin, mais constitue un pas dans la bonne direction.

Une solution bien plus élégante et puissante a été proposée par les professeurs Robert Kaplan et Karthik Ramanna, à travers les travaux du E-liability Institute, qui permettrait de calquer un calcul de l'empreinte carbone à chaque niveau des chaînes de valeur sur un mode semblable en tout point à la façon dont s'établit la taxe sur la valeur ajoutée⁷³.

Peut-on imaginer une seconde que l'impôt sur les sociétés payé par une entreprise soit établi à partir des résultats de ses concurrentes ? Absurde n'est-ce pas ? De la même façon, et pour les mêmes raisons, ce ne sera qu'à partir du moment où l'on disposera de données correctes, spécifiques à chaque entreprise, non modélisées à partir de moyennes sectorielles, que l'on pourra espérer que les investisseurs les utilisent aussi pour investir et pas uniquement pour du reporting. Et ils seront d'autant plus enclins à les utiliser qu'ils pourront penser que des réglementations,

⁷² https://www.eurofi.net/wp-content/uploads/2022/05/eurofi_the-european-single-access-point_a-game-changer-for-esg-data_paris_february-2022.pdf

⁷³ https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4383510 et <https://e-liability.institute/what-is-e-liability/>

taxes et subventions pourront prendre appui sur elles, avec un réel impact sur les comptes, et acquérant ainsi une matérialité financière.

(iv) Repenser les stratégies d'engagement actionnarial. Il est illusoire, on l'a vu, de demander à une entreprise de faire des choses contraires à sa mission de génération de profit dans un cadre donné. Il est par exemple contre-productif de demander à une entreprise pétrolière occidentale de réduire sa production dans un contexte où rien n'est fait pour diminuer la demande globale. **C'est la demande globale qui fixe le niveau global des émissions.** À supposer qu'on arrive à ses fins, le seul résultat concret sera qu'une autre entreprise, de Russie ou d'Arabie Saoudite ou d'ailleurs, se substituera à l'entreprise occidentale et profitera de l'aubaine, sans que les émissions ne baissent le moins du monde. Il sera en revanche beaucoup plus utile de porter l'engagement sur le sujet des activités des lobbyistes. C'est en effet le moyen que nombre de compagnies pétrolières ont utilisé, agissant en direct, ou à travers des *trade associations* comme l'American Petroleum Institute, ou en subventionnant de la fausse recherche, pour minimiser le danger de dérive climatique⁷⁴, favoriser le routier aux dépens du ferroviaire, les cas d'usage du plastique et, généralement, retarder la baisse de la demande de pétrole. Ce n'est pas pour rien que la vague anti-ESG a particulièrement ciblé le travail de Climate Action100+, une organisation qui se préoccupe de lobbying, faisant appel à InfluenceMap pour l'analyse⁷⁵.

Dernier front, sans doute le plus ambitieux et le moins exploré, prendre langue avec les gouvernements, ou les institutions supranationales, pour les aider à faire émerger des politiques industrielles à l'élaboration desquelles la finance verte puisse être associée. Pour prendre par exemple le sujet des ENR, on voit bien une hausse significative du pourcentage d'énergie produite par des sources propres depuis des années, mais aller plus loin requiert de travailler sur plusieurs fronts :

- Reconstruire des filières industrielles au niveau local pour éviter de tomber dans une trop grande dépendance vis-à-vis de la Chine. Les États-Unis ont commencé dans cette direction en lançant, en août 2022, l'Inflation Reduction Act. L'Europe peine à s'y mettre, car les consensus, à 27, sont plus compliqués, et l'argent plus difficile à trouver.
- Concevoir et dérouler des politiques industrielles cohérentes qui permettent la montée en puissance des sources intermittentes à un niveau significatif, ce qui suppose des améliorations au niveau des réseaux, des solutions informatiques pour mieux prévoir et optimiser les flux, des solutions de stockage centralisées autant que décentralisées, etc. Les changements de logique d'infrastructure, mais aussi de philosophie de gestion des réseaux requis sont massifs et on peut douter que les marchés, s'ils sont laissés à eux-mêmes, sachent faire les bons choix, et il faut donc travailler de concert. La manière dont les gouvernements européens ont taxé les « super profits » des énergéticiens verts après que les prix de l'électricité avaient monté en 2022 a envoyé un très mauvais signal.
- Remettre le plan au goût du jour et concevoir des politiques vertes (transitions simultanées de l'industrie, de l'agriculture, de la mobilité, des bâtiments, etc.) en s'appuyant sur des outils permettant la coordination et la cohérence

⁷⁴ Merchants of doubt <https://www.cairn.info/revue-questions-de-communication-2013-1-page-462.htm>

⁷⁵ https://www.climateaction100.org/wp-content/uploads/2021/10/InfluenceMap-CA100-Benchmark-Alignment-Indicators-Methodology_Sep21.pdf

d'ensemble comme le Plan de Transformation de l'Economie Française du Shift Project^{76 77 78}.

On sait la capacité qu'ont les investisseurs en obligations étatiques d'infléchir les politiques monétaires et fiscales dans un sens de plus grande discipline, en jouant le rôle de « bonds vigilants ». C'est bien en partie grâce à ce mécanisme de régulation « par le marché » que les politiques fiscales ont convergé et que l'Euro a pu se construire. S'agissant de notre biosphère, pourquoi ne pas mettre la pression sur les États pour qu'ils ne se contentent plus de mettre en place de la transparence, condition nécessaire cependant très loin d'être suffisante ; mais qu'ils reviennent également en force dans l'économie réelle ? Si ce qui retient les institutions financières de se mêler de politique est la crainte d'être perçues comme interférant de façon illégitime avec les processus démocratiques, pourquoi ne pas aider à mettre en place des initiatives permettant une meilleure information du public, voire des assemblées citoyennes ?

Après tout, les investisseurs de long terme sont peut-être les derniers *adults in the room*. Ils ont en charge l'épargne longue, celle dont la maturité dépasse largement les cycles électoraux.

6. Conclusion

La finance verte a fait long feu, mais tout n'est pas perdu si elle sait se ressaisir. Oui, ce n'était jusqu'à présent qu'une bulle, les prix des actions bien notées, et des actions « vertes » montant du fait de flux fondés sur des données de piètre qualité avant que tout ne se déconstruise. Mais le besoin réel existe toujours, et elle se doit donc de se réformer pour transformer enfin l'essai. Cela demandera une introspection en profondeur car les fondations, intentions et motivations qui la traversent sont aujourd'hui trop disparates, voire contradictoires. Il est grand temps qu'émerge la finance verte 2.0, celle qui fera deux choses bien différemment. D'abord, elle donnera raison à Milton Friedman là où il avait raison, à savoir le fait que, tant qu'on sera en économie libérale, il restera parfaitement illusoire de prétendre qu'on puisse demander à des acteurs qui ne sont que des « agents » de ne pas chercher à maximiser leur profit. Ensuite, elle prendra le problème par l'autre bout, le bon bout, et cherchera tous les leviers à sa disposition par lesquels faire entrer le cadre fiscal et réglementaire dans une dynamique volontariste qui garantira à l'investissement vert une rationalité financière constamment suffisante.

Bien sûr, tout ce qui est écrit ici suppose qu'on veuille encore faire société ensemble, et qu'on soit prêt, s'il le faut, à changer les critères de réussite. Sans parler de décroissance, terme tabou s'il en est, il faudra retenir et faire croître des indicateurs plus pertinents que le PIB, ce qui ne pourra se faire sans consensus politique. Le sujet sera d'autant plus complexe qu'aujourd'hui la croissance du PIB, toute néfaste qu'elle soit à long terme,

⁷⁶ <https://theshiftproject.org/crises-climat-plan-de-transformation-de-leconomie-francaise/>

⁷⁷ On peut penser aussi à l'appel lancé, pour un « projet Manhattan de la transition écologique » par 37 scientifiques le 23 septembre 2023 : <https://sites.google.com/view/manhattan-transition/home> et <https://sites.google.com/view/manhattan-transition/home> https://www.imo.universite-paris-saclay.fr/media/filer_public/f6/f2/f6f2856a-ed39-4830-bf52-a2435f46cf15/2024-01-12-manhattan.pdf

⁷⁸ On peut enfin citer le travail de Michel Spiro au niveau des Nations Unies <https://pt.ird.fr/node/10930> – <https://council.science/fr/current/press/international-year-of-basic-sciences-proclaimed-un/>

est toujours, à court terme, la solution privilégiée car elle améliore sans douleur les recettes fiscales, ce dont tout gouvernement a besoin pour pouvoir offrir du mieux-être à ses électeurs et se maintenir. Mais il faudra aussi que les institutions financières acceptent que s'éteigne un moteur qui, depuis des décennies, fait monter les marchés financiers et donc leurs revenus, puisque ceux-ci s'expriment toujours en pourcentage des actifs sous gestion. Y aurait-il conflit d'intérêt ?

Si nous sommes déjà dans le monde dystopique dépeint par Douglas Ruskoff dans son ouvrage « *Survival of the Richest: escape fantasies of the tech billionaires* »⁷⁹, si la démocratie s'éteint, si nous sortons des Lumières, si les gouvernements ne sont plus au service de tous les citoyens, si les marchés ne sont plus qu'un casino pour ultra-riches déconnecté du bien-être économique général, ce sera le grand chacun pour soi et seule l'adaptation trouvera financement. La finance responsable, redevenue intrinsèquement sacrificielle, retournera inexorablement dans son ghetto d'origine, là où la cantonnait Milton Friedman.

On peut encore éviter la chute dans l'abîme, mais on ne peut plus se disperser, il est temps de passer à l'âge adulte.

⁷⁹ The tech elite have a plan to survive the apocalypse: they want to leave us all behind. Voir aussi <https://www.theguardian.com/technology/2018/jul/23/tech-industry-wealth-futurism-transhumanism-singularity>

L'interdisciplinarité dans l'enseignement scolaire : une source d'enrichissement indéniable, mais dont la mise en œuvre soulève des questions vives, d'ordres pédagogique et organisationnel

Anne Burban

Inspectrice générale honoraire de l'éducation, des sports et de la recherche
(Groupe de mathématiques)
Personnalité qualifiée au Conseil supérieur des programmes

Abstract

This chapter deals with the pedagogical and didactical aspects related with the practice of interdisciplinarity in sciences, as applied within the French education system, from primary school to the preparatory classes for Grandes Ecoles. The author's view on this subject is supported by the vision she was able to acquire during her professional activity, first as a mathematics teacher in preparatory classes, then as a general inspector. Her perspective has been slightly shifted by her current experience as a member of the Higher Programs Council, body in charge of supervising the writing of school programs, and issuing opinions and proposals to the Minister of National Education and Youth. After reviewing the historical evolution of scholarly knowledge, then of taught knowledge, the author studies different kinds of association of several disciplines at school, and explains the methods of implementation, while specifying the limits, the weaknesses and the possible risks.

1. Du savant généraliste à la fragmentation disciplinaire

Lorsque notre ancêtre *Homo habilis*, il y a quelque 2 millions d'années, taillait les premiers outils, il devait certes avoir quelques savoirs (il lui fallait reconnaître le bon galet) et quelques savoir-faire (il devait le tailler correctement), mais il est probable qu'il ne s'est jamais demandé si son art relevait de la géologie, de la géométrie ou de la technologie.

Au IV^e siècle avant notre ère, Aristote était tout à la fois philosophe, scientifique, poète, mathématicien, homme politique. Il était savant, voilà tout.

Au XVIII^e siècle, Diderot et d'Alembert ne savaient sans doute pas tout, mais ils pouvaient envisager comme possible de concevoir un ouvrage rassemblant le savoir humain. Certes des rubriques apparaissent dans ce savoir maintenant vaste, mais l'honnête homme peut encore rêver de les fréquenter toutes.

Ce n'est qu'aux XIX^e et XX^e siècles que les savoirs se morcelèrent en disciplines toujours

plus précises, toujours plus nombreuses, leur nombre augmentant par scissiparité. En même temps, l'ambition scientifique de chaque homme se limite et cela semble inévitable : devenir expert dans un champ de savoir exige, de plus en plus, que l'on se spécialise et donc que l'on abandonne d'autres domaines. Les disciplines savantes se multiplient. Les frontières se dressent, qui protègent des territoires et leurs habitants.

L'école suit, à sa manière, cette fragmentation, tant dans l'organisation de ses enseignements que dans la spécialisation de ses professeurs.

Les premiers agrégés apparaissent en 1766 pour remplacer les professeurs jésuites expulsés par Louis XV. Ils ne sont pas spécialisés. En 1821, trois spécialités sont mises au concours : lettres, grammaire et sciences. L'agrégation de philosophie naît en 1828, celle d'histoire en 1830. En 1841, l'agrégation de sciences se scinde en agrégation de mathématiques d'une part et agrégation des sciences physiques et naturelles d'autre part. Les sciences naturelles se séparent des sciences physiques en 1881 et l'histoire abandonne la géographie en 1944. Le besoin de compétence scientifique du professeur s'exprime par sa spécialisation disciplinaire. Un lien fort s'affirme alors entre compétence et spécialisation ; ce lien persiste, et est l'une des causes de certaines résistances à la mise en place de l'interdisciplinarité.

La fragmentation des disciplines scolaires n'est donc pas un caprice infondé, elle est la conséquence de l'augmentation du volume des savoirs et de la nécessité de se spécialiser pour devenir compétent et pour avoir la légitimité de transmettre des connaissances.

2. L'interdisciplinarité, tendance de la vie intellectuelle depuis un demi-siècle

Rappelons tout d'abord un exemple emblématique en matière d'interdisciplinarité : le 25 avril 1953, la revue *Nature* publie un article majeur pour l'histoire de la biologie. D'à peine une page, signé de James Watson et Francis Crick, il contient une description d'une structure possible pour la molécule d'ADN. Voici donc deux biologistes, qui signent, pourrait-on dire l'acte de naissance d'une nouvelle discipline, la génétique moléculaire, et qui pour cela publient un article de chimie (une structure moléculaire) établi à partir de travaux de physique (la diffraction des rayons X par des cristaux) menés par Rosalind Franklin, qui n'est d'ailleurs même pas citée dans l'article...

Dans la science savante, les relations entre disciplines sont parfois difficiles et l'interdisciplinarité ne s'installe pas sans violence. Quoi qu'il en soit, on voit ici un exemple de collaboration de regards disciplinaires qui fait progresser le savoir. Et cette collaboration aboutit à la naissance d'une nouvelle discipline, la biologie moléculaire. Comme on le voit, en matière de recherche, l'interdisciplinarité, souvent, ne fait pas disparaître les disciplines, mais les multiplie.

Dans le domaine des sciences, mais aussi dans ceux de l'art, de la littérature et de la philosophie, la vie intellectuelle, depuis le milieu du XX^e siècle, pousse à interroger les cloisonnements disciplinaires, parfois même à remettre en cause leur légitimité. Parmi les intellectuels dont la pensée a inspiré le développement de l'interdisciplinarité dans le monde scolaire, on peut citer Edgar Morin et Michel Serres.

Edgar Morin associe la nécessité de l'interdisciplinarité à la complexité du réel. Si le réel

est complexe, c'est qu'il est multifactoriel. Aucune discipline ne saurait, à elle seule, rendre compte de cette complexité, seule le peut une coopération d'approches convergentes. Si les disciplines sont indispensables pour explorer chacune en profondeur une dimension particulière du réel, l'appréhension de celui-ci dans son ensemble, exige l'interdisciplinarité.

Quant à Michel Serres, il fait dans *Le Tiers-instruit* l'éloge de l'interdisciplinarité comme manière de sortir de soi-même, de rompre avec ses confortables habitudes. Lorsqu'on est confortablement installé dans ses savoirs familiers, sa discipline, on évolue peu ; l'enrichissement survient lorsque l'on quitte ce cocon.

C'est le sens de la phrase « *Certes, je n'ai rien appris que je ne sois parti, ni enseigné autrui sans l'inviter à quitter son nid* », extraite du *Tiers-instruit*. L'interdisciplinarité est alors perçue comme un moteur de développement personnel et de progrès professionnel.

Dans la suite de cet article, nous allons nous pencher sur la traduction de ces considérations intellectuelles en termes pédagogiques et nous demander s'il est possible de trouver, dans la classe, des vertus à l'interdisciplinarité qui traduiraient le rôle qu'elle joue dans la production de savoirs modernes et dans le développement de nouvelles compétences, tant pour les professeurs que pour les élèves.

3. Pluridisciplinarité, interdisciplinarité, transdisciplinarité

Alors que l'enseignement secondaire français est organisé et structuré par des logiques disciplinaires qui ont été formalisées et stabilisées après 1875, les programmes du collège et du lycée (qu'il soit général, technologique ou professionnel) en application depuis les années 1990 encouragent les enseignants à développer des démarches et des pratiques interdisciplinaires. On peut citer par exemple « l'éducation à l'environnement pour un développement durable » (B.O. n° 28 du 15 juillet 2004), qui affiche clairement l'ambition d'une approche transversale des problématiques et des objectifs retenus. La situation des programmes français n'est pas exceptionnelle et se retrouve dans la plupart des curricula des pays développés.

L'interdisciplinarité est, en effet, une question essentielle dans la réflexion contemporaine sur l'utilité sociale des savoirs scolaires. La compréhension par les élèves du monde dans lequel ils vivent, caractérisé par une complexité croissante, s'accommode mal d'une appréhension par des disciplines cloisonnées qui souvent s'ignorent.

Mais que recouvre réellement une approche pédagogique qui dépasse le strict cadre des disciplines traditionnelles ? Essayons déjà de comprendre et d'appréhender la complexité d'un lexique qui témoigne d'approches et de méthodes bien différentes, puisqu'on parle à la fois de pluridisciplinarité, d'interdisciplinarité et de transdisciplinarité.

3.1 La pluridisciplinarité

La pluridisciplinarité concerne l'étude d'un même objet à partir de plusieurs disciplines. Elle s'incarne notamment dans la mention, dans les programmes de chaque discipline,

des liens qu'elle entretient avec d'autres disciplines ; c'est le cas, par exemple, des statistiques qui figurent dans les programmes de mathématiques, mais qui sont reprises dans ceux des sciences expérimentales (physique, chimie, sciences de la vie et de la Terre) à travers le traitement des incertitudes de mesures. Cela concerne également l'algorithmique et la programmation informatique dont l'enseignement est abordé à la fois en mathématiques et en technologie (au collège) ou dans les sciences de l'ingénieur (au lycée).

L'efficacité de cette pluridisciplinarité repose sur une collaboration effective entre les enseignants des disciplines concernées. Force est de reconnaître que l'organisation actuelle du service des enseignants (qui ne prend en compte que le temps de face-à-face devant les élèves) ne facilite pas les concertations, dont l'effectuation, non obligatoire, repose uniquement sur le volontariat des équipes pédagogiques.

En l'absence de concertation entre les enseignants, la pluridisciplinarité se résume à la juxtaposition de points de vue, sans dégager d'unité globale, et sans expliciter les liens, les différences et les complémentarités entre les disciplines impliquées. Pour les élèves, cette superposition peut même produire de la confusion lorsque le vocabulaire, les représentations ou les notations utilisées dans chaque discipline diffèrent, sans que l'éventuelle raison de ces différences leur soit explicitée. Il en va par exemple de la polysémie des termes utilisés. Ainsi, le mot « hypothèse » ne revêt pas le même sens en mathématiques (où elle se rapproche d'un postulat à partir duquel on établit une démonstration) et dans les sciences physiques et naturelles (où il s'agit d'une idée provisoirement admise avant d'être soumise au contrôle de l'expérience).

3.2 L'interdisciplinarité

L'interdisciplinarité est plus intéressante et plus fonctionnelle que la pluridisciplinarité puisqu'il s'agit, à partir de chacune des disciplines concernées, de se demander ce que les disciplines connexes apportent de plus en termes de connaissances, de manières d'appréhender les choses et de résoudre les problèmes sous-jacents. Il en résulte un croisement fertile à la fois au niveau des théories, des démarches mises en œuvre et des résultats observés. Cela aboutit à une compréhension plus complète, voire systémique, de l'objet étudié. C'est par exemple le cas lorsqu'on confronte des résultats fournis par une théorie mathématique (par exemple celle des probabilités) à des mesures expérimentales de nature physique ou biologique. Cette approche permet par exemple d'appréhender de manière critique le domaine de validité d'un modèle théorique, et d'en envisager un autre pour dépasser les limites du premier. Cette approche est extrêmement riche en termes d'apprentissage, mais elle suppose que l'élève ait initialement intégré les connaissances et les méthodes de base de chaque discipline mises à contribution.

Loin d'être un appauvrissement, une perte d'expertise, la pratique de l'interdisciplinarité permet l'exploration de nouveaux territoires à l'interface des disciplines, ainsi que la mise en commun et la confrontation féconde d'approches différentes. Ainsi, pratiquer l'interdisciplinarité change le regard sur les savoirs unitaires. En considérant un même objet sous plusieurs angles, on en perçoit mieux le volume et les contours. L'interdisciplinarité est à la pédagogie ce que la vision binoculaire, en relief, est à la perception du monde. L'interdisciplinarité permet en effet de mettre les savoirs en perspective les uns par rapport aux autres, de comprendre la complémentarité des approches et leur nécessaire mise en synergie pour relever les

défis du monde actuel et de celui à venir.

Par ailleurs, et ce n'est pas le moindre argument en sa faveur, pratiquer l'interdisciplinarité, c'est permettre aux enseignants de prendre conscience des difficultés qui se posent aux élèves confrontés à la multiplicité des approches, par exemple à la polysémie du vocabulaire employé dans chaque discipline. Lorsqu'on parle d'argumentation, parle-t-on de la même chose en sciences et en histoire ? Le sens du mot *hypothèse* est-il le même en mathématiques et en biologie ? La preuve a-t-elle le même statut en mathématiques et dans les sciences expérimentales ? Prendre conscience de ces difficultés permet, soit de les effacer lorsqu'une harmonisation est possible, soit de les assumer consciemment quand c'est la seule solution.

3.2.1 Un exemple

Un exemple d'enseignement de l'interdisciplinarité scientifique au niveau du collège concerne les six « thèmes de convergence » ayant figuré dans le préambule du programme de collège de 2008. Au nombre de six, ces thèmes visaient à permettre à l'élève de se construire une première représentation globale et cohérente du monde dans lequel il vit. Ils avaient été retenus car jugés comme essentiels pour les individus et la société :

- Thème 1 : importance du mode de pensée statistique dans le regard scientifique porté sur le monde ;
- Thème 2 : développement durable ;
- Thème 3 : énergie ;
- Thème 4 : météorologie et climatologie ;
- Thème 5 : santé ;
- Thème 6 : sécurité ;

Le contenu de ces thèmes a été établi conformément aux programmes des disciplines concernées (mathématiques, physique-chimie, sciences de la vie et de la Terre, technologie), dans lesquels ils sont d'ailleurs mentionnés ; ils n'introduisent pas de nouvelles connaissances ni de nouvelles compétences exigibles des élèves et ne font pas l'objet d'un enseignement spécifique. L'édification de ces objets de savoirs communs doit permettre aux élèves de percevoir les convergences entre les disciplines et d'analyser, selon une vue d'ensemble, des réalités du monde contemporain.

Pour chaque enseignement disciplinaire, il s'agit de contribuer, de façon coordonnée, à l'appropriation par les élèves d'éléments d'une culture partagée. Cette démarche doit en particulier donner plus de cohérence à la formation scientifique de tout futur citoyen. Elle vise aussi à faire prendre conscience aux élèves que la science est plus que la simple juxtaposition de ses disciplines constitutives et qu'elle donne accès à une compréhension globale d'un monde complexe, notamment au travers des différents modes de pensée qu'elle met en œuvre.

3.2.2 Un bilan

Les objectifs, à la fois attrayants et ambitieux, de cette première approche scientifique interdisciplinaire n'ont malheureusement jamais été atteints : ne disposant pas d'un horaire dédié, n'étant pas évalués au diplôme national du brevet, les thèmes de convergence n'ont quasiment jamais été enseignés. Dans le cadre de la réforme du collège de 2016 sous l'autorité de la ministre, madame Vallaud Bel Kacem, ils ont été remplacés par les enseignements pratiques interdisciplinaires (EPI) qui n'ont pas connu davantage de succès : au nombre de six en 2016, à traiter sur l'ensemble du cycle

4 (5^e, 4^e, 3^e), ils ont été réduits à un seul en 2017, sous le ministère de Jean-Michel Blanquer qui souhaitait recentrer l'enseignement sur l'apprentissage des fondamentaux. Ces deux exemples illustrent la difficulté d'implantation pérenne des enseignements interdisciplinaires au niveau du collège.

3.3 La transdisciplinarité

La transdisciplinarité se nourrit énormément d'interdisciplinarité. Elle s'en écarte cependant dans sa volonté de traverser toutes les approches disciplinaires dans la perspective de dégager des éléments transcendant les disciplines. La transdisciplinarité a l'ambition de déborder les champs disciplinaires afin d'envisager l'objet d'étude dans sa complexité et surtout dans son caractère absolu (tel un système). La finalité de la transdisciplinarité ne reste pas inscrite dans l'amélioration de connaissances et de compétences disciplinaires, à l'instar de l'interdisciplinarité qui va puiser autour d'elle pour enrichir son propre champ disciplinaire. Comme l'indique le préfixe « trans », la transdisciplinarité est une posture scientifique, épistémologique et intellectuelle qui se situe à la fois entre, à travers, et au-delà des disciplines. Ce processus d'intégration et de dépassement des disciplines a un double objectif :

- Appréhender la complexité du monde présent et à venir, envisagé dans une perspective transversale, à la fois dans l'espace et dans le temps.
- Pratiquer la transdisciplinarité permet aussi de rapprocher les thématiques abordées à l'école de la complexité du réel. Étant un passage obligé pour dépasser les conditions « simplifiantes » d'acquisition du savoir, c'est un moyen de faire rentrer l'école dans la vraie vie. C'est vrai dans de nombreux domaines, mais cela l'est tout particulièrement lorsque l'on aborde des questions « socialement vives » comme la santé, le climat, l'énergie, la durabilité et, plus généralement, l'écologie humaine.

Enfin, pratiquer la transdisciplinarité, c'est organiser une relation aux savoirs qui est celle qui sous-tend la construction des savoirs modernes ; c'est donc ainsi préparer les élèves à être plus tard, au moins pour certains d'entre eux, des acteurs de l'accroissement du savoir humain.

3.3.1 Un exemple

À titre d'illustration, nous présentons l'évolution d'un enseignement actuellement dispensé dans les classes de première et de terminale du lycée général et technologique sous le nom d'*enseignement scientifique*.

Figurant dans l'enseignement commun de la réforme du lycée mise en place par le ministre Jean-Michel Blanquer en 2019, l'enseignement scientifique a pour objectif de développer chez les élèves des compétences transversales par la pratique et la réflexion scientifique.

Alliant initialement les mathématiques, la physique, la chimie, les sciences de la vie et de la Terre et l'informatique, cet enseignement s'inscrivait pleinement dans une démarche transdisciplinaire, affichant l'ambition de faire de chaque élève une personne lucide, consciente de ce qu'elle est, de ce qu'est le monde et de ce qu'est sa relation au monde.

Les contenus de cet enseignement s'articulent autour de plusieurs thèmes, énoncés ci-dessous.

En classe de première :

- Une longue histoire de la matière ;
- Le Soleil, notre source d’énergie ;
- La Terre, un astre singulier ;
- Son, musique et audition.

En classe de terminale :

- Science, climat et société ;
- Le futur des énergies ;
- Une histoire du vivant.

Le traitement de ces thèmes est au service de trois grands objectifs de formation de nature transversale, actant du caractère transdisciplinaire de l’enseignement :

- Comprendre la nature du savoir scientifique et ses modes d’élaboration ;
- Identifier et mettre en œuvre des pratiques scientifiques ;
- Identifier et comprendre les effets de la science sur les sociétés et sur l’environnement.

3.3.2 Un bilan

Cependant, le succès de cet enseignement est en fait assez mitigé et deux constats se sont imposés au terme de trois années de mise en œuvre :

- Tout d’abord, au-delà de l’objectif transdisciplinaire affiché, cet enseignement relève dans les faits d’une approche pluridisciplinaire. Il est assuré par plusieurs enseignants, chacun prenant en charge les contenus qu’il estime relever de sa discipline ;
- Par ailleurs le programme initial de cet enseignement transdisciplinaire (publié en 2019) comportait bien une partie mathématique. Mais elle était envisagée, non comme objet de savoir, mais comme outil de modélisation au service des sciences physiques, de la biologie et de la géologie : la géométrie dans l’espace apparaissait dans la description des cristaux, la trigonométrie dans la mesure du rayon de la Terre par la méthode de triangulation de Delambre et Méchain, et les probabilités dans la présentation de la loi génétique de stabilité des allèles due à Hardy et à Weinberg. Cette vision appliquée des mathématiques ne correspond ni à la formation ni aux habitudes des enseignants de cette discipline. De ce fait, seule une très faible minorité d’entre eux se sont investis dans cet enseignement transdisciplinaire. Parallèlement, beaucoup de voies se sont élevées contre la suppression des mathématiques dans la formation des élèves ne suivant pas la spécialité dédiée à cette discipline. Tout cela a abouti au rétablissement, à la rentrée 2023, d’un enseignement spécifique de mathématiques dans le tronc commun des classes de première et de terminale, et de fait, au détachement de cette discipline de l’enseignement scientifique. Les difficultés particulières de l’intégration des mathématiques dans les dispositifs scientifiques interdisciplinaires au niveau pré-bac sont analysées plus en détail dans la section 4.

3.4 Différentes modalités de mise en œuvre

Pour mettre en œuvre un dispositif alliant plusieurs disciplines, qu’il relève de l’interdisciplinarité ou de la transdisciplinarité, deux modalités coexistent, présentant chacune leurs caractéristiques propres.

3.4.1 Un seul professeur porte l'approche interdisciplinaire

C'est évidemment ce qui existe au niveau de l'école élémentaire où un seul professeur prend en charge l'enseignement de tout le programme, notamment celui de mathématiques et de sciences, qu'il relève des sciences physiques ou naturelles. Mais c'est aussi ce qui a été expérimenté par le ministère en classe de 6^e, à partir de 2006, à travers un enseignement intégré de sciences et technologie (EIST), avec l'appui de l'Académie des sciences. Mais cette expérimentation s'est malheureusement soldée par un échec et cet enseignement intégré a été abandonné, alors même que le programme de sciences et technologie du cycle 3 (CM1-CM2-6^e) est commun aux trois disciplines impliquées (physique-chimie/SVT/technologie).

3.4.2 L'intervention de plusieurs professeurs, chacun intervenant dans le cadre de sa discipline

C'était la logique des anciens *thèmes de convergence* ou *itinéraires de découverte* au collège, des anciens TPE et de l'actuel *enseignement scientifique* en première et en terminale dont les caractéristiques et l'évolution ont été abordées.

Le succès de ces dispositifs à plusieurs voix autour d'un même thème est mitigé. Quoique présents dans les préambules du programme de collège de 2007, les *thèmes de convergence* n'ont pas été enseignés et l'évolution de l'enseignement scientifique au lycée a montré que la place des mathématiques dans un enseignement scientifique transdisciplinaire pose de réelles difficultés au niveau pré-bac.

4. La place particulière des mathématiques dans les dispositifs interdisciplinaires scientifiques

L'un des griefs portés par les professeurs de mathématiques contre les dispositifs interdisciplinaires repose sur le fait que leur contribution se limite souvent à fournir des outils (la proportionnalité, les statistiques, les probabilités, les représentations graphiques, etc.), en réponse aux besoins ponctuels d'autres disciplines.

Il faut dire qu'au niveau scolaire, le rôle des mathématiques dans la modélisation de phénomènes naturels ou techniques est extrêmement limité, en raison de la faiblesse des outils de modélisation connus des élèves : jusqu'en terminale, les seules fonctions étudiées ne dépendent que d'une seule variable et le champ des équations différentielles est réduit à celles du type $y' = ay$. Cet aspect limitatif est beaucoup moins prégnant au niveau des classes préparatoires, ce qui est sans doute l'une des explications du succès des TIPE, contrairement à tous les dispositifs interdisciplinaires expérimentés, puis modifiés ou abandonnés au niveau pré-bac. La réussite de l'interdisciplinarité suppose en effet un équilibre entre les contributions des différentes disciplines impliquées. Et l'intérêt de la contribution des mathématiques repose en grande partie sur leur capacité à modéliser le réel, à condition toutefois que les élèves disposent des outils permettant de le faire.

Il importe aussi d'insister sur le fait que l'utilisation, par une discipline « extérieure », d'une notion intrinsèquement liée à une autre discipline ne permet pas, en général, d'aborder tous les contours de son champ conceptuel.

L'apprentissage d'une notion mathématique à travers une situation interdisciplinaire peut engendrer, chez certains élèves, la difficulté de se détacher du contexte spécifique à la situation étudiée, et donc de ne pas accéder à la généralité de la notion sous-jacente, indépendante du contexte qui a permis de l'aborder. Or la décontextualisation (abstraction du contexte source) est indispensable à l'assimilation d'une notion ou d'un concept et cette assimilation est elle-même nécessaire au transfert de connaissances dans une situation cible autre que la situation source.

À titre d'exemple, si le concept de la proportionnalité peut être mis en pratique dans une activité interdisciplinaire associant aux mathématiques la physique (à travers la notion de vitesse) ou la géographie (à travers la notion d'échelle de carte), sa bonne assimilation suppose une phase de décontextualisation, afin de mettre en évidence :

- L'ensemble des invariants sur lesquels repose l'opérationnalité du concept (passage à l'unité, propriétés de linéarité, coefficient de proportionnalité) ;
- L'ensemble des formes langagières et non langagières qui permettent de représenter symboliquement le concept (les tableaux de proportionnalité, la règle de trois, les fonctions linéaires et leur représentation graphique).

Cet aspect de « décontextualisation-recontextualisation » est rarement pris en compte dans les dispositifs interdisciplinaires, souvent par faute de temps, la réalisation d'un projet laissant en général peu de place pour les questions se détachant de son contexte.

5. La pédagogie de projet au cœur des dispositifs interdisciplinaires

Traditionnellement, les savoirs scolaires disciplinaires ont plutôt un caractère désintéressé, gratuit, au sens où ils ne débouchent pas sur des réalités principalement concrètes ou professionnelles. Ce savoir a même fait l'objet d'une décontextualisation pour apparaître selon une validité intrinsèque, habillé plutôt d'universalité. Ainsi, être élève, c'est maîtriser des apprentissages, dont la maîtrise est attestée par des évaluations, mais dont l'utilité est rarement perçue comme immédiate.

Les savoirs disciplinaires sont souvent détachés du réel et les activités scolaires, même si elles s'appuient sur des mises en scène inspirées de la vie ordinaire, paraissent artificielles. Pour beaucoup d'élèves, le temps scolaire se déroule sans projet précis, uniquement scandé par les évaluations (contrôles et examens).

En regard de ces caractéristiques de la forme scolaire du second degré, la pratique se présente différemment dans le cas des dispositifs interdisciplinaires. Les savoirs disciplinaires ne sont pas vus comme des savoirs réclamés par l'école, mais requis par la réalisation d'un projet concret. Le sens donné au savoir ne se construit pas uniquement dans une logique d'évaluation, il tient à l'activité que les élèves accomplissent collectivement en vue de la réalisation d'un projet. Cette démarche repose donc sur un rapport au savoir de type pragmatique, supposé donner du sens aux savoirs scolaires.

Dès lors, les savoirs disciplinaires en cours s'actualisent dans le projet. Les acquisitions ne sont plus « gratuites » et coupées de la vie réelle, mais justifiées par le dispositif qui légitime alors les connaissances disciplinaires inscrites dans l'activité. Alors que dans leur forme traditionnelle le sens des savoirs disciplinaires s'élabore sur des

considérations abstraites, selon des entités générales et lointaines, il se construit ici selon une finalité proche et dans un contexte concret.

Par ailleurs, l'activité des élèves s'inscrit très généralement dans une démarche de projet, qui englobe l'ensemble des actions ayant pour objectif de répondre à des besoins clairement exprimés. Depuis l'idée de base, ou l'expression des besoins, jusqu'à la livraison finale du produit, la démarche de projet va définir un ensemble d'étapes qui vont structurer le déroulement de l'activité. Cette structuration va permettre à l'ensemble des membres de l'équipe de savoir dans quelle direction aller et d'adopter une démarche cohérente pendant toute la durée du projet, allant de la définition d'objectifs précis jusqu'à celle des actions à entreprendre et des ressources à utiliser. La démarche de projet est généralement décomposée en quatre étapes successives : la définition des objectifs, la conception, la réalisation et l'évaluation du projet.

Au-delà des compétences scientifiques nécessaires à la conduite du projet, la démarche de projet permet aussi de développer des aptitudes plus générales relevant de la collaboration, de la communication, de l'organisation, de la gestion du temps, de l'adaptabilité ou de l'inventivité.

La pédagogie de projet a également des incidences sur la nature des relations entre l'enseignant et ses élèves, mais aussi sur les relations entre les élèves eux-mêmes.

Le climat recherché à l'école est celui qui favorise le travail (calme, silence, discipline, écoute) et qui réclame de l'enseignant vigilance et fermeté même si, depuis les années 1970, le modèle du pédagogue soucieux de s'ajuster à l'évolution des relations sociales a déplacé les relations dans un sens moins exigeant et moins dissymétrique. Mais c'est toujours autour du savoir que se noue la relation pédagogique entre un enseignant et ses élèves, ce qui justifie une dissymétrie entre eux, le maître disposant de la connaissance que l'élève n'a pas encore acquise. De même, la classe correspond encore à un groupe de jeunes qui communiquent exclusivement avec l'enseignant. La communication entre les élèves n'est pas essentiellement recherchée, elle est plutôt surveillée, contenue, voire sanctionnée pour maintenir un climat d'attention et d'écoute.

A contrario, les dispositifs interdisciplinaires et la pédagogie de projet qui leur est très souvent associée favorisent une relation moins dissymétrique entre le professeur et ses élèves et la communication entre les jeunes. La prise de parole des élèves est ici tenue pour formatrice, faisant partie de la démarche pédagogique. Le dialogue entre élèves est encouragé pour favoriser la critique, la coopération, la solidarité au sein d'un projet collectif, par opposition à la compétition qui peut être générée par le caractère individuel des évaluations. Les élèves font ainsi l'expérience d'une « collectivisation » du travail au sens où les activités sont élaborées au sein d'un groupe et reposent sur la collaboration entre les élèves, et sur un dialogue entre les élèves et leur professeur. Même s'il conserve une grande part du pouvoir d'organisation, le professeur tient compte des demandes et des idées des élèves promus responsables de la conception du projet et non plus tenus à être de simples exécutants.

Les relations convenues dans le cadre d'un enseignement traditionnel des disciplines placent l'enseignant en position magistrale, lui dont la compétence consiste à aménager la rencontre entre un esprit et un savoir. Ce mode n'est plus tout à fait à l'œuvre, notamment dans les collèges, et le cours a évolué vers une pédagogie plus active ou dialoguée. Mais ce changement est encore plus flagrant dans les dispositifs interdisciplinaires où le « magister » se met en retrait, ou plutôt de côté, pour organiser,

non pas l’exposition du savoir, mais sa découverte par l’élève ou le groupe d’élèves à travers la réalisation d’un projet.

L’enseignant adopte alors une pédagogie sensiblement constructiviste où son rôle se définit en termes « d’intermédiaire », de « passeur », de « tuteur », de « personne ressource » ou encore de « guide ». Il évite d’imposer des solutions toutes faites et préfère encadrer l’activité de ses élèves ou les guider vers d’autres sources de connaissances (livres, moteurs de recherche, etc.) et d’autres lieux que la classe (centre de documentation et d’information, salle informatique, salle audiovisuelle, etc.). Les enseignants recourent aussi à une gamme de matériels pédagogiques (échéanciers, carnets de bord, fiches d’auto-évaluation, etc.). La pluralité des lieux et des outils est tenue pour un moyen d’intéresser les élèves et de développer des compétences transversales.

Parmi ces compétences, on distingue :

- Des compétences sociales et relationnelles : travailler en groupe, diriger une équipe, prendre en compte le point de vue des autres, etc. ;
- Des compétences cognitives : comprendre les problèmes à résoudre, utiliser ses connaissances disciplinaires ;
- Des compétences organisationnelles : planifier son travail, respecter un échéancier ;
- Des compétences communicationnelles : utiliser des outils numériques, faire un rapport écrit ou une présentation orale.

Une autre caractéristique des dispositifs interdisciplinaires est qu’ils favorisent une ouverture sur l’extérieur. Sortir de l’établissement pour mener une action éducative n’est pas une démarche nouvelle, ni exclusive aux dispositifs interdisciplinaires, mais elle se voit plutôt généralisée ici, même s’il existe des dispositifs interdisciplinaires sans déplacement extérieur. Des sorties sont souvent prévues dans un calendrier spécifique et constituent un moment important parfois au sein du dispositif, donnant lieu à une préparation et à une reprise après-coup.

Plusieurs lieux de sorties peuvent être envisagés : laboratoires de recherche, sites industriels, lieux de culture scientifique. Il s’agit d’externaliser une partie de l’enseignement en concevant une action tournée vers des acteurs ou des produits en rapport avec le thème d’étude (« pour sortir de la classe vers des lieux de culture »). Plusieurs raisons légitiment ce type d’opération. Déjà, ces déplacements permettent de faire connaître aux élèves leur environnement économique, social et culturel et de lier les jeunes à leur ville, leur département ou leur région. Ensuite, cela leur permet d’entrer en contact direct avec les lieux où la science se fabrique ou s’expose, ce qui permet de contextualiser le savoir scientifique et de montrer aux élèves qu’il existe en dehors des manuels scolaires.

6. La question de l’expertise enseignante

Elle est essentielle pour la réussite d’un enseignement pluridisciplinaire et ce, pour au moins deux raisons : seuls des professeurs compétents réussissent leur enseignement et ce n’est qu’à la condition qu’ils se sentent compétents que les professeurs s’engagent dans la pratique de l’interdisciplinarité.

Or, pour enseigner efficacement l'interdisciplinarité, il faut non seulement être expert de sa propre discipline, mais au-delà, être au courant des liens qu'elle entretient avec les autres disciplines impliquées et avoir des compétences pour mener à bien une pédagogie de projet.

La mise en place d'un dispositif interdisciplinaire demande en effet aux enseignants de sortir de leur « enveloppe » disciplinaire, de se développer, au sens étymologique du terme. Cela confère une réelle noblesse intellectuelle à la pratique interdisciplinaire, mais suppose de la part des professeurs un investissement important auquel leur formation initiale, essentiellement mono-disciplinaire, ne les a pas préparés.

Pour les aider, l'institution a toujours assuré des formations (nationales ou académiques) lors de la mise en place des dispositifs (les EPI au collège en 2016, l'enseignement scientifique au lycée en 2019) et des actions à plus long terme sont menées dans les *maisons des sciences* ou au sein des instituts de recherche sur l'enseignement des mathématiques (IREM).

Cependant, le suivi de ces formations n'étant ni obligatoire ni toujours reconnu par l'institution, elles ne concernent souvent que des enseignants militants et convaincus plutôt que d'attirer ceux qui en auraient le plus besoin.

De même, de nombreuses ressources (documents d'accompagnement des programmes, fiches) sont disponibles sur le site institutionnel du ministère (*Éduscol*), mais le suivi des connexions à ce site et les visites des inspecteurs montrent que leur consultation n'atteint pas le niveau espéré.

L'instauration de licences scientifiques pluridisciplinaires (maths/physique-chimie, maths/info, physique-chimie/SVT, maths/SVT) et la prise en compte de compétences dans deux disciplines (une majeure et une mineure) dans le recrutement des enseignants du second degré, notamment au niveau du collège, pourraient pallier cette difficulté.

Elles vont cependant à l'encontre de l'identité professionnelle des enseignants français du second degré, qui reste fortement rattachée à une seule discipline.

7. La question du temps

L'un des obstacles à l'interdisciplinarité porte sur le temps d'enseignement qu'il nécessite. Il est indéniable que la mise en place de projets interdisciplinaires prend du temps, beaucoup plus que la transmission classique de connaissances.

Il importe aussi de ne pas laisser croire que seuls les projets gigantesques ont du sens : un projet interdisciplinaire très riche peut se dérouler sur quelques heures à peine s'il ne concerne qu'un chapitre de physique et un de biologie, ou encore un moment d'histoire des sciences (par exemple, la mesure du méridien terrestre par Delambre et Méchain, au programme de l'enseignement scientifique de première, ou l'étude du modèle démographique de Malthus, au programme de celui de terminale).

L'état d'esprit interdisciplinaire peut se limiter également à un effort de prise en charge de la polysémie et à une explicitation du croisement des regards.

8. Forces, faiblesses, opportunités, risques

Le tableau 1 analyse l’interdisciplinarité dans l’enseignement scolaire à travers le modèle SWOT¹. Il permet d’identifier forces, faiblesses, opportunités et risques qui entourent l’enseignement de l’interdisciplinarité dans le système éducatif français.

Tableau 1. Forces et faiblesses de l’enseignement de l’interdisciplinarité.

Forces	Faiblesses	Opportunités	Risques
Reconnaissance institutionnelle de l’interdisciplinarité Pédagogie innovante, active, collaborative, démarche de projet Compréhension, par les enseignants, des difficultés des élèves (polysémie de certains termes, variété des approches). Présence de quelques enseignants très fortement engagés et militants. Existence de ressources institutionnelles (documents d’accompagnement) Ouverture sur l’extérieur, création de partenariats (universités, centres de recherches, entreprises).	Déséquilibre entre la nature des contributions des différentes disciplines impliquées. La question du temps. Les contraintes organisationnelles (problèmes de salles, d’emploi du temps, concertation des enseignants). La formation des enseignants : formation initiale mono-disciplinaire des enseignants du secondaire, insuffisance et caractère non obligatoire de la formation continue. Au niveau pré-bac : faiblesse des connaissances mathématiques des élèves pour modéliser des phénomènes issus d’autres disciplines.	Complémentarité des disciplines (contenus, approches). Aborder la complexité du réel et faire entrer la « vraie vie » dans l’école. Développement d’une formation globale de l’élève. Renforcement de l’expertise des enseignants, y compris dans leur propre discipline. Renforcement du travail collaboratif des enseignants.	Diffusion et superficialité de savoirs aux interfaces des disciplines au détriment des connaissances de base. Instrumentalisation de certaines disciplines par d’autres. Place privilégiée accordée à la mise en activité au détriment de l’acquisition de savoirs fondamentaux.

9. Synthèse des dispositifs pédagogiques alliant plusieurs disciplines

Le tableau 2 synthétise les dispositifs interdisciplinaires ou transdisciplinaires évoqués précédemment pour les situer de manière chronologique.

¹ Acronyme des mots anglais strengths, weaknesses, opportunities et threats.

Tableau 2. Historique des initiatives concernant la mise en œuvre de l'interdisciplinarité.

Intitulé	Niveau	Horaire	Durée de vie	Thématiques
Travaux personnels encadrés (TPE).	Première et Terminale. Limitation à la classe de Première. Suppression	2h +2h 2h	Création 2000 2005 2020	Au libre choix des élèves.
Itinéraires de découverte.	5 ^e et 4 ^e	2h	Création 2002 Suppression 2004	- Nature et corps humain. - Arts et humanités. - Langues et civilisations. - Créations et techniques.
Thèmes de convergence	Collège	Aucun horaire dédié	Création 2007 Suppression 2016	- Mode de pensée statistique. - Santé. - Sécurité. - Climatologie et météorologie. - Développement durable. - Énergie.
Enseignements pratiques interdisciplinaires	5 ^e , 4 ^e , 3 ^e		Création 2016 Modification 2017 : un seul thème à traiter en 3 ^e , au choix de l'élève.	- Corps, santé, bien-être et sécurité. - Sciences, technologie et société. - Transition écologique et développement durable. - Culture et création artistiques. - Information, communication, citoyenneté. - Langues et cultures de l'Antiquité. - Langues et cultures étrangères ou régionales. - Monde économique et professionnel.
Méthodes et pratiques scientifiques	2 ^{de}	1h30	Création 2010 Suppression 2019	- Sciences et aliments. - Sciences et cosmétologie. - Sciences et investigation policière. - Sciences et œuvres d'art. - Sciences et prévention des risques.

Enseignement scientifique	Première et terminale de la voie générale	2h	Création 2019 Modification 2023 (sortie des mathématiques du dispositif commun).	En première : - Une longue histoire de la matière. - Le Soleil notre source d’énergie. - La Terre, un astre singulier. - Son, musique et audition. En terminale : - Science, climat et société. - Le futur des énergies. - Une histoire du vivant.
Travaux d’initiative personnelle encadrés	CPGE scientifiques	2h	Création 1995 Toujours en place	Thèmes changeant chaque année. Exemples : - Transformations et fonctions. - Erreurs et progrès. - Surfaces. - Information. - Prévision, prédiction. - Ressources. - Structures. - Océans. - Santé, prévention. - La ville. - Sports et jeux.

L’analyse de ce tableau appelle plusieurs commentaires :

- Les alternances politiques ont eu davantage d’effets sur les dispositifs interdisciplinaires que sur les disciplines enseignées : les ministres de l’Éducation nationale souhaitant imprimer du changement ont souvent modifié ou supprimé les dispositifs pluridisciplinaires qui leur préexistaient. C’est sans doute la preuve que l’interdisciplinarité n’a pas encore acquis une pleine légitimité au niveau de l’enseignement scolaire ;
- La durée de vie des dispositifs interdisciplinaires est d’autant plus grande qu’ils s’appliquent à un niveau élevé de la scolarité ; les dispositifs interdisciplinaires mis en place au niveau du collège (itinéraires de découvertes ou EPI) ont tous connu des échecs. La principale raison de ces échecs tient au fait que la mise en place réussie de l’interdisciplinarité suppose au départ un solide bagage dans chacune des disciplines engagées et que ce bagage minimal n’est pas acquis avant l’entrée au lycée. Il vaut donc mieux utiliser l’horaire d’enseignement à la maîtrise des fondamentaux disciplinaires au niveau de l’école élémentaire et du collège plutôt que de le « gaspiller » dans des activités soi-disant interdisciplinaires, dont la plus-value en termes d’apprentissage n’a jamais été évaluée ;

- Le seul dispositif à faire preuve d'une réelle pérennité est celui des TIPE en classes préparatoires, ce qui confirme l'analyse précédente ;
- Quelle que soit la dénomination du dispositif institué au niveau du collège ou du lycée, les sujets d'étude tournent autour de thèmes récurrents : santé, sécurité, climatologie, développement durable. Seuls les thèmes des TIPE abordent des problématiques plus variées.

10. Un exemple de transdisciplinarité réussie : les TIPE dans les classes préparatoires scientifiques

Les travaux d'initiative personnelle encadrés (TIPE) ont été instaurés dans les classes préparatoires scientifiques (MPSI-MP-PSI, PCSI-PC, PT, TSI, TPC, BCPST) en 1995 et sont toujours en vigueur à ce jour. Deux heures hebdomadaires sont inscrites à l'emploi du temps des élèves qui sont encadrés par un de leurs professeurs. Le thème au programme varie chaque année. Parmi les thèmes retenus depuis 1995, on peut citer :

- Transformations et fonctions ;
- Erreurs et progrès ;
- Surfaces ;
- Information ;
- Prévision, prédiction ;
- Ressources ;
- Optimalité, choix, contraintes, hasard ;
- Structures ;
- Océans ;
- Santé, prévention ;
- La ville ;
- Sports et jeux.

Dans le cadre de cet enseignement, chaque étudiant a un travail personnel à effectuer tout au long de l'année, au sein d'une équipe. Cette activité constitue un entraînement à la démarche scientifique ou technologique. À travers la réalisation d'un projet en lien avec le thème, le travail mené fait appel à l'intelligence de situations concrètes et prépare les élèves à la réalité du métier de chercheur ou d'ingénieur. Les élèves sont à la fois confrontés à la mise en évidence et à la formulation d'un problème, à l'observation et à l'analyse d'un phénomène ou d'un système industriel, à la recherche et à l'exploitation d'une documentation, à la conception et la réalisation d'expériences et de simulations, à l'imagination de solutions et à la justification argumentée des choix retenus ou invalidés, et au développement d'arguments qu'ils présenteront au cours d'un entretien scientifique. Toutes ces activités favorisent des compétences à la fois scientifiques et transversales parmi lesquelles on peut citer :

- L'aptitude à collecter l'information, à l'analyser et la communiquer ;
- La prise d'initiative ;
- La faculté de rapprocher plusieurs logiques, notamment par un décroisement des disciplines ;
- La capacité d'imaginer des solutions et de tester leur validité ;
- L'aptitude à collaborer avec d'autres.

Les TIPE étant en relation avec des domaines de recherche universitaire et industrielle, certaines séquences de travail peuvent s'opérer dans des sites industriels ou de recherche, sites extérieurs à l'établissement d'origine des étudiants, notamment lorsque les supports ou matériels nécessaires ne sont pas présents dans les établissements scolaires. Aux concours, le travail est évalué lors d'une épreuve orale spécifique de trente minutes, composée de deux parties :

- La présentation par le candidat de son travail de l'année, d'une durée de quinze minutes ;
- Un échange avec un binôme d'examineurs, également d'une durée de quinze minutes.

Les connaissances, outils et méthodes dont disposent les étudiants à ce niveau d'études permettent d'aborder des sujets variés autres que ceux qui alimentent les dispositifs interdisciplinaires au niveau pré-bac, lesquels tournent de façon récurrente autour du développement durable, de la santé, du climat ou de l'énergie.

Par ailleurs, les étudiants des classes préparatoires scientifiques sont capables de se former en autonomie sur des parties de cours ne figurant pas dans les programmes de leurs classes, mais qui s'avèreraient nécessaires à la conduite de leur projet d'étude (les équations aux dérivées partielles, les probabilités continues ou des éléments de physique quantique). De tels dépassements ne sont pas concevables au niveau du collège et semblent peu réalistes au niveau du lycée.

11. En guise de conclusion

On peut s'accorder sur l'intérêt global d'approches interdisciplinaires dans l'enseignement scolaire, même si l'intégration des mathématiques dans des projets scientifiques pose question au niveau du collège. Mais c'est loin d'être suffisant pour réussir leur mise en œuvre concrète et améliorer les apprentissages des élèves. Les questions suscitées par l'interdisciplinarité méritent d'être posées à tous les niveaux : au niveau de l'engagement individuel des enseignants qui doivent sortir de leur zone de confort disciplinaire, au niveau des établissements qui doivent s'organiser pour la mise en place de projets pédagogiques d'un type nouveau, et au niveau de l'institution, responsable de la formation, du recrutement et de l'accompagnement de ses personnels.

2022-2023 : Année des sciences fondamentales pour le développement durable

Michel Spiro

Président de l'Union Internationale de Physique Pure et Appliquée
Président du Comité d'organisation de l'Année Internationale des Sciences
Fondamentales pour un Développement Durable
Président du Conseil de la Fondation CERN & Société

Abstract

The title of this chapter refers to an initiative organized in 2022-2023 under the auspices of the United Nations. Focused on the links between fundamental sciences and sustainable development, it mobilized many countries and led to several international events on specific themes. It concluded with a closing ceremony at CERN at the end of 2023. A brief history presents the countries and various promoting institutions and the course of the main events concerned. After recalling the base of the ideas that motivated the initiative, three main themes are then addressed, significant due to the exchanges and recommendations they generated. The work carried out is the origin of an initiative, this time for a decade, 2024-2033, aimed at promoting the collaboration of all sciences in the development of "sustainability sciences."

1. Introduction

L'année 2022-2023 a été une « Année des Sciences Fondamentales pour le Développement Durable ». Cette année internationale avait été proclamée par l'Assemblée générale des Nations Unies dès le 2 décembre 2021, mais la survenue de l'épidémie du SRAS en avait retardé la réalisation. Placée sous l'égide de l'ONU et les auspices de l'UNESCO, elle s'est conclue le 15 décembre 2023 au CERN¹ dans le nouveau bâtiment du Portail de la Science récemment inauguré. Elle initie une Décennie Internationale des Sciences 2024-2033, également actée par l'ONU.

La résolution de 2021 avait été portée par le Honduras, avec le soutien de nombreux autres pays dont la liste est indiquée en figure 1. On peut s'étonner que les pays développés n'y figurent pas davantage. Il faut rappeler ici un état de fait : comme en témoigne l'analyse des publications, ces pays recrutent dans les pays en développement nombre de leurs scientifiques. Ces scientifiques gardent un écho dans leur pays d'origine, et ce sont ces pays qui, actuellement sont les plus porteurs pour les sciences fondamentales. Cette situation pourrait nous revenir un jour en boomerang si le statut de la science dans nos pays devait continuer à être dévalorisé.

¹ Centre Européen de Recherche Nucléaire, European Organization for Nuclear Research.



Figure 1. Liste des pays ayant soutenu la résolution portée par le Honduras devant l'Assemblée générale des Nations Unies en décembre 2021 et créant l'Année internationale des sciences fondamentales pour le développement durable.

2. Un socle d'idées

Reprenons maintenant le fond commun d'idées inspirant cette Année Internationale. Si l'on dit parfois, la curiosité est un vilain défaut, elle est en réalité l'un des traits majeurs de l'espèce humaine. Curiosité à l'égard du monde dont nous faisons partie, et de ce que nous sommes nous-mêmes. Volonté de comprendre. Mue par cette curiosité, chaque génération de scientifiques enrichit le réservoir des connaissances accumulées par les générations précédentes. Réservoir dans lequel les générations futures pourront à leur tour puiser pour leur développement.

Les sciences fondamentales semblent de moins en moins considérées au regard de l'accent porté aux questions d'économie, de société et d'environnement, alors qu'elles sont pourtant à la base de tout, comme nombre d'exemples devraient nous le rappeler constamment. La mise au point des vaccins et traitements contre le Covid-19, héritier d'une longue série de recherches fondamentales en biologie. Le Web, né au CERN pour les besoins d'une collaboration efficace entre scientifiques. Les systèmes de recherche de Google, issus d'une brillante idée mathématique. Les intelligences artificielles, fondées sur des Statistiques. Les téléphones cellulaires, remplis de résultats de recherches fondamentales en physique. Le GPS qui pour fonctionner avec la précision mobilise à la fois la Relativité Générale et la Physique Quantique (Horloges atomiques), dont les fondements datent de plus de 120 ans. La compréhension du rôle du génome humain, puis son séquençage qui ont ouvert la voie à la thérapie génique. Les IRM et les PET-scan, utilisant la physique du magnétisme et de l'antimatière. Et, en perspective, la génération et le stockage des énergies renouvelables qui dépendront des avancées en physique, chimie et sciences des matériaux, et les applications espérées de la seconde révolution quantique.

N'oublions pas non plus que la recherche fondamentale fait place au hasard des découvertes ; guidé par la curiosité, on cherche dans une direction et l'on tombe sur un phénomène inattendu. Et enfin, les sciences fondamentales, en explorant l'âme de l'univers, ré-enchantent le Monde. Pensons, mais ce n'est qu'un exemple, à l'Astronomie.

Pour conclure sur ces idées, dans ce moment déterminant pour le futur de notre planète et de notre espèce, il faut affirmer clairement que cette curiosité si féconde ne doit sous aucun prétexte être relâchée.

3. L'organisation et le déroulement de l'année

Nous avons parlé des pays. Ayant reçu le patronage de trente et un prix Nobel, cette année internationale a également mobilisé cinquante institutions ou organisations, et plus d'une centaine d'académies et de réseaux divers, toutes mentionnées et accessibles sur le site adressé figure 1². Citons ici l'UNESCO, l'ISC – International Science Council³ – le Word Science Forum⁴, le Club de Rome, l'Union interparlementaire. Au-delà de leur participation comme membres du Conseil Scientifique pour certaines d'entre elles, toutes ces organisations académies et réseaux ont été les chevilles ouvrières de tous les événements – environ cinq cents initiatives – qui ont constitué la manifestation concrète de cette année. Parmi ces événements, six sont considérés comme emblématiques : la cérémonie d'ouverture à l'UNESCO, au Vietnam la session Sciences Ethic and Human developpement, en Serbie et au Rwanda la session Basic Sciences and Sustainability, celle des sciences ouvertes au Honduras (retardée et prévue en 2024), et bien entendu la cérémonie de clôture au CERN.

4. Idées fortes et propositions avancées

4.1 Un cercle vertueux

Aussi bien lors de la cérémonie d'ouverture que lors des autres événements, notamment au Rwanda, l'attention a été portée sur la notion de cercle vertueux et la nécessité de sa promotion : cercle vertueux passant par l'éducation, la formation des chercheurs, les découvertes des sciences fondamentales, la réalisation d'applications en direction du développement durable, cercle vertueux se réalimentant du nouvel état du monde et des connaissances qu'il a créées. L'attention a parallèlement été portée sur la nécessité que ce cercle vertueux soit autant que possible ouvert : d'une façon générale ouvert à la société, au « grand public », ouvert plus concrètement quant à la disponibilité des données, des publications, ouvertes à la dynamique de l'innovation. Le fonctionnement de ce cercle vertueux, la capacité à produire ses fruits requiert la

² <https://www.iybssd2022.org/en/home>

³ résultant de la fusion en 2018, notons-le, du Conseil International pour la Science et du Conseil international des sciences sociales.

⁴ "A Forum on the social and economic relevance, influence and responsibilities of Science" ou encore "A Forum to find authentic responses to global challenges" peut-on lire sur son site.

mobilisation des chercheurs et des enseignants, mais aussi des entrepreneurs, des associations, des communautés publiques, en fait de la société dans son ensemble. Il s'agit que tous puissent partager cette vision du chemin vers le développement durable. Et conscience a été prise que cela demandera du temps, et qu'une décennie entière sera probablement nécessaire.

4.2 Science, éthique et développement durable

Au Vietnam, Sciences Ethic and Human Developpement, on a d'abord rappelé le fait que les connaissances scientifiques, les innovations qui en découlent, et particulièrement en ce moment les technologies numériques, façonnent nos vies, font naître espoirs et craintes, ont un impact universel. Cela pose la question de la responsabilité des scientifiques, dont ils doivent prendre conscience, en rapport avec leur liberté, elle aussi nécessaire. Un équilibre doit être trouvé.

Nous sommes dans une transition, nous ne pouvons plus continuer comme avant, nos manières de considérer notre activité, à nous scientifiques, doivent évoluer. Chaque scientifique doit être responsable dans ses recherches, c.-à-d. s'interroger sur l'impact de son travail : peut-il rendre le monde meilleur et non pas pire. Pour répéter, ce qu'on demande donc aux scientifiques, c'est se soucier de ces impacts, à la fois dans leur manière de travailler et aussi dans les conséquences possibles de leurs recherches. Force est de constater que ce n'est pas encore toujours le cas.

Cette responsabilité doit pouvoir cependant s'exercer dans la liberté : liberté bien sûr de pouvoir travailler avec les financements nécessaires, liberté de collaborer avec les scientifiques avec lesquels ils pensent pouvoir progresser le plus efficacement dans leur recherche, ce en dépit des différences qu'il peut y avoir entre les différents pays et régimes politiques, et en dépit des conflits. Il est nécessaire de garantir aux scientifiques cette liberté de collaborer.

C'est une espèce d'équilibre, entre la responsabilité des scientifiques et leur liberté, qu'il faut construire. Équilibre nécessaire pour assurer que la société ait confiance dans ces scientifiques et les connaissances qu'ils apportent. Dans cet esprit, il nous paraît essentiel que dans les études doctorales soit inclus en priorité pour tous, un enseignement spécifique sur l'éthique, l'intégrité, et la durabilité.

L'APS, l'American Physical Society, a contribué à l'Année Internationale en s'appuyant sur plusieurs sociétés de physique pour émettre un jugement ou plutôt des recommandations sur les politiques de recherche. Celles-ci doivent promouvoir l'intégrité et la transparence. Elle a mis le doigt sur des questions difficiles car d'un côté il faut que la science soit ouverte pour permettre d'affronter les défis existants et à venir, et d'un autre côté il faut respecter la propriété intellectuelle. Cela peut paraître contradictoire, il faut trouver une manière de concilier les deux. Autre recommandation, il faut aussi favoriser la réciprocité, la confiance entre et envers les scientifiques et envers leurs institutions. D'où un appel aux gouvernements pour qu'ils promeuvent une politique nouvelle favorisant les collaborations. En l'occurrence, notamment, une politique de visas s'inspirant des visas diplomatiques : des visas scientifiques pour se rendre dans des conférences ou pour travailler ensemble. Il faut assurer que les conflits actuels n'empêchent pas, ne créent pas trop de barrières à des collaborations multinationales, notamment pour les jeunes chercheurs de toutes disciplines.

Ces conditions étant réunies, il est nécessaire que les scientifiques soient écoutés à tous les niveaux de décisions, qu'ils puissent inspirer de cette manière les gouvernants et l'ensemble de la société.

4.3 Comment atteindre la durabilité

La conférence qui a eu lieu à Belgrade, en Serbie, s'est focalisée sur les approches scientifiques, organisationnelles, sociétales nécessaires pour affronter les problèmes de durabilité.

Le premier point concerne l'enseignement dans les STEM (Sciences, Technologies, Ingénierie et Mathématiques). La conférence a souligné la nécessité d'y adjoindre la composante soutenabilité. Et dans cette perspective, a été avancée l'idée que ces sciences de la soutenabilité doivent être co-construites, à travers de multiples interactions au sein de la collectivité : il faut faire en sorte que les scientifiques puissent travailler aussi bien avec le secteur public qu'avec le secteur privé, et plus largement avec toute la société, et tout ceci de manière ouverte, sans laisser de côté les connaissances traditionnelles.

Les sciences de la durabilité comprennent de très fondamentales. Pensons aux recherches sur l'histoire passée, l'évolution et le fonctionnement des planètes, celles concernant le système Terre et les interactions qui le traversent en s'étendant pratiquement à la terre entière. De fait, les 17 objectifs de développement durable qui ont été définis sont tous connectés avec le futur de notre planète. Et en toile de fond de ces objectifs, figure la réduction de la pauvreté, l'amélioration du bien-être de tous, une justice mondiale et une planète vivante et en bonne santé.

À titre d'exemple concret, une application des sciences de la durabilité serait de progresser vers une économie circulaire alimentée par une énergie décarbonnée, en mobilisant énormément d'innovations et de nouvelles pratiques d'investissement. Mais ces sciences sont très fragmentées, à la fois thématiquement, géographiquement et institutionnellement. Pour arriver à impulser et organiser une dynamique au niveau mondial, peut-être faudrait-il s'inspirer des modèles de big-sciences, tel que le CERN. Et aussi d'autres modèles tel celui du GIEC et de son équivalent pour la biodiversité, où interviennent scientifiques et gouvernants. C'est à ce moment de la réflexion que s'est concrétisée l'idée qu'une décennie d'action serait nécessaire.

5. Et maintenant, une décennie internationale

C'est ainsi que, grâce au Président de l'assemblée générale des Nations Unies, a pu s'ouvrir en mai 2023 une session spéciale, suite à laquelle a été proclamée, le 25 août de la même année, la déclaration d'une Décennie Internationale des Sciences pour le Développement Durable. L'initiative a été portée par la Serbie avec le soutien, dès le départ, de l'Argentine, de la Guinée équatoriale, du Guatemala, du Honduras, de la Hongrie, de l'Afrique du Sud, de l'Espagne et du Vietnam.

Les buts de cette décennie s'enracinent dans ce qui a été dit lors de la conférence de Serbie : les sciences fondamentales, bien qu'essentiels, ne suffisent pas. Il faut embarquer toutes les sciences, fondamentales et appliquées, sociales et humaines. Et

aussi les connaissances traditionnelles et indigènes. Il faut répéter : l'objectif est une société équitable, une économie circulaire alimentée par une énergie décarbonée. Les sciences de la durabilité montent en puissance, mais elles sont, comme déjà souligné, à l'heure actuelle très fragmentées. Nécessité est d'éduquer. D'abord de promouvoir un enseignement sur la durabilité. Puis de mobiliser, transformer la manière de faire de la recherche en créant des structures transdisciplinaires, orientées vers la durabilité. Structures à même d'interconnecter sur des sujets concrets scientifiques et organisations non gouvernementales, entreprises publiques et privées, placées dans des villages, des communautés urbaines, voire des régions ou même des pays, selon l'échelle des problèmes à résoudre. Les interconnecter comme l'ont été au niveau mondial les laboratoires concernés par les recherches sur le boson de Higgs (la World Wide Grid). Les formes institutionnelles ou organisationnelles de telles structures peuvent être diverses : structures d'enseignement, de formation, unités mixtes comme le CNRS a su en créer en regroupant les acteurs concernés, structures bâties autour de projets. Il s'agit de faire émerger une organisation en toile d'araignée, avec un centre jouant un rôle de pilote, pour assurer la validité des données, les intégrer, essayer de mutualiser les modélisations. Il faudra probablement aussi mettre en place une organisation internationale destinée à suivre, impulser et coordonner ces efforts au niveau mondial. Et il nous faut, dans ces actions autour de la durabilité, retrouver l'esprit de collaboration sans frontière qui a présidé à la création du CERN après la Deuxième Guerre mondiale.

6. En conclusion, Yes we can, Yes we must

Cette perspective peut paraître un peu ou même très optimiste. Mais la durabilité pose des défis mondiaux. Pour les affronter, nous avons besoin d'approches très diverses, multi-échelles et inclusives : depuis des thématiques très fines jusqu'à des approches systémiques, depuis des thématiques locales jusqu'à celles qui exigent un point de vue mondial, depuis des projets à court terme jusqu'à une projection sur le long terme, approches ouvertes mobilisant la société dans son ensemble.

Par certains côtés, ces grands défis peuvent nous paraître insurmontables. Le changement climatique, la perte de la biodiversité, la paix aussi et donc la collaboration entre les hommes qui est en danger. Mais, on l'espère, c'est dans l'approche des catastrophes que les réactions émergent, c'est peut-être une opportunité énorme, unique, de pouvoir œuvrer ensemble et construire un monde meilleur.

Bien sûr, en parallèle, il faut accompagner cette mobilisation internationale par des règles qui puissent organiser les transformations souhaitées, en les établissant sur la base d'un dialogue entre tous les partenaires à prendre en compte. En dépit de la conjoncture actuelle, il faut garder cet optimisme.

Épilogue

Il n'est pas facile de relier entre elles les quatre parties de l'ouvrage. Lorsqu'on pose la question à une Intelligence artificielle, il en ressort des expressions clés comme crises majeures, rôle de la science, complexité des systèmes, imprévisibilité.

Il nous a semblé que c'était une bonne approche : le point commun sous-jacent réside dans la prévisibilité *versus* l'imprévisibilité d'événements ou de situations, la nécessité de les anticiper et de rechercher les moyens d'y faire face.

Une position sous-tendant tous les chapitres de l'ouvrage est l'affirmation du rôle majeur des sciences pour garantir la continuité de notre vie sur Terre dans des conditions acceptables par tous. Ce rôle se décline de différentes manières : leurs apports à la compréhension du monde qui nous entoure, à la capacité de prévoir l'avenir et les moyens d'action qu'elles proposent pour prévenir les risques et réparer les dommages que l'on n'a pas pu éviter. Comme le souligne Michel Spiro dans le dernier chapitre, comprendre fait partie de la quête humaine, et nous ne saurions sans perte y renoncer. Mais c'est sur les autres rôles des sciences, directement liées à notre survie, que nous voulons ici revenir. Alors qu'une idée qui a longtemps prévalu associait les sciences aux progrès, les mots qui vont nous servir ici, *prévoir*, puis *prévenir et réparer*, suggèrent un contexte de menaces et de dangers, qui semble être celui de l'époque où nous vivons. Ils sont en phase avec la notion de *durabilité*.

Prévoir

Prévoir, selon l'Académie Française c'est concevoir, envisager à l'avance, annoncer, ou encore décider à l'avance de précautions, de mesures permettant d'assurer le bon déroulement d'une entreprise. On retrouve dans ces définitions deux thèmes récurrents de nos chapitres « Reconnaître la possibilité, voire le caractère certain, de la survenue d'un certain événement » et « Tirer les conséquences de cette reconnaissance ». Dans ces définitions, l'imprévisible est « ce qui n'est pas prévisible ». Mais on peut aussi inverser les choses, en soutenant que c'est l'imprévisibilité qui est première : la « chaotique incertitude de l'avenir »¹, laquelle serait, *par définition* selon Hannah Arendt, *un océan d'incertitude*.

¹ Hannah Arendt, *La condition de l'Homme moderne*, Calman-Lévy, pp. 302-303.

L'usage courant de « prévisible » ou de son contraire donne cependant à ces termes des significations beaucoup plus ambiguës. Lorsque quelqu'un dit rétrospectivement « c'était prévisible » il affirme en fait que c'était fatal, que cela ne pouvait qu'arriver. Par ailleurs, « prévisible » sous-tend une échelle de temps : une éruption volcanique, par exemple pourrait être prévue 48 heures à l'avance. Ce qui demeure imprévisible en revanche, c'est la date à laquelle se produira cette éruption, pour des raisons intrinsèques à la complexité des processus magmatiques empêchant toute prévision à long terme.

Sciences et Prévision. Le désir de connaître l'avenir est ancré dans notre Humanité ; il a été l'un des moteurs de l'essor des sciences. Ainsi la science du climat a permis de certifier cet inconcevable, le réchauffement climatique causé par l'homme. De même, la science du fonctionnement à court terme de l'atmosphère – la météorologie – permet-elle actuellement de prévoir le temps qu'il fera jusqu'à une échéance d'une quinzaine de jours environ. Mais ce lien entre science et prévision est complexe.

Comprendre ne suffit pas pour prévoir. Encore faut-il, et la météorologie en est un exemple typique, disposer des moyens d'observation et de calcul permettant de convertir la compréhension, *i.e.* la connaissance des mécanismes en œuvre, en prévisions.

Comprendre peut conclure à l'impossibilité de prévoir. C'est le chaos déterministe, manifestant l'extrême sensibilité de la trajectoire future aux incertitudes irréductibles de la connaissance de l'état présent.

Enfin prévoir n'implique pas nécessairement de comprendre. Cela a toujours été le cas. L'humanité accumule, avec l'expérience et la mémoire, la connaissance « empirique » de corrélations qui, sans en comprendre le « pourquoi », lui permettent de pressentir ce qui va se passer à partir de différents indices observés. Cette capacité s'est trouvée renforcée par une science particulière, la statistique, parfois très efficace en dépit du fait que « corrélation ne soit pas raison ». Puis est venue l'Intelligence artificielle, et sa version connexionniste associées aux grands modèles de langages. Cette science², branche avancée des sciences informatiques, nous apporte – peut-être – une révolution. Les outils qu'elle propose ont pu être considérés dans un premier temps comme une extension des outils statistiques, capable d'embrasser par de nouvelles méthodes, et de façon instantanée d'énormes ensembles de données de tous types, et d'en proposer directement des conclusions. Avec ces outils, l'homme délègue à des machines l'analyse elle-même des données collectées et les prévisions qu'il pourrait en déduire. Mais, comme en discute notamment Thibaut Giraud dans son livre³, on peut s'interroger s'il ne délègue pas davantage. S'il ne délègue pas une forme d'effort de compréhension des mécanismes en œuvre. Quoi qu'il en soit, ce n'est pas sans importance qu'un article d'un journal ait pu relever récemment, justement en météorologie, une espèce de concurrence entre des prévisions basées sur des modèles physiques et celles proposées par des Intelligences artificielles. Et il est quasiment certain que l'on verra de plus en plus, dans l'avenir et dans plusieurs disciplines scientifiques, la mise en œuvre de coopérations entre les deux approches.

² Ce qualificatif peut être discuté. Certains la considèrent comme une technologie ayant pour but de créer des machines intelligentes. Pour d'autres elle est une science à la recherche de théories et de modèles mathématiques qui, convertis en algorithmes, imitent l'Intelligence Humaine. Ce débat, qui peut paraître superflu, est cependant loin d'être neutre au regard des conceptions philosophiques de l'être humain.

³ La parole aux machines Philosophie des grands modèles de langages. Grasset 2025, 480 pages.

Maintenant, abordons les rapports entre notre capacité de prévision et les crises dont il est question dans cet ouvrage.

Prenons d'abord le changement climatique. Celui-ci était-il prévisible ? Poser cette question n'a guère de sens si on ne la contextualise pas. Plus précisément donc, dans une perspective historique et pour les sociétés ayant engagé un devenir industriel, à quelle époque un tel changement était-il devenu *concevable* ? À quelle époque ces sociétés ont-elles eu les connaissances théoriques et les moyens de mesure nécessaires pour étudier puis quantifier cette éventualité ? À quelle époque ont-elles réellement fait ces investigations et se sont-elles montrées capables d'en accepter les conclusions ?

L'Humanité a subi plusieurs variations climatiques, mais elle n'avait avant l'ère industrielle aucune expérience d'un réchauffement climatique causé par l'Homme, et donc guère la possibilité d'en envisager l'éventualité. C'est à la fin du XVIII^e siècle puis au XIX^e siècle, périodes où les applications techniques des sciences accompagnent puissamment l'essor industriel, qu'émergent les premières références à un lien entre la température du globe terrestre et la composition de l'atmosphère⁴. Plusieurs noms dans le champ des sciences de la chaleur, jalonnent cette prise de conscience⁵ : Joseph Fourier (1824), Eunice Newton Foote (1857) qui met en évidence l'effet particulier du CO₂ sur la rétention de la chaleur, John Tyndall (1861) parlant de possibles effets sur le climat d'une modification de la composition (H₂O, CO₂) de l'atmosphère. En 1896 Arrhenius évoque explicitement un lien entre exploitation du charbon, quantité de CO₂ dans l'atmosphère et températures.

Un réchauffement sous l'effet du développement industriel était donc, au début du XX^e siècle, devenu concevable. Mais sa survenue ne pouvait pas être vraiment établie ou infirmée, il manquait un minimum de mesures, permettant de confirmer les espoirs⁶ ou les craintes des scientifiques du siècle précédent. Les premières mesures publiées faisant le lien entre une augmentation observée (depuis le début de l'ère industrielle jusqu'alors) du taux de CO₂ et celle des températures, sont apparues en 1938, avec G.S. Callendar⁷. Mais considérons ici que le *caractère prévisible* d'un réchauffement climatique se poursuivant dans l'avenir sur plusieurs décennies était définitivement

⁴ Ce lien prend sa racine dans le *bilan radiatif*, bilan des échanges d'énergie entre l'Espace et la Terre, dont les différents termes sont bien connus et mesurés quant à leurs longueurs d'ondes et leur intensité : le flux d'entrée est celui du rayonnement solaire, avec ses composantes infrarouge, visible et ultraviolet. Le flux réémis vers l'Espace est essentiellement dans la gamme des longueurs d'onde infrarouges pour lesquelles l'atmosphère est transparente. Très schématiquement, si le flux d'entrée, ainsi que les conditions régnant à la surface terrestre et dans l'atmosphère restaient constantes, le bilan énergétique serait à l'équilibre, les énergies entrantes et sortantes ne différant que par leur entropie ; cette différence, ainsi que la température du globe, resteraient fixées par les lois de la thermodynamique sur des valeurs déterminées par les propriétés de la surface et de l'atmosphère. Mais l'augmentation de quantité de gaz à effet de serre augmente la quantité d'énergie absorbée par l'atmosphère et transformée en chaleur – le *net absorbed* : la température monte. Le bilan reste en léger déséquilibre tant que les quantités de gaz augmentent, et le retour à un nouvel équilibre – si l'on cessait d'accumuler du CO₂ et autres gaz – prendrait de toute façon un certain temps.

⁵ Cf. par exemple l'article « Effet de Serre » de Wikipédia.

⁶ Un réchauffement n'étant pas alors vu comme une évolution nécessairement négative pour l'humanité, voire potentiellement bénéfique.

⁷ G.S. Callendar, The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. Quaterly Journal of the Royal Meteorological Society. April 1938 pp 223-240. L'auteur estime la quantité de CO₂ libéré dans l'atmosphère sur une durée d'un demi-siècle, en déduit une hausse des températures moyennes annuelles dans la même période, et compare cette hausse calculée aux estimations obtenues par des observations directes sur des stations météorologiques.

établi à la fin des années 1960, avec les travaux de Charles David Keeling et la mise en place en 1958 des mesures continues de concentration du dioxyde de carbone à l'observatoire de Mauna Loa à Hawaï. Dès cette époque donc, les sociétés industrielles disposaient des connaissances théoriques et des mesures leur permettant de prévoir les conséquences sur le climat du développement économique si ce dernier se poursuivait au même rythme et dans les mêmes conditions. On commence alors, au niveau des instances gouvernementales et onusiennes, à se préoccuper des interactions entre développement économique et environnement. La question spécifique du réchauffement n'était cependant pas encore en première place⁸. Elle n'est apparue, pour ainsi dire « au vu de tous », qu'à la fin des années 1980, avec le témoignage de James Hansen, Directeur d'un département de la NASA, devant le Sénat américain en 1988. Témoignage dans lequel il affirme qu'« à 99 % le réchauffement climatique n'était pas une variation naturelle, mais le résultat du CO₂ et d'autres gaz artificiels dans l'atmosphère »⁹.

Pour résumer, la notion d'un réchauffement climatique causé par l'homme était, à la fin du XIX^e siècle, devenue *concevable*. Dans les années 1970, les conditions de sa prévisibilité étaient réunies, dans les années 1990 il était tout simplement attesté.

Prenons maintenant la pandémie de Covid, ou encore la survenue de certaines crises financières dont nous a parlé Jean-Philippe Bouchaud. La différence avec le changement climatique, tel qu'il s'effectue actuellement, est qu'il ne s'agit plus de la modification progressive d'une situation, mais d'un processus rapide initié/enclenché par une cause minuscule et difficile à identifier. Processus affectant ici un groupe d'humains, mais un peu comparable, à une autre échelle, à l'apparition d'un dysfonctionnement au niveau d'une cellule, puis à la progression rapide d'une maladie affectant un organe d'un individu. L'humanité ayant fait maintes fois l'expérience des grandes épidémies, comme des tremblements de terre ou des guerres, la mémoire collective devrait d'emblée nous rendre concevable la récurrence de tels évènements, sauf que parfois l'ampleur de leurs conséquences nous les font dire *inconcevables*. L'histoire des pandémies des XX^e et XXI^e siècles, les alertes récentes sur les manifestations de plusieurs virus, et les mises en garde qu'elles ont entraînées de la part des spécialistes ont été bien décrites dans la première partie. Elles nous enseignent que sur la durée d'une vie humaine surviennent de façon quasi-certaine des amorces de possibles pandémies, l'imprévisibilité résidant dans la date, le lieu, et le caractère plus ou moins contagieux et létal des souches concernées.

En lien avec la troisième partie, considérons enfin les prévisions concernant la *disponibilité de différentes sources d'énergie primaire*. Certaines prévisions formulées par le « Club de Rome » en 1972 ont pu paraître exagérément pessimistes. Il n'empêche que les dates auxquelles ont été, seront ou seraient atteintes les limites des disponibilités annuelles de ressources comme le pétrole où le gaz sont des questions récurrentes¹⁰. Concernant le nucléaire, les technologies courantes de production sont basées sur « l'enrichissement » du minerai d'uranium naturel afin de porter la proportion de l'isotope fissile U²³⁵ au niveau nécessaire pour son exploitation dans les

⁸ Une des préoccupations était alors celle du trou d'ozone dans l'Antarctique.

⁹ Robert Salais, *Le piège climatique*, Ed. Septentrion, pages 49 et suivantes.

¹⁰ Cf. par exemple sur la question du « pic pétrolier » : Michel Lepetit, *Pic pétrolier mondial et miracle du Pétrole de Schiste*, Energie et Société, Annales des Mines. N° 111, juillet 2023. L'auteur estimant que le pic total est atteint en 2018.

réacteurs (3-4 %) ¹¹. La table ronde (chapitre 11) souligne ce très faible taux d'utilisation d'une ressource : ce taux peut être vu comme un énorme gaspillage ayant comme conséquence, pour ces techniques, un avenir limité ¹².

La définition même de ce que peut être une limite est en fait problématique. Mais, plus profondément, il y a la difficulté de concevoir et d'admettre l'existence de telles limites ¹³. L'humanité n'en a pas jusqu'à présent fait l'expérience – au moins à grande échelle –, les ressources en énergie et en matières premières peuvent paraître inépuisables, les capacités techniques humaines illimitées, n'avons-nous pas le Système solaire à notre disposition ? L'idée que défendent alors certains est que, même si une limite de la disponibilité d'une ressource déterminée peut être prédite dans les conditions sociales et techniques du moment, cette limite doit être vue comme provisoire : l'humanité, disent-ils, saura mettre en œuvre les moyens de la dépasser et le fera effectivement. Mais, pour leur répondre, sommes-nous assurés qu'il en sera ainsi ?

Prévenir et réparer

Prévenir. Ici encore l'Académie Française en donne plusieurs sens, mais dans notre contexte, retenons « empêcher la survenue d'un événement fâcheux » avec pour exemple « prévenir une catastrophe ». Bien sûr, pour prévenir une catastrophe, il faut au moins qu'elle soit concevable, sinon « prévisible à moins que... » : prévoir est nécessaire pour que les événements prévus n'arrivent point. Ce paradoxe est au cœur du livre de Jean-Pierre Dupuy « Pour un catastrophisme éclairé » ¹⁴ et a été maintes fois discuté ¹⁵. L'idée est qu'il ne faut pas tenir le malheur comme certains ¹⁶, mais « qu'il faut plutôt le nuancer pour donner aux gens la capacité, l'intelligence, l'énergie de faire en sorte que la situation s'améliore ».

L'histoire récente montre cependant que ce principe n'est pas facile à mettre en place et à maintenir. Prévenir le changement climatique est une expression inadaptée, puisqu'il a déjà commencé et va se poursuivre. Prévenir la catastrophe qui serait de dépasser 4 degrés Celsius, c'est-à-dire prendre et tenir les mesures pour que cela n'arrive pas, a en revanche tout son sens : faire prendre aux sociétés l'une des directions

¹¹ Dans le minerai d'uranium naturel non enrichi, la proportion de l'uranium 235 n'est que de 0,7% le reste étant en quasi-totalité constitué d'uranium 238. Cf. note suivante.

¹² Pour éviter le gaspillage et repousser les échéances, il faut pouvoir exploiter la totalité de l'uranium naturel, et donc les 99,3% d'uranium 238 (l'uranium non fissile mais « fertile »). Cela peut être fait par la technologie dite des « neutrons rapides » (réacteurs de 4^e génération) qui ferait passer les échéances de quelques centaines à quelques milliers d'années.

¹³ Et d'une culture à l'autre, les différences sur ce point peuvent être grandes. Ainsi un commentateur a-t-il pu analyser récemment les positions actuelles du gouvernement des Etats-Unis (Drill Baby, drill) comme étant le reflet de l'expérience de la conquête par un petit groupe humain, d'un territoire immense, aux ressources vues au départ comme infinies.

¹⁴ Editions du Seuil, 2004.

¹⁵ Et aussi son contraire, celui des prophéties auto-réalisatrices, des événements qui n'auraient pas eu lieu s'ils n'avaient pas été prévus !

¹⁶ Comme le font les collapsologues, auxquels Jean-Pierre Dupuy s'oppose tout en les comprenant, car il considère effectivement l'effondrement comme possible. Interview de Jean-Pierre Dupuy sur France Inter le 31 janvier 2020.

pour que cela n'arrive pas, et *en garder le cap*. Mais on observe dans les faits une alternance entre différentes phases : des phases de saturation médiatique, dans lesquelles ces questions sont mises en rapport avec les événements météorologiques du moment, dans un discours à tendance alarmiste (« ces événements seront de plus en plus fréquents et violents ») ; des phases d'oubli où ces questions passent au second plan voire disparaissent des discours politiques, ou des préoccupations économiques comme le rappelle Pierre Lenders dans la quatrième partie ; voire, de façon plus ou moins souterraine, des phases de déni. Il s'agit de cycles contraints par des événements externes (économiques, sociaux...), mais également par de purs mécanismes « physiques » de dynamiques d'opinion. De telles oscillations viennent entraver le cap qu'il faudrait maintenir. Et la catastrophe non prévue arrive peut-être à grands pas.

Prévenir l'apparition d'une épidémie. L'expression peut paraître curieuse, car en tant qu'événement particulier qu'on ne peut prévoir, il est difficile de l'empêcher. Mais *prévenir les dommages de l'épidémie de grippe annoncée*, par exemple au moyen d'une vaccination massive, est au contraire très compréhensible. Comme l'est également le fait de *prévenir* (ou chercher à prévenir) *les dommages d'épidémies futures, causées par des pathogènes déjà connus, voire inconnus*. Si nous nous attardons sur ces nuances, c'est pour rappeler de réels problèmes : ces divers objectifs de prévention, évidemment indispensables, ne sont pas eux non plus aisés à mettre en œuvre dans la pratique des pouvoirs publics et des comportements sociaux. Rappelons par exemple les discussions lors de la grippe A/H1N1 en 2009-2010, moment où les pouvoirs publics ont pu être critiqués pour avoir suivi un principe de précaution (commandes de vaccins et initiation d'une campagne de vaccination) peut-être surdimensionné, alors que cette épidémie s'est finalement révélée très bénigne ; ou encore le non-renouvellement partiel du stock de masques respiratoires, sanctionné par l'émergence soudaine du Sars Cov-2. À l'origine de ces polémiques se trouve la difficile mise en rapport de la nécessité, du coût et de l'acceptation sociale de mesures de prévention, avec les probabilités d'occurrence et de gravité des événements concernés. C'est un des mérites des deux premiers chapitres – Patrick Berche et Bruno Canard – de nous rappeler que dans le domaine des pandémies virales, nous ne sommes plus autorisés à nous excuser par un « qui aurait prévu... ». Il faut tout faire pour se donner *les moyens d'être prêts*. C'est-à-dire, pour résumer à nouveau sous forme de paradoxe, se donner les moyens de prévenir les dommages d'événements concevables, mais dont la date exacte reste largement imprévisible.

Réparer. « Remettre en l'état ce qui a été endommagé, ce qui s'est détérioré ». Concernant les pandémies, on pense bien entendu à la santé des individus, qui doit être rétablie. Mais les dommages concernent également la société. En effet on a observé au moment de la Covid, que le système de santé, le système éducatif, le système productif et les relations sociales pouvaient être gravement affectées. Tous ces systèmes sont liés les uns aux autres, comme le rappelle Daniel Krob dans un chapitre consacré à la modélisation de leur interdépendance face à une épidémie. Et donc la réparation doit les cibler conjointement. En ce qui concerne maintenant de la crise climatique, le terme de réparation peut sembler inapproprié, tant les changements en jeu une fois attestés semblent irréversibles ; il faut alors plutôt parler d'*adaptation*. Il le reste en revanche à propos de la biodiversité, dont on a maintes fois dit qu'elle pouvait se régénérer rapidement dès lors que l'on comprend les mécanismes qui la contrôlent (cf. dans cet

ouvrage le chapitre d'Eric Bapteste, cf. aussi les ouvrages¹⁷ de Bruno David, Président du Muséum d'Histoire Naturelle) et que l'on agisse en conséquence.

En guise de conclusion

Dans cet épilogue, nous avons repris trois mots clés, prévision, prévention, réparation. Cela nous semble être trois catégories d'actions nécessaires pour assurer la *durabilité* de notre présence sur Terre. Bien sûr, si l'on parle tant de durabilité, c'est que l'on pense qu'elle est menacée. Mais les ressources matérielles et cognitives à notre disposition ne sont-elles pas infinies ? Ne vaut-il pas mieux privilégier à la notion de durabilité, celle de « destruction créatrice » dans la conduite des actions humaines ?

Ces questions, on le sent bien, traversent l'époque actuelle, suscitant des oppositions frontales parfois sans nuances et très agressives. Dans l'introduction de notre ouvrage, nous avons rappelé que notre colloque s'était placé dans le cadre de l'Année Internationale des Sciences Fondamentales pour le Développement Durable, qui allait se prolonger sous l'égide de l'ONU par une décennie visant à coordonner mondialement les Sciences de la Durabilité. Ce rappel montre clairement notre propre réponse aux questions que nous venons d'évoquer, et nous espérons que cette décennie verra le débat s'apaiser et les bonnes synthèses se réaliser.

¹⁷ Cf. par exemple Bruno David, A l'aube de la sixième extinction, comment habiter la terre. Le Livre de Poche, mars 2022, 256 pages

Remerciements

Nous tenons en premier lieu à remercier les auteurs qui nous ont adressé un texte original : Mesdames et Messieurs Isabelle Alvarez, Jean-Louis Bobin, Anne Burban, Frank Carré, Pierre Lenders, Philippe Moingeon. Nous remercions aussi les conférenciers et conférencières qui ont relu et approuvé, parfois avec certaines corrections, les transcriptions qui ont été faites de leurs présentations par les membres de l'AEIS : Eric Bapteste, Patrick Berche, Jean-Philippe Bouchaud, Bruno Canard, Daniel Kroh, Gérard Mourou, Michel Spiro, ainsi que Denis Bonnelle, Claire Kerboul et Philippe Kourislky, ces trois derniers pour leur participation à la Table Ronde et à la rédaction de sa synthèse.

Nous remercions en outre les rédacteurs de ces transcriptions et autres textes inclus dans notre ouvrage et membres du Comité de lecture de l'AEIS : Jean-Louis Bobin, Anne Burban, Eric Chenin, Ernesto Di Mauro, Jean Félix Durastanti, Victor Mastrangelo, Paul Meunier, Edith Perrier, Jean Schmets et Jean-Pierre Treuil. Nous remercions Jean Schmets d'avoir bien voulu faire, de façon systématique pour l'ensemble des textes, les relectures nécessaires.

Tous les participants nous ont fourni des articles de haut niveau scientifique, et ont collaboré à la mise au point des iconographies et au respect des normes de mise en page de notre éditeur EDP Sciences.

Une mention particulière doit être faite à Jean-Pierre Treuil qui a bien voulu animer le comité de lecture de l'AEIS, chargé de mener à bien ce projet d'ouvrage. Il a établi les contacts nécessaires avec nos différents contributeurs, a contribué également aux textes issus de transcriptions et aux présentations des différentes parties de cet ouvrage. Il a participé aussi activement à la conception de la maquette de l'ouvrage. Qu'il soit vivement remercié pour toutes ces actions.

À chacune de nos séances mensuelles, nous recevons les intervenants pressentis pour un colloque sur le thème de notre projet bisannuel. Les séminaires correspondants sont annoncés sur notre site internet. Nos remercions vivement notre Secrétaire général Éric Chenin qui est en charge de la mise à niveau et de la maintenance du site de l'AEIS ainsi que de la gestion de nos colloques sur la plateforme du CNRS/MESR. Il contribue de la meilleure façon à la conception de la maquette du fascicule destiné aux participants à nos colloques. N'oublions pas nos collègues Alain Dohet et Irène Herpe-Litwin qui œuvrent, entre autres, à la préparation des colloques et à leur bon déroulement.

Nos remerciements vont aussi au travail et au professionnalisme de Gilbert Bami qui s'est à nouveau chargé de la couverture de l'ouvrage. Nous bénéficions des compétences et de la bienveillante attention de France Citrini, Responsable LIVRES, et de sa collègue Sophie Hosotte chez notre éditeur EDP Sciences.

Nous adressons aussi nos remerciements aux organismes et aux personnalités qui, en amont de notre projet, ont permis les contacts, les conférences préalables, l'organisation d'un colloque international et enfin la structuration de cet ouvrage. Citons la Mutuelle des Affaires Étrangères et Européennes, la Direction de la Recherche Fondamentale du CEA, et l'Institut Curie qui nous ont accueillis pour les séances

mensuelles de l'AEIS. Le colloque lui-même s'est tenu à l'Institut Henri Poincaré-Paris, haut lieu de la science mathématique et physique française, dont nous tenons à remercier le Directeur Jérémie Bouttier, la Directrice-adjointe Mariana Graña, et Florence Lajoinie, responsable de l'organisation technique de l'amphithéâtre Hermite.

Le Président de l'AEIS
Jean-Félix Durastanti

Les Vice-Présidents de l'AEIS
Victor Mastrangelo, Edith Perrier

Présentation de l'ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES

L'académie Européenne Interdisciplinaire des Sciences, AEIS, société savante (loi 1901), a pour but la recherche, la diffusion et la formation dans tous les domaines de la science. L'AEIS est répertoriée parmi les autres institutions de la capitale sur le site [http : www.paris.fr](http://www.paris.fr)

L'académie se propose :

- De rassembler et de faire étudier les différentes recherches et pensées scientifiques dans un cadre interdisciplinaire ;
- D'établir entre les scientifiques un langage commun nécessaire pour une mutuelle compréhension ;
- De faire connaître les plus récentes découvertes, inventions ou réalisations des domaines de la connaissance.

De participer à l'élargissement de la pensée, en particulier sur des sujets frontières des différentes disciplines, pour atténuer la rigueur des délimitations souvent artificielles.

Ses membres sont issus du monde académique de la recherche et de l'industrie, les grandes disciplines scientifiques sont représentées : Mathématiques, Physique, Chimie, Biologie, Biophysique, Biochimie, Médecine, Informatique, Sciences cognitives, Neurosciences cognitives, Sciences sociales, Sciences de la Terre, Théorie des systèmes complexes, Philosophie des sciences...

L'Académie :

- Tient des séances régulières à Paris, Nancy, Nice, Reims ;
- Édite un bulletin mensuel ;
- Possède des ramifications à Bruxelles, Liège, Luxembourg, Rome ; Athènes ; Allemagne ;
- Organise des colloques interdisciplinaires sur des thèmes scientifiques et de société.

Principaux thèmes des colloques internationaux :

- **2002 « Biologie et conscience »** avec la participation du prix Nobel Géraud M. Edelman, CNAM-Paris ;
- **2004 « Fractales en progrès »** pour les 80 ans de Benoît Mandelbrot, Université Paris-Descartes ;
- **2005 « Physique et conscience »**, clôturant l'Année Mondiale de la Physique avec la participation du prix Nobel Gilles de Gennes, Paris, Ministère de la Recherche ;
- **2008 « Émergence : de la fascination à la compréhension »**, Université Paris-Diderot ;
- **2009 « Perspectives des approches expérimentales et théoriques de l'évolution »** à l'occasion de l'année Darwin ; président du colloque Denis Noble membre de la « Royal Society », université Paris-Diderot ;

- **2011 « Théories et modèles en sciences sociales »**, Président du colloque Prof. Raymond Boudon, membre de l'Institut, Université Paris-Diderot ;
- **2014 « Formation des systèmes stellaires et planétaires – Conditions d'apparition de la vie »**, Institut Henri Poincaré-Paris ;
- **2016 « Ondes, matière et Univers / Relativité générale, physique quantique et applications »**, Présidente du colloque Prof. Françoise Balibar avec la participation de Claude Cohen-Tannoudji et Serge Haroche, Institut Henri Poincaré-Paris ;
- **2018 « Les Signatures neurobiologiques de la conscience/Neurobiologie fonctionnelle, phénomènes de conscience, cognition, automates "intelligents", éthique »**, Institut Henri Poincaré-Paris ;
- **2021 « Les signatures des états mésoscopiques de la matière »**, Institut Henri Poincaré-Paris ;
- **2023 « Interdépendances, pandémies et changement climatique »**, Institut Henri Poincaré-Paris ;
- **2026 « Interdisciplinarité, instrumentation, expérimentation et simulation »**, Institut Henri Poincaré-Paris.

Une collection d'ouvrages AEIS a été créée chez EDP Sciences. Ces ouvrages sont en accès libre à l'adresse suivante :

<https://laboutique.edpsciences.fr/collections>

Recrutement des membres

L'ACADÉMIE EUROPÉENNE INTERDISCIPLINAIRE DES SCIENCES (AEIS) reçoit les candidatures de personnes ayant une forte culture scientifique. Cette culture peut être très générale ou fortement spécialisée, mais tous ses membres doivent être aptes à aborder des sujets interdisciplinaires qui sont à la base de ses projets. Les candidats/candidates doivent donc présenter un curriculum vitae qui expose leur niveau scientifique et leurs activités de recherche et de publications. Les productions intellectuelles, articles scientifiques dans des revues à comité de lecture, ouvrages et brevets sont les témoignages les plus pertinents des capacités des candidats/candidates. Les éléments du CV à fournir sont détaillés dans l'onglet « membres » du site internet de l'AEIS dont l'adresse est donnée ci-après. Le CV doit être accompagné d'une lettre de motivation par laquelle le candidat ou la candidate exprime ce qu'il ou qu'elle peut attendre de l'AEIS et ce qu'il ou qu'elle pense pouvoir apporter en termes de compétences, de participation aux programmes de travail, et de gestion propre de l'Académie. Il existe deux modes de recrutement : membres titulaires et membres correspondants. Il existe aussi un statut de membres associés, réservé à des personnes de haut niveau manifestant une forte curiosité scientifique et prêtes à affronter des questions difficiles, appliquées ou fondamentales, issues de toutes les disciplines académiques se réclamant des sciences (Cf. détails sur le site internet de l'AEIS).

Les dossiers de candidature doivent être adressés au secrétariat général de l'AEIS. Ils sont ensuite présentés à l'ensemble des membres titulaires qui formulent leurs avis, et, la décision est prise par le Bureau selon les modalités prévues par le Règlement intérieur.

Pour accéder aux modalités de candidature, aller sur le site de l'AEIS :

<http://science-inter.eu/>

Ou écrire à l'adresse électronique suivante : eric.chenin@ird.fr ou bien à iherpelitwin@gmail.com qui transmettra le dossier de candidature.

