

■ L E S A M I S D E ■

l'École de Paris

<http://www.ecole.org>

"Les Invités"

organisé en collaboration avec le Collège des Bernardins et grâce aux parrains de l'École de Paris :

Algoé²

ANRT

CEA

Chaire "management de l'innovation"

de l'École polytechnique

Chambre de Commerce

et d'Industrie de Paris

CNES

Conseil Supérieur de l'Ordre

des Experts Comptables

Crédit Agricole SA

Danone

Deloitte

EADS

École des mines de Paris

Erdyn

ESCP Europe

ESSILOR

Fondation Charles Léopold Mayer

pour le Progrès de l'Homme

Fondation Crédit Coopératif

Fondation Roger Godino

France Télécom

FVA Management

Groupe ESSEC

HRA Pharma

HR VALLEY²

IDRH

IdVectoR¹

La Fabrique de l'industrie

La Poste

Lafarge

Mairie de Paris

Ministère de la Culture

Ministère de l'Industrie,

direction générale de la compétitivité,

de l'industrie et des services

OCP SA

Reims Management School

Renault

Saint-Gobain

Schneider Electric Industries

SNCF

Thales

Total

UIMM

Ylios

¹ pour le séminaire

Ressources technologiques et innovation

² pour le séminaire Vie des affaires

(Liste au 1^{er} novembre 2012)

MAÎTRISER OU MANIPULER L'INCERTITUDE ? DES PLAGES BRETONNES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE...

par

Bernard CHEVASSUS-AU-LOUIS

Inspecteur général de l'Agriculture

Ancien président du Muséum national d'Histoire naturelle

Claude HENRY

Professeur à Sciences-Po et à l'université Columbia de New York

Nicholas STERN

Professeur à la London School of Economics

Membre de la Chambre des Lords

Séance du 28 juin 2012

Compte rendu rédigé par Pascal Lefebvre

En bref

Si la science apprécie les incertitudes probabilisables, elle se trouve de plus en plus confrontée à des systèmes complexes, qu'ils soient sociaux, écologiques ou climatiques, dans lesquels les incertitudes ne se laissent plus domestiquer par les statistiques. Face à des prises de décision nécessaires mais à l'issue incertaine, les politiques hésitent alors et attendent des scientifiques qu'ils leurs apportent arguments et certitudes sans toujours admettre que la science n'ait pas réponse à tout. C'est dans cet espace où les risques sont probables mais non avérés, que les faiseurs de doute, lobbyistes ou scientifiques dévoyés, déploient leur rhétorique et leurs stratégies au service d'intérêts privés, au mépris des fonctionnements démocratiques. Entre manipulation et passivité, comment le scientifique peut-il alors se faire encore entendre ?

L'Association des Amis de l'École de Paris du management organise des débats et en diffuse des comptes rendus ; les idées restant de la seule responsabilité de leurs auteurs. Elle peut également diffuser les commentaires que suscitent ces documents.

© École de Paris du management – 94, boulevard du Montparnasse - 75014 Paris
Tél : 01 42 79 40 80 - Fax : 01 43 21 56 84 - email : ecopar@paris.ensmp.fr - <http://www.ecole.org>

EXPOSÉ de Claude HENRY

La science et les marchands de doute

Entre risque et incertitude

Comment l'évolution de la science nous a-t-elle conduits à affronter des problèmes d'incertitude ? L'incertitude concerne en particulier les hommes politiques ou les chefs d'entreprise pour qui les incertitudes, d'une part, compliquent les processus d'évaluation et de prise de décision et, d'autre part, ouvrent la porte à des manipulations qui auraient été impossibles dans le simple cadre de la mécanique de Newton.

Dans une correspondance à son ami Max Born, Albert Einstein écrit : « *Tu crois au Dieu qui joue aux dés, et moi à la seule valeur des lois dans un univers où quelque chose existe objectivement, que je cherche à saisir d'une manière sauvagement spéculative.* »¹ De façon très optimiste, cette citation écrit la science dans le marbre et, pour l'essentiel, j'ai tendance à la trouver pertinente. Il s'est cependant passé beaucoup de choses depuis la science de Galilée et de Newton. Heisenberg aimait à raconter qu'après qu'il eût fait paraître le fameux article dans lequel il donne la première présentation cohérente de la mécanique quantique, il fut convoqué à Berlin, à l'université Humboldt, où il dû affronter les physiciens allemands les plus célèbres, réunis autour d'Einstein. Heisenberg était un jeune homme extrêmement brillant mais les idées qu'il avançait étaient fort gênantes pour la plupart des physiciens présents. Après qu'il eut fait son exposé, au lieu d'aller dîner, Einstein l'entraîna dans une promenade de trois heures durant laquelle il mobilisa toute sa connaissance de la physique et tout son génie pour essayer de trouver les failles qui lui permettraient d'invalider le principe d'incertitude, au cœur de la théorie de son jeune compagnon. Mais, en l'occurrence, c'est Heisenberg qui avait raison !

Heisenberg ignorait cependant que John Meynard Keynes, en 1921, avait écrit un livre intitulé *A Treatise on Probability*, dans lequel il fait une distinction très claire entre le risque, qui est l'incertitude totalement structurée par des probabilités objectives, et l'incertitude intrinsèque, la *genuine uncertainty*, dans laquelle il n'y a pas de probabilités objectives. Au sens de cette distinction, la mécanique quantique relève du risque. Cela peut paraître ridicule : le risque, au sens courant, se révèle si nous prenons des décisions qui s'avèrent néfastes, mais les électrons, eux, ne prennent pas de décisions. Pourtant, au sens de Keynes, il s'agit bien de risque et non d'incertitude stricto sensu, parce que la mécanique quantique fournit des distributions de probabilités objectives qui permettent de prédire statistiquement le comportement, non pas d'une particule, mais d'une population de particules mises dans une situation physique identique. C'est la raison pour laquelle le principe d'Heisenberg ne crée aucun problème pour le fonctionnement de nos ordinateurs, de nos lasers ou de nos appareils d'IRM (imagerie à résonance magnétique), toutes choses qui dépendent de la mécanique quantique mais qui fonctionnent avec des flux de particules pour lesquels il n'y a pas d'incertitude.

Les situations à risques sont ainsi plus proches des situations déterministes que des situations d'incertitude : le grand saut, c'est le passage à la *genuine uncertainty*. Or, ce grand saut, il faut bien le faire ! Il nous est très bien expliqué par Henry Pollack, un géophysicien de l'université du Michigan, dont le livre *Uncertain Science... Uncertain World*², illustre bien la nature de cette incertitude. Il y explique pourquoi, dans des systèmes extrêmement complexes comme les écosystèmes, l'océan, le climat, le corps humain... l'incertitude est *genuine*. On peut bien faire semblant d'avoir des probabilités subjectives, mais elles renseignent plus sur celui qui les formule que sur ce qu'il observe ! On n'a pas, de façon systématique, de probabilité objective dans ces situations où les méthodologies habituelles, que ce soient celles du physicien ou de l'économiste, ne sont pas applicables.

¹ Albert Einstein, "Lettre à Max Born (7 sept. 1944)", *Correspondance 1916-1955* (Seuil, 1969).

² Henry N. Pollack, *Uncertain Science... Uncertain World*, (University of Michigan, 2003).

Déni de science et incertitude

En premier lieu, même s'il y a beaucoup d'incertitude dans une situation, dans une science, dans un système complexe, on y trouve, en général, un cœur de connaissances solides, les incertitudes formant, en quelque sorte, un halo autour de lui. Par exemple, en climatologie, en raison de la complexité du domaine, on ne dispose, faute de théorie, que de modèles qui diffèrent les uns des autres par l'importance respective qu'ils accordent à tel ou tel paramètre. Mais, dans cette discipline, tous les modèles importants convergent vers un certain nombre d'éléments partagés qui peuvent ainsi être considérés, d'une certaine manière, comme certains. Nous savons que nous n'échapperons pas à une élévation de la température moyenne de la planète d'au moins deux degrés : c'est dans le cœur de certitudes de la climatologie. Peut-être trois degrés ? Quatre ? Six ? Cela varie avec les modèles : nous sommes en situation d'incertitude. Si vous considérez une forêt, il existe certaines interactions sur lesquelles tous les spécialistes sont d'accord et à partir desquelles ils peuvent construire un minimum de connaissances non entachées d'incertitude sur l'écosystème. Ce noyau de certitudes existe dans la plupart des situations à partir desquelles on peut bâtir un début de préconisations solides et donc élaborer des choix politiques.

Le second point est que, si vous travaillez avec une science incertaine, comme le sont l'écologie ou la médecine, ne lui demandez pas ce que le président Bush senior demandait à la climatologie à propos du réchauffement planétaire : qu'elle soit une *Sound Science*, une science sur laquelle il n'y ait plus aucun doute avant de décider. Il faut accepter de prendre des décisions sur la base des informations dont on dispose, partiellement certaines, partiellement incertaines. Rejeter l'information incertaine est absurde car, tout incertaine qu'elle soit, elle existe et représente une partie de la réalité et, en conséquence, il faut en tenir compte. C'est ce que font les grandes compagnies de réassurance qui utilisent des modèles de risques généralisés avec non pas une, mais des ensembles de probabilités, à partir desquels elles évaluent les situations pour lesquelles elles n'ont pas de séries statistiques.

Nous autres, enseignants d'économie, avons désormais intégré dans nos cours les résultats obtenus ces dernières décennies par ce que nous appelons les *marchés à information asymétrique*, dont le fonctionnement est profondément différent de celui des *marchés dits à information parfaite* dont les manuels classiques sont remplis. Trois économistes américains, George Akerlof, Michael Spence et Joseph Stiglitz, ont obtenu le prix Nobel pour leurs travaux en la matière, mettant en lumière les avantages qu'il peut y avoir à paraître bon plutôt qu'à l'être réellement. George Akerlof a été un pionnier par son article remarquablement imaginaire sur l'économie des *lemons* et des *peaches*³, les *lemons* étant de mauvaises voitures d'occasion en argot californien, à l'inverse des *peaches*. Dans ce type de marché, le vendeur sait généralement mieux que l'acheteur ce qui est *lemon* et ce qui est *peach*, et celui qui gagne sa vie sur ces marchés biaisés, c'est celui qui vend un *lemon* en le faisant passer pour une *peach*. Être bon n'est donc pas important, le paraître, si. Ceci est au cœur du déni de science qui caractérise ces disciplines dans lesquelles l'incertitude joue un rôle important.

Je vous ai cité des gens comme Galilée, Newton, Einstein, Heisenberg... Frank Luntz est également un génie, mais de la manipulation. Principal *polister* (conseiller en conduite de la campagne électorale) lors des campagnes des candidats républicains, en 2004 il a, en particulier, mis au point le langage qu'ils devaient tenir en matière d'environnement : « *Vous devez sans relâche faire de l'absence de certitude scientifique un thème central pour entretenir le débat.* » Parce que, aussi longtemps que les Américains croiront qu'il y a de l'incertitude au point que la science ne peut rien dire à la politique, ce sont Exxon Mobil, BP,

³ George Akerlof, "The Market for Lemons : Quality Uncertainty and the Market Mechanism", (*Quarterly Journal of Economics*, 1970).

Shell, Peabody⁴, Ford, General Motors, Koch Industries⁵ et quelques-unes des plus grandes entreprises productrices d'électricité qui gagneront.

Toutes ces entreprises ont financé de pseudo-institutions scientifiques qui leur sont subordonnées et portent des noms choisis pour inspirer confiance et sympathie : *American Council for Science and Health* ; *Friends of Science* ; *Greening Earth Society* (« l'abondance de CO₂ favorise la croissance des plantes ») ; *Natural Resources Stewardship Project* ; *The Sound Science Coalition* ; etc. La première d'entre elles a été la *Alexis de Tocqueville Institution*, créée à l'instigation de l'industrie du tabac dans un hommage implicite du vice à la vertu, et dont le but était de s'opposer aux études épidémiologiques démontrant les dangers du tabac. C'est ce que Naomi Oreskes a appelé, dans son livre définitif sur le sujet⁶, la *Tobacco formula* qui va s'appliquer dans toute son ampleur en matière de climat. Bien évidemment, les grandes compagnies ne souhaitent pas être au premier rang de ces manipulations et voir leur nom apparaître au public, ce qui décrédibiliserait ces opérations. Mais par le biais d'institutions d'apparences scientifiques et avec l'aide de scientifiques qui se laissent convaincre de travailler pour elles, plus souvent par vanité que par cupidité, elles peuvent alors avoir une action sur l'opinion.

En 2006, sous la présidence de G. W. Bush, d'après les enquêtes du *Pew Center*, 79 % des Américains étaient convaincus du réchauffement de la planète, dont 50 % pensaient que ce phénomène était dû à l'action humaine. En 2010, ils n'étaient plus que, respectivement, 50 % et 34 %. Comme le dit Platon, dans le *Gorgias* : « Il n'y a pas de sujet sur lequel l'orateur ne parlerait de façon plus persuasive que n'importe quel homme de métier devant une foule.[...] Il faut, Socrate, utiliser la rhétorique comme tout autre art de combat. »

EXPOSÉ de Bernard CHEVASSUS-AU-LOUIS

La rhétorique de l'incertitude

Au printemps 2011, les ministres concernés ont saisi les deux conseils généraux de l'Écologie et de l'Agriculture en leur demandant d'établir un rapport sur les causes de la prolifération d'algues vertes en Bretagne. En tant que membre du second conseil, j'ai été commis pour contribuer à ce rapport, en réalisant une synthèse de la littérature scientifique disponible. Bien que n'ayant préalablement pas suivi ce dossier en détail, il me semblait, sur la base de quelques lectures, que le rôle déterminant des flux d'azote d'origine agricole était tout à fait établi et qu'il existait déjà de nombreux rapports dans ce domaine, rédigés par des chercheurs de l'IFREMER (institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), de l'INRA (Institut national de recherche agronomique) ou du CNRS (Centre national de la recherche scientifique), parfaitement compétents quoique parfois qualifiés, avec condescendance, par leurs contempteurs de "scientifiques bretons"...

Suite à cette nomination et faisant abstraction de toute opinion préalable, j'ai donc lu environ quatre cents publications nationales et internationales pour essayer d'apporter une réponse aux deux ministres, réponse établissant qu'effectivement, le facteur déterminant sur lequel il fallait agir était bien l'émission de nitrates d'origine agricole⁷. Cependant, de multiples arguments ont été avancés pour contester cette conclusion et nous nous proposons dans cet exposé de les analyser.

⁴ Première entreprise charbonnière américaine.

⁵ Koch Industries Inc. est la plus grande entreprise industrielle familiale aux États-Unis, possédée et contrôlée par les frères Koch, sympathisants actifs du Tea Party.

⁶ Naomi Oreskes, Erik M. Conway, *Merchants of Doubt*, (Bloomsbury Press, 2010).

⁷ Bernard Chevassus-au-Louis, Bruno Andral, Alain Femenias, Michel Bouvier : *Bilan des connaissances scientifiques sur les causes de prolifération de macro algues vertes. Application à la situation de la Bretagne et propositions*, rapport CGEDD, novembre 2011.

http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/00794201_rapport_cle2e3e51.pdf

Le modèle général

Pour qu'il y ait des algues vertes, appelées "laitues de mer" en Bretagne, il faut d'abord un écosystème côtier au sein duquel il y ait des espèces de macro-algues susceptibles de proliférer : c'est le cas des écosystèmes côtiers de l'hémisphère nord, qui possèdent tous cette réactivité potentielle. Ensuite, comme pour toute production végétale, il faut des conditions favorables à la photosynthèse, en particulier des facteurs physiques de lumière et de température : ils expliquent que ce phénomène se produira plutôt au printemps et en été. Il faut, de plus, des facteurs physiques locaux, en l'espèce des conditions hydrodynamiques qui confinent les masses d'eau pendant un temps suffisant dans un milieu donné afin que les flux de fertilisants, azote, phosphore et silicium, puissent agir sur cette production végétale. Ce modèle général suppose donc la conjonction d'un ensemble de facteurs dans un endroit et à un moment donnés pour que la prolifération survienne.

Les registres de l' "agnostologie"

Comment, face à ce modèle qui fait consensus chez les scientifiques, la contestation s'est-elle organisée, amenant le préfet de région à demander un nouveau rapport sur cette question ?

Le premier registre de cette contestation a porté sur l'existence même de ce phénomène. Sur les cartes postales anciennes, on voit les goémoniers à la tâche dans l'anse d'Yffiniac : n'est-ce pas là la preuve qu'il y a toujours eu des algues à cet endroit ? Et ce phénomène n'est-il pas simplement une illusion sociale, c'est-à-dire une évolution de la société qui devient moins tolérante à ces phénomènes, qui a peu de mémoire historique et qui incrimine les médias, les scientifiques ou les associations environnementales ?

Le deuxième registre a été celui de la mise en cause de la dangerosité de ces algues vertes, qui ne sont effectivement pas toxiques et sont même comestibles. De plus, elles sont naturellement recyclées et, si on laisse la nature faire, les mollusques et les oiseaux les consomment et elles rentrent dans le cycle naturel. Cependant, quand elles fermentent, elles produisent effectivement de l'hydrogène sulfuré, mais ce gaz, qualifié de *potentiellement toxique en milieu confiné*, ne l'est que *potentiellement* et ne poserait donc pas de problème en milieu ouvert.

Enfin, en confondant azote, oxyde d'azote et nitrates, on trouve cette perle : « *ni la présence d'azote dans l'air et dans les sols, ni celle de CO₂ ne sont des pollutions ; ce sont des gaz normalement présents et utiles à la vie.* » Si on ajoute à cela, comme nous l'avons entendu, que le chien qui en est mort était un « *vieux chien* » et que les sangliers, animaux bien connus pour leur tempérament dépressif, se sont « *suicidés* », on aura le florilège complet des attaques menées contre les conclusions des experts.

Le troisième angle d'attaque a été de souligner les contradictions apparentes du modèle et, par exemple, de dire que les lieux où les flux d'azote sont les plus importants n'étant pas particulièrement touchés, le lien entre les proliférations d'ulves et les effluents agricoles ne pouvait être établi et que, de ce fait, le modèle n'était pas valide. S'il est exact qu'il n'y a pas concordance entre les "points chauds" d'émissions d'azote, que sont notamment la baie du Mont Saint-Michel, l'estuaire de la Vilaine ou la rade de Brest, et les baies de Saint-Brieuc et de Lannion où se manifestent les concentrations d'algues, il faut, pour éclairer cette apparente contradiction, revenir à notre modèle général. En effet, si on isole une cause dans un système de causalités multifactorielles et que l'on essaie de trouver des corrélations simples, on ne peut qu'aboutir à des corrélations extrêmement faibles puisque tous les autres facteurs, et notamment le confinement des masses d'eau, sont ignorés. En baie du Mont Saint-Michel, les apports de nutriments sont rapidement évacués vers le large du fait de l'amplitude des marées et de la forte turbidité des eaux. En revanche, en baie de Saint-Brieuc, où les facteurs de confinement sont importants, les nutriments stagnent et peuvent se concentrer. Une autre forme de contradiction est de trouver des contre-exemples, très nombreux dans la littérature.

Celui de la lagune de Venise, envahie passagèrement par les algues vertes dans les années 1980, est souvent évoqué. Mais dans ce cas, c'est l'augmentation considérable de la turbidité des eaux liée à diverses activités humaines qui, en réduisant les apports de lumière, a mis fin au phénomène.

Le quatrième registre a été celui du débat sur les modèles. Dans les modèles écologiques, on s'efforce de distinguer les phénomènes majeurs en cause, de les paramétrer et de les faire tourner. Mais on ne *démontre* pas un modèle écologique, on essaie de le *valider* en montrant qu'il prédit soit qualitativement, soit quantitativement, des proliférations, leur localisation ou leur disparition, mais il ne s'agit pas d'une démonstration stricto sensu. Dès lors, on se trouve face à toute une série de discours refusant les publications et les modèles mathématiques et réclamant des faits, des mesures et des données établis, au prétexte que les modèles sont des constructions intellectuelles spéculatives qui ne relèvent pas de la science. Une autre forme de critique accuse les modèles de n'indiquer à la sortie que ce qu'on y a mis à l'entrée et d'être biaisés par des choix qui privilégient l'hypothèse que l'on veut démontrer. Nous avons donc été amenés à montrer, dans notre rapport, que les modèles prenaient bien en compte, sans hypothèses a priori, l'ensemble des phénomènes.

Le cinquième registre de ces mises en cause a été d'arguer de supposés blocages corporatistes dans la science officielle. L'un d'entre eux, particulièrement mis en avant et auquel j'ai été associé, a été de rappeler que, dans les années 1970, d'importantes proliférations d'algues avaient touché les grands lacs alpins sous l'effet "eutrophisant" des phosphates issus des lessives. À cette époque, les limnologues⁸ avaient très clairement prouvé que tel était bien le cas dans ces milieux, alors que les océanologues montraient, de façon tout aussi convaincante, que dans les milieux côtiers bretons, dont l'écologie est très différente, c'était l'azote et non le phosphore qui était responsable des proliférations. Cette distinction écologique a été présentée comme une contradiction et une preuve de corporatisme des océanologues récusant les conclusions de leurs collègues limnologues.

Enfin, pourquoi dire que cet azote vient du continent, alors que, dans l'océan aussi, il y a de l'azote ? Ne viendrait-il pas aussi des pluies qui font retomber au sol et en mer l'ammoniaque produit par les élevages porcins ? Et des algues ne seraient-elles pas capables de fixer l'azote atmosphérique, comme les légumineuses ou certaines espèces d'algues présentes en plein océan, là où n'existe aucun autre apport d'azote ? Nous avons donc eu à examiner et à récuser chacune de ces hypothèses, ainsi que d'autres hypothèses alternatives comme les marées noires, l'introduction d'espèces invasives ou le changement climatique, pour une fois reconnu comme une explication recevable.

Finalement, ce florilège se conclut par l'appel paradoxal à la science, sous-entendu la véritable science, la *Sound Science* qu'évoquait Claude Henry, et à des recherches sur une longue période, condition préalable à tout dialogue pour savoir si l'utilité sociale de l'agriculture, qui est avérée, mérite que l'on s'intéresse à une prolifération d'algues dont la nuisance n'est pas avérée.

Le scientifique face à ses contradicteurs

Finalement, ces registres de la rhétorique sont aussi ceux avec lesquels la science se fait. Le fait de bien s'assurer des données, de vérifier que la gravité des phénomènes est bien avérée, d'établir des modèles examinant les hypothèses alternatives, constituent les registres habituels de la rhétorique à l'œuvre dans la construction de la science. Faut-il alors se placer au premier degré, c'est-à-dire considérer que nous avons affaire à un vrai débat scientifique face à d'autres scientifiques et donc chercher à réfuter leurs arguments comme il se doit ? Ou faut-il se placer au second degré, en jugeant qu'il s'agit d'une instrumentalisation d'un débat dans lequel on doit refuser de s'engager ?

⁸ La limnologie est la science des eaux superficielles continentales ou intérieures.

D'un point de vue épistémologique, certains cas sont simples. C'est, par exemple, le cas du créationnisme. Quand on oppose aux théories de l'évolution les théories créationnistes, il est assez facile pour un épistémologue de démontrer que ces dernières ne sont pas des théories scientifiques et qu'en conséquence, elles ne peuvent leur être opposées.

Dans le cas qui nous occupe, les choses sont plus complexes car on peut dire que les hypothèses alternatives avancées, telle celle de l'existence d'algues symbiotiques captant l'azote et faisant proliférer les grandes algues, sont des hypothèses réfutables, au sens de Karl Popper, et qui peuvent dès lors être considérées comme des contre-hypothèses scientifiques recevables, ce qui complique singulièrement les choses.

Faut-il alors invoquer le principe de précaution, qui justifie l'action en situation d'incertitude scientifique, en disant que le décideur politique ne peut se réfugier derrière elle pour justifier le statu quo ? Je suis un très grand défenseur de ce principe mais je me dis que, comme pour toute bonne chose, il faut en user avec parcimonie. Invoquer le principe de précaution serait admettre implicitement que le noyau de certitudes dont on dispose est trop peu assuré, et insuffisant pour fonder l'action. Ce serait là un aveu de faiblesse qui pourrait alors apporter de l'eau au moulin des opposants à toute action.

Dans le cas des algues vertes, il n'est nul besoin d'invoquer ce principe : en l'état des sciences que nous mobilisons, climatologie, pédologie, écologie, hydrodynamique, etc. nous pouvons considérer que les connaissances sont suffisantes pour agir au nom d'un principe de prévention et non de précaution. Le paradoxe, très fréquent, est alors que la science prédit, souvent avec justesse, des effets à long terme sans être capable de le faire pour les effets à court terme. C'est ce paradoxe subtil qui oppose climatologie et météorologie mais qui, en réalité, n'est qu'un sophisme, figure classique de la rhétorique.

EXPOSÉ de Nicholas STERN

La structure de la science

Pour aborder la question de l'incertitude sous l'angle du changement climatique, il nous faut, avant tout, considérer les chaînes de causalité qu'analyse la science et qui structurent, de façon très forte, les problèmes.

Le premier maillon de cette chaîne sera l'effet des activités humaines sur le climat et, en particulier, les effets des émissions de gaz à effet de serre issus de toutes nos activités de production et de consommation. On ne peut pas quantifier exactement le niveau de ces émissions mais on peut être certain qu'elles sont considérables et en estimer, avec une certaine incertitude, le niveau.

Le maillon suivant est celui qui lie ces flux à l'augmentation des stocks de ces gaz, et donc de leur concentration dans l'atmosphère, stocks qui sont au cœur du problème en causant l'effet de serre. On ne peut, là non plus, chiffrer avec exactitude le niveau de ces stocks, puisque les océans et les forêts piègent une partie du CO₂. En revanche, on en connaît l'effet cliquet dès lors qu'ils franchissent un certain seuil.

Le troisième maillon est celui de l'élévation de la température moyenne provoquée par ces concentrations, ce qui constitue l'effet de serre proprement dit.

Le dernier maillon est celui des changements sur la vie des humains provoqué par les effets de cette élévation des températures sur le cycle de l'eau : sécheresses, inondations, élévation du niveau des mers, désertification... Il est impossible d'en prévoir précisément les conséquences dans le Sud de la France ou au Bangladesh, mais on peut définir la probabilité, de désertification de l'un ou de submersion de l'autre.

Nous atteignons aujourd'hui environ 440 ppm (parties par million) d'équivalent CO₂ dans l'atmosphère. Ce taux s'accroît annuellement d'environ 2,5 à 3 ppm par an. Dans un siècle, en l'absence de politiques adaptées, cela représentera alors plus de 750 ppm, soit la probabilité, à plus de 50 %, d'une élévation de la température moyenne supérieure à 5°C, par rapport à la référence qu'est le XIX^e siècle, ce qui est énorme et crée une situation que la Terre n'a plus connue depuis trente millions d'années. Il est impossible de dire exactement quel sera le changement de vie que cela induira pour l'homo sapiens, mais on peut suggérer qu'il sera, en tout état de cause, énorme. Les ports, les rivières, la culture des céréales, etc., en seront considérablement affectés et cela entraînera des mouvements de population considérables affectant des centaines de millions, voire des milliards de personnes. La probabilité que de telles migrations entraînent des conflits sévères et mondiaux est très élevée, quand bien même il est impossible d'en prévoir la localisation.

Il est impossible d'être précis et donc, ce que l'on essaiera de décrire, ce sont des risques. Et l'on peut affirmer, sans grand risque d'erreur, qu'avec 750 ppm, ces risques sont très sévères. On peut penser que c'est un jeu de roulette russe mais, dans de telles circonstances, il peut être intéressant de limiter le nombre de balles dans le barillet et, ce faisant, de réduire la probabilité de survenue du risque. En l'occurrence, un sur six, c'est beaucoup mieux que deux sur six !

Il s'agit donc désormais d'un problème de gestion du risque. Une telle conjonction de facteurs de risque sur une aussi grande échelle leur étant inhabituelle et, de ce fait, peu compréhensible, les politiques peinent à trouver des solutions ce qui n'est pas étonnant puisqu'ils n'arrivent même pas à appréhender la situation. Face à ces risques et ces incertitudes, leur difficulté est d'appréhender des effets qui ne surviendront qu'à long terme, et il leur est malaisé de prendre des décisions. De plus, ce qui compte, c'est la somme des décisions prises de par le monde, et non telle ou telle décision locale, ce qui complique encore les choses.

C'est en cela que le recours à la science est si important pour permettre la compréhension des problèmes et donner des arguments aux décideurs.

Que dire aux décideurs ?

Plutôt que de déplorer que les incertitudes soient si grandes, ne vaudrait-il pas mieux dire que l'on est presque sûr que les risques sont minimales ? Mais, après deux siècles de science, avec toute l'information scientifique à notre disposition, avec l'accumulation de données qui convergent toutes vers l'urgence des décisions à prendre et du fait que l'effet de serre relève d'une physique assez simple, une telle affirmation serait totalement contraire à l'esprit scientifique.

Ne pourrait-on alors dire que, au regard de telles incertitudes, le mieux serait d'attendre d'avoir davantage d'informations sur ce phénomène afin de mieux le comprendre et de pouvoir décider sans regret ? Nous touchons là au problème de l'effet cliquet : à trop attendre, l'augmentation des stocks de CO₂ rendra certaines conséquences irréversibles. Et, qui plus est, pendant cette attente, on continuera à investir dans des infrastructures productrices de carbone, prévues pour durer plusieurs décennies, qui amplifieront à leur tour le phénomène. Cet argument n'est donc pas davantage recevable que le premier, compte tenu du grand danger que constitue tout délai mis à répondre à la situation.

Ne peut-on enfin parier sur l'intelligence de l'homo sapiens, sur ses capacités d'adaptation et sur son imagination pour trouver des solutions aux problèmes auxquels il est confronté ? Ce serait ne pas tenir compte de l'ampleur des phénomènes en cause : les changements pour s'adapter à des événements survenant à cette échelle seraient si sévères, si difficiles, qu'il serait irresponsable de s'arrêter à cet argument irréaliste.

Ces trois arguments ne résistent donc pas à un examen sérieux. Pour contrôler au cours de ce siècle une augmentation de 2°C de la température moyenne, au-delà desquels le danger de bifurcations, telles le dégel du permafrost ou la destruction des forêts, devient important, il faut réduire les émissions de gaz à effet de serre, qui s'élèvent aujourd'hui à cinquante milliards de tonnes d'équivalent CO₂ par an, à trente-cinq milliards d'ici vingt ans et à moins de vingt milliards d'ici trente ans. Il faut comprendre que c'est là un changement radical. Compte tenu de prévisions de croissance qui, sur la même période, envisagent un triplement de la production mondiale, c'est par un facteur de six ou neuf qu'il faudra réduire le taux d'émission d'équivalent CO₂ par unité produite.

Dans certains domaines, ce ne sera pas possible et cela implique donc, qu'ailleurs, il faudra réduire ce taux à zéro pour atteindre l'objectif recherché. Il faut comprendre que c'est là une nouvelle révolution industrielle d'une magnitude considérable, comparable à celle du textile à la fin du XVIII^e siècle, à celle du machinisme au XIX^e siècle ou à celle de la production de masse au XX^e siècle, pour reprendre la classification de Christopher Freeman⁹. Cette révolution n'en est qu'à ses débuts mais elle se produit conjointement à celle des technologies de la communication et de l'information, ce qui est une chance, car il faut également comprendre que les révolutions de ce type peuvent également être des facteurs d'innovation et de croissance, qu'elles sont porteuses de destruction mais également de création.

Sous l'angle des marchés, ces changements sont souvent présentés comme leur étant défavorables. Il ne s'agit pourtant que de corriger leurs échecs ! L'un de ces échecs, très clair, est celui du marché des émissions de gaz à effet de serre qui ne limite les possibilités d'émission que pour autrui... D'autres échecs, moins connus, sont pourtant importants : celui du partage de la recherche et développement, nécessaire pour comprendre les facteurs d'échec ou de succès ; celui de la gestion des risques complexes par les marchés de capitaux ; celui de la gestion des réseaux de transports publics, d'électricité, de communication, etc. qui ne peuvent fonctionner sous la seule loi des marchés et sans l'intervention des gouvernements. Ces problèmes nouveaux sont difficiles à comprendre car il faut aussi prendre en compte la balance coûts/bénéfices. En effet, en utilisant des technologies différentes, on peut obtenir des productions plus propres, plus économes en énergie, plus respectueuses de la biodiversité, etc.

On ne peut donc pas penser réussir cette révolution avec une politique uniquement centrée sur le prix du CO₂. Celle-ci est évidemment importante mais elle ne peut être la seule politique. Une transformation d'une telle ampleur devra être conduite sur de multiples fronts.

Comment leur parler ?

Bien que n'ayant jamais été élu, j'ai passé une grande partie de ma vie professionnelle à parler avec des gens chargés de prendre des décisions. Il leur faut être réélus et cela est pour eux une préoccupation constante. « *Que font les autres ?* » se demandent-ils en permanence. Si les autres le font, ils le feront. Quand nous leur parlons de compétitivité du pays, de marchés nouveaux, de grandes opportunités, etc., nous ne leur apportons aucune certitude. Peut-être faut-il attendre ? Il leur faut d'abord comprendre ce que font les Chinois, les Brésiliens ou les Indonésiens. J'ai ainsi passé l'année écoulée à leur expliquer ce qu'impliquait le douzième plan quinquennal (2011-2016) de la Chine, document très important qui commence à être appliqué.

Il faut ensuite faire preuve d'esprit collaboratif et trouver des actions communes, ce qui n'est pas simple, encourager la recherche, diminuer les risques liés aux investissements par des tarifs privilégiés, etc. Claude Henry a souligné les dangers liés à l'information biaisée et aux marchands de doute, car le doute ne peut justifier l'inaction. Les politiques ont beaucoup de

⁹ Christopher Freeman (1921-2010), économiste anglais, professeur à l'université du Sussex, a contribué au renouveau de la tradition néo-schumpetérienne centrée sur le rôle de l'innovation dans le développement économique et celui des activités scientifiques et technologiques dans l'amélioration du niveau de vie.

mal à traiter simultanément plusieurs problèmes et la crise économique est actuellement leur sujet de préoccupation majeur. Mais si l'on pose conjointement le problème de la croissance à moyen terme et celui de la résolution de la crise financière, on pourra, j'en suis convaincu, faire mieux, à la fois en termes de croissance et en termes de finances.

DÉBAT

Science et démocratie

Un intervenant : *Ce que vous dites est inquiétant pour la notion même de démocratie : in fine, les décisions sont prises par des politiques, qui sont élus et veulent être réélus. Les mêmes analyses scientifiques aboutissent alors à des conclusions différentes d'un pays à l'autre. Il en va ainsi de la question des retraites, de celle du nucléaire civil ou de la conférence de Rio. Pour être réélu, il faut dire des choses qui plaisent au peuple, Platon l'avait dit en son temps. Et quand le peuple n'écoute plus les gens raisonnables, il écoute des gens déraisonnables mais extrêmement séduisants. Les espoirs du siècle des Lumières sont en train de mourir.*

Bernard Chevassus-au-Louis : Dans mon domaine de la biologie, en voyant la manière dont des régimes totalitaires ont manipulé cette science, je ne suis pas persuadé que le lien entre politique et science ait été meilleur dans ces pays...

Int. : *La science vit avec, et seulement avec, la démocratie. Cela commence sur l'agora grecque, puis chez les princes de la Renaissance italienne, dans les salons du siècle des Lumières ou dans les collèges anglais du XVII^e siècle où, à chaque fois, on trouve des espaces de discussion qui la rendent possible. En retour, elle est une contribution importante à la démocratie en permettant l'expression d'un désaccord. La science se fait toujours dans cet espace de désaccord, contre le sens commun et contre les théories dominantes. La baisse de la démocratie, spectaculairement visible dans l'affaiblissement de la presse, dont le rôle est d'ouvrir le débat, et l'apparition de phénomènes comme Fox News, Murdoch ou Berlusconi, sont des phénomènes nouveaux et inquiétants. La nécessité de plus de science, toujours corrélée à la démocratie et élément essentiel du débat, est donc impérieuse.*

Michel Berry : *Si la science va avec la démocratie, le déni de science accompagne volontiers les totalitarismes. Concernant le noyau dur de connaissances sur le changement climatique, les politiques sont-ils convaincus qu'il y a là quelque chose d'important, même s'ils ne savent pas comment y faire face, ou sont-ils dans le déni ?*

Nicholas Stern : Tout dépend de où ils se situent. En Inde, en Chine, au Brésil, il y a peu de déni. C'est très différent aux États-Unis où le problème est plus profond et devient une question politique. « *Les Républicains* », selon les mots de Thomas Friedman¹⁰, « *ont déclaré la guerre à la physique.* » Que la science devienne un enjeu entre gauche et droite est préoccupant et le problème commence à toucher l'Europe. Il est nécessaire de mieux communiquer pour ne pas laisser le champ libre à ce genre de discours.

B. C. L. : L'un des arguments, sans doute le plus difficile à contrer, dit que la science finira bien par trouver des solutions. À quoi bon s'imposer des sacrifices aujourd'hui alors que, peut-être, dans quelques années, avec l'enfouissement du carbone et autres perspectives, on trouvera des solutions moins chères. Il est difficile d'en débattre parce que, en quelque sorte, on est à fronts renversés lorsqu'en tant que scientifique, on est amené à dire : « *Moi qui fait de la science tous les jours, je vous invite à ne pas trop y croire ! Il n'est pas évident qu'on vous apportera les solutions en temps utile...* »

¹⁰ Thomas Lauren Friedman, journaliste américain, éditorialiste du *New York Times*.

N. S. : C'est pour cela qu'il faut emprunter un autre chemin : celui de la réduction du risque. C'est un chemin très attractif, plus *soft*, qui ne promet pas seulement la réduction des risques mais qui offre aussi beaucoup de possibilités de découvertes que l'on ne fera pas si on ne s'y engage pas. Tout cela est difficile à expliquer mais il est nécessaire d'engager ce processus d'apprentissage.

Int. : *L'histoire montre que des catastrophes écologiques ont déjà affecté des populations humaines, ce que l'opinion publique n'arrive pas à croire faute d'exemples probants. Un livre de Jared Diamond, Collapse¹¹, traite de six exemples qui ont vu la disparition totale de communautés humaines dans de telles circonstances, parmi lesquelles celle de l'Île de Pâques, des indiens Anasazis du Sud-Ouest des États-Unis, et des Vikings du Groenland, dont la société s'est effondrée après quatre siècles de présence.*

Int. : *Même si elle se développe dans les démocraties, la science n'est pas démocratique : on ne vote pas les lois de la physique au Parlement ! En revanche, dans une société où l'on souhaite que les choix soient démocratiques, la rançon en est la reconnaissance du droit à l'erreur. Les procédures scientifiques font que, s'il y a des erreurs, on est capable de les corriger assez rapidement, mais c'est un risque à prendre pour la société. La science moderne est née dans les académies, c'est-à-dire des endroits où ce que proposent les gens est mis en confrontation et en discussion avec les pairs à l'issue de quoi les énoncés scientifiques sont validés. Produire de la science, c'est se confronter en permanence à sa propre ignorance.*

Or, on constate que ces scientifiques dévoyés et alliés aux intérêts industriels dont parle Naomi Oreskes ne sont jamais des spécialistes des sujets sur lesquels ils interviennent, que ce soit la question du tabac ou celle du réchauffement climatique. On ne peut pas demander au citoyen moyen de connaître la physique de l'effet de serre. En revanche, savoir reconnaître si quelqu'un appartient à une communauté scientifique et produit de la science quand il s'exprime dans les médias, ou s'il parle d'un sujet qu'il ne connaît pas, est très simple à percevoir et à dénoncer.

B. C. L. : La question est délicate et l'on pourra très vite vous reprocher, à ne vouloir débattre qu'avec vos pairs, de fermer le débat et d'abuser de l'argument d'autorité. Avec nos contradicteurs sur la question des algues, il nous a fallu reprendre un à un tous les arguments qui nous étaient opposés, en démontrant leur irrecevabilité et en étayant notre démonstration de solides références. Nous avons eu la chance de disposer pour cela d'une importante littérature basée sur plus de quarante années de travaux scientifiques incontestables. Nous avons considéré qu'il nous fallait répondre à toutes ces hypothèses, quelle que soit la personne qui en était à l'origine. Tout le monde a le droit d'émettre une hypothèse scientifique dès lors qu'elle peut répondre au principe de réfutation de Karl Popper.

Claude Henry : La question est de savoir comment faire passer les conclusions de ces procédures non démocratiques dans l'espace public démocratique, là où il s'agit de prendre les décisions. Cette transition est très compliquée à réussir.

N. S. : On ne peut pas rester dans son laboratoire à l'université : il faut s'engager, avec des arguments rationnels, y compris face à des gens irrationnels. La question qu'on nous pose, à nous scientifiques, dans un ministère, est toujours : « *Maintenant, pourriez-vous nous suggérer quoi faire ? Et, si c'est le cas, pourriez-vous m'aider à justifier cette décision ?* »

Enseigner la culture scientifique

Int. : *Comment alors créer une meilleure appétence pour la culture scientifique afin d'échapper aux manipulations de ces pseudos scientifiques ?*

¹¹ Jared Diamond, *Collapse*, 2005 - traduction ; *Effondrement. Comment les sociétés décident de leur disparition ou de leur survie*, (Gallimard, 2006).

C. H. : Nous avons, en France, des expériences très positives : La main à la pâte¹², merveilleuse expérience en milieu scolaire, ou, en dehors de ce milieu, les Petits débrouillards¹³ et il y a des expériences analogues dans d'autres pays. Mais, dans un langage de marketing, ce sont encore des marchés de niche et l'on peut très certainement faire mieux. Ce qui est difficile, c'est de répliquer ces expériences, comme on réplique l'ADN avec des enzymes, sans les dénaturer, c'est-à-dire sans en faire des formations normalisées.

Cette question de la diffusion de la culture est préoccupante. Aux États-Unis et dans les pays anglo-saxons, le journalisme scientifique régresse de façon dramatique. Par contraste, en France, la situation est moins alarmante même si les journalistes scientifiques, y compris les plus respectés, ne se situent pas très haut dans la hiérarchie de leurs journaux.

B. C. L. : Il y a un premier registre, que Claude Henry vient de développer, qui est de comprendre comment se fait l'acquisition des connaissances scientifiques. Un autre registre est celui de la distinction entre la science, comme outil que l'on pratique, et la culture scientifique. Cet enseignement de la culture scientifique, au sens d'une réflexion sur l'histoire des sciences, sur l'épistémologie, etc. est essentiel. Tout le monde sait que Newton a reçu une pomme sur la tête, mais bien peu connaissent la signification profonde de l'intuition du savant anglais et ce qui a résulté de cet événement qui reste trop souvent anecdotique. En France particulièrement, on enseigne la science comme si elle était une révélation, entourée de mystère. Mais, par contrecoup, on néglige de l'inscrire dans l'histoire de son développement, hypothèse après hypothèse, sans doute par crainte qu'elle n'apparaisse alors comme trop contingente et perde ainsi son caractère sacré.

N. S. : Sur une question sociale comme par exemple celle de l'âge de la retraite, les arbitrages sont relativement simples à justifier : grosso modo, l'espérance de vie augmentant, il faut travailler plus longtemps pour maintenir un même niveau de pension. Le débat est plus complexe en matière de réchauffement climatique. Les scientifiques se doivent donc de communiquer le plus clairement possible, mais ce talent n'est guère répandu dans les laboratoires de recherche et il doit s'acquérir. Expliquer les choix, sur des sujets complexes, de façon compréhensible par tous est une contribution démocratique forte.

Singularités et bifurcations

Int. : *Les courbes d'évolution des situations liées au réchauffement ne sont pas lisses et, dans beaucoup de phénomènes, il existe des passages critiques. À tout moment, des singularités peuvent survenir, entraînant des bifurcations imprévues où, brutalement, la situation change radicalement. Il en va ainsi de la fonte de la glace : on sait la calculer pour le petit cube dans l'eau qui disparaît instantanément lorsqu'il devient suffisamment mince. Mais quelle est l'épaisseur critique, celle de sa fonte soudaine, de la banquise arctique ? Personne n'est en mesure de la calculer, compte tenu de la multiplicité des paramètres en cause et de la difficulté intrinsèque de ce type de problème. La situation me paraît donc encore plus grave que ce que vous nous en dites.*

C. H. : René Thom¹⁴ a ouvert une voie que suivent quelques publications récentes. Quand un écosystème se dégrade et s'approche d'un point de bifurcation, imprévisible par définition, qu'en est-il ? Les écologues ont recherché des signaux d'alerte qui pourraient donner une idée, en partie incertaine évidemment, de la proximité du *Tipping Point*¹⁵. Il existe une littérature dans ce domaine qui montre que si vous faites subir à votre système une petite

¹² L'opération La main à la pâte a été lancée en 1996, à l'initiative du professeur Georges Charpak de l'Académie des sciences, prix Nobel de physique 1992. Cf. www.lamap.fr

¹³ www.lespetitsdebrouillards.org

¹⁴ René Thom, (1923-2002), mathématicien français, fondateur de la théorie des catastrophes, médaille Fields en 1958. Cf. par exemple *Paraboles et catastrophes*, (Flammarion, 1983).

¹⁵ Cf. par exemple Malcolm Gladwell, *The Tipping Point : How Little Things Can Make a Big Difference*, (Little Brown, ed. 2000).

perturbation, non destructrice du système, la correction de cette perturbation sera d'autant plus lente que l'on se rapproche du point de bifurcation. Les paléoclimatologues ont repris le flambeau, dans un article récent de *Nature*, en étudiant une dizaine de bifurcations très importantes, rapides et abruptes, dans le climat au cours des trois cents millions d'années passées. Ils ont constaté des signaux d'alerte qui se sont manifestés avec une intensité croissante avant la rupture. Voilà quelques éléments de réponse.

Int. : *Les deux cas présentés me semblent différents. Dans le cas des algues, les arguments ont pu être discutés même s'il y a toujours des gens qui nient l'évidence. Dans le cas du réchauffement climatique, il s'agit de prévisions, donc d'une extrapolation. D'un point de vue "probabiliste", on sait que les incertitudes croissent fortement lorsque l'on est dans le champ de l'extrapolation. On pourra donc toujours discuter des futurs possibles et, de ce point de vue, les scientifiques devraient réfléchir à certaines extrapolations faites par le passé, comme celle, dans les années 1970, des pluies acides qui allaient amener une déforestation de l'Europe, ce qui ne s'est manifestement pas produit, les changements politiques en Europe centrale ayant entraîné, entre autres, la fin de l'exploitation du lignite. Des scientifiques qui s'étaient fortement engagés se sont ainsi retrouvés à la traîne d'évolutions sociétales qui ont rendu leurs prévisions totalement fausses. Au X^e siècle, on a aussi trouvé des scientifiques pour démontrer que le quotient intellectuel des hommes était bien supérieur à celui des femmes...*

N. S. : Nous sommes dans une situation où l'on est en droit de redouter de grands dangers à venir et où le risque d'irréversibilité est important, et cela change la donne.

Int. : *Depuis quelque temps, on constate un net désengagement de grands pays comme le Canada, naguère à la pointe de la lutte contre le réchauffement. En revanche, les solutions visant l'adaptation à la nouvelle situation semblent recueillir la faveur d'un nombre croissant de décideurs. Dans le port de Londres, des travaux très importants sont réalisés pour pallier la montée des eaux, tout comme à Hambourg ou aux Pays-Bas. En revanche, il est à redouter que le Bangladesh ne se trouve à l'avenir sans défenses face au risque de submersion.*

On constate ainsi un certain principe d'efficacité face à des mesures devant être prises à l'échelle de l'humanité mais qui n'avancent pas beaucoup du fait de l'inertie des pays émetteurs de gaz à effet de serre.

N. S. : L'adaptation est très importante car nous en sommes déjà à 1,8°C d'élévation des températures moyennes. À 2°C, l'effet cliquet jouera avec des conséquences importantes. À Londres, par exemple, les hivers seront davantage pluvieux et le système d'égouts sera submergé, ce qui nécessite dès aujourd'hui des investissements importants. Il nous faut donc, comme le dit une expression anglaise : « *Manager ce qui peut l'être et éviter ce qui ne le peut pas.* »

Présentation des orateurs :

Bernard Chevassus-au-Louis : normalien biologiste, est inspecteur général de l'Agriculture ; il a été notamment directeur général de l'INRA (Institut national de recherche agronomique) et président du Muséum national d'Histoire naturelle.

Claude Henry : physicien devenu économiste, il a été ou est enseignant et chercheur à l'École polytechnique, à Sciences Po et à l'université Columbia de New York ; il a particulièrement travaillé sur la prise de décision en incertitude, ainsi qu'en économie de l'environnement ; de 1997 à 2002, il a été membre du Conseil d'Analyse Économique créé en 1997 par le Premier ministre Lionel Jospin.

Nicholas Stern : baron Stern of Brentford, est un économiste britannique ; ancien vice-président senior de la Banque mondiale de 2000 à 2003, il est connu pour le rapport Stern sur l'Économie du changement climatique publié le 30 octobre 2006 ; il a été en 2009 membre de

la Commission Stiglitz chargée d'une « *réflexion sur les moyens d'échapper à une approche trop quantitative, trop comptable de la mesure de nos performances collectives* » et d'élaborer de nouveaux indicateurs de richesse ; en 2010, le Collège de France le nomme titulaire de la chaire Développement durable – Environnement, Énergie et Société, pour l'année académique 2009/2010.

Diffusion novembre 2012