

INCERTITUDE SCIENTIFIQUE ET INCERTITUDE FABRIQUÉE D'UNE APPROCHE RATIONNELLE AUX DÉNIS DE SCIENCE.

Claude HENRY (27/05/12)

IDDR I Sciences Po et Columbia University

1. INTRODUCTION : MÉTHODE SCIENTIFIQUE ET INCERTITUDE

Par grand vent, un jour de 1584, un jeune homme pousse la porte de la cathédrale de Pise. Coup de vent dans la cathédrale ; aussitôt le jeune homme referme la porte. Son attention se fixe sur les oscillations de la lampe suspendue au sommet de la coupole ; le coup de vent l'a mise en mouvement ; en l'absence de toute nouvelle impulsion l'amplitude des oscillations diminue progressivement. La suite est Histoire et c'est une historienne des sciences, Laura Fermi (aussi l'épouse du célèbre physicien Enrico Fermi), qui en rend compte dans une courte biographie *Galileo and the Scientific Revolution* :

« Concentré sur les oscillations de la lampe, il s'efforçait d'en saisir les caractéristiques essentielles. Allant plus loin, il formula une hypothèse : peut-être les oscillations, qu'elles soient de grande (au début du mouvement) ou de faible (à la fin) amplitude, ont-elles toutes la même durée. Après une première, et imparfaite, vérification de cette hypothèse – comparant les temps d'oscillation aux battements de son pouls – Galilée franchit une nouvelle étape : concevoir et exécuter une expérience. L'expérience devait reproduire les conditions essentielles du phénomène observé dans la cathédrale, mais épurées autant que possible et strictement contrôlées. La forme compliquée de la lampe pouvait interférer avec le mouvement. Il la remplaça donc par des corps de la forme la plus simple possible, des sphères de diverses tailles et de divers poids, suspendues par des cordes dont il pouvait faire varier la longueur. Ce n'est qu'après avoir obtenu, à chacun de ses nombreux essais, le résultat qu'il lui avait semblé observer dans la cathédrale, que Galilée accepta son hypothèse comme valide. »

Valide mais pas définitivement établie : alors qu'un seul contre-exemple pertinent invalide une hypothèse, aucune série, aussi longue soit-elle, de vérifications réussies ne suffit à l'établir définitivement. Établir définitivement un résultat a un sens en mathématiques mais pas en science expérimentale. De ceci Galilée, nous le savons, est conscient.

La démarche de Galilée, magnifiée au siècle suivant par Newton, et enrichie par d'autres comme Lavoisier ou Pasteur, illustre bien l'idée que beaucoup se font de la méthode scientifique(1). Heisenberg cependant, met en cause en 1926 l'universalité d'un principe considéré comme un pilier de la méthode, le principe de causalité. Certains physiciens n'acceptent pas cette mise en cause, comme en témoignent les échanges entre Einstein et Heisenberg au Congrès Solvay de 1927(2) :

Heisenberg : « *La loi de la causalité nous dit que si nous connaissons le présent, nous pouvons prédire le futur. Mais prenons garde, dans cette formulation, ce n'est pas la conséquence qui est fausse, c'est la prémisse. Car par principe, nous ne pouvons pas connaître tous les éléments qui caractérisent le présent.* »

Einstein : « *La mécanique quantique nous apprend beaucoup de choses, mais ne nous rapproche pas du secret du Vieux. Je suis quant à moi convaincu qu'IL ne joue pas aux dés.* »

« *Par principe* » : il s'agit du fameux principe d'incertitude. Cependant, quand il le baptise ainsi, Heisenberg ignore le *Treatise on Probability* publié en 1921 par Keynes. Celui-ci fait dans ce livre une distinction très claire entre risque et incertitude, le risque étant de l'incertitude complètement structurée par des probabilités objectives. Il serait assurément un peu bizarre de parler de principe de risque à propos d'atomes, de neutrons ou d'électrons. Il n'en reste pas moins, et ceci est l'essentiel, que si la mécanique quantique n'est pas déterministe à l'échelle d'une particule individuelle – dont le comportement, selon le principe de Heisenberg, est aléatoire – elle l'est à l'échelle statistique, lorsqu'un grand nombre de particules identiques sont impliquées dans le même phénomène : la théorie fournit les distributions de probabilités objectives gouvernant les statistiques observées. Le principe de Heisenberg ne crée donc aucun problème pour le fonctionnement des transistors, ordinateurs, lasers ou appareils d'investigation médicale, qui sont tous enfants de la mécanique quantique. Il n'y a à ce niveau aucune incertitude, donc

aucune controverse, autre que philosophique, qui pourrait se nourrir d'incertitude(3).

Quand il s'agit de sciences comme l'écologie, la climatologie, l'océanographie, et aussi la médecine, la situation est radicalement différente : elles sont, dans des mesures plus ou moins grandes, intrinsèquement incertaines ; qu'on y introduise des distributions de probabilités subjectives ne doit pas faire illusion à cet égard. Le géophysicien Pollack, dans son livre *Uncertain Science... Uncertain World*, illustre bien la nature de cette incertitude :

« Du fait de sa complexité, il est extrêmement difficile même pour le plus expérimenté des écologues d'étudier un écosystème forestier dans tous les détails. De ce fait on développe des approches simplifiées concernant le fonctionnement de l'écosystème, en concentrant l'attention sur quelques composantes et leurs interactions, dans la mesure où on pense qu'elles sont particulièrement significatives. Cette conceptualisation de l'écosystème est appelée modèle. Bien sûr différents écologues peuvent percevoir les interactions différemment, pondérer différemment les contributions des composantes et, de ce fait, construire des modèles différents. À cause de la complexité, l'écosystème est compris de manière imparfaite, avec un inévitable degré d'incertitude. »

Traiter l'incertitude intrinsèque, non probabilisable objectivement, est assurément plus compliqué que traiter le risque. Il ne faut cependant pas perdre de vue deux points essentiels.

Le premier c'est que l'incertitude, toute intrinsèque qu'elle soit, est partielle, en ce sens qu'un noyau de connaissance bien établie est en général disponible. Ainsi, les différents modèles d'une forêt peuvent être en accord sur les interactions principales dans l'écosystème. Et les principaux modèles climatiques fournissent un noyau commun de résultats qui constituent une base fiable sur laquelle fonder des politiques climatiques. Il reste évidemment une part significative d'incertitude intrinsèque. Par exemple, s'il est largement admis qu'il faut s'attendre à une hausse supérieure à 2°C de la température moyenne à la surface de la terre, de combien elle sera supérieure reste incertain.

Le second point essentiel à considérer, c'est qu'il existe des approches rationnelles et structurées pour traiter l'incertitude qui reste présente. Nous examinerons trois de ces approches :

[1] une version incertaine mais fiable de la méthode scientifique

[2] des généralisations aux décisions en situation d'incertitude de l'approche de von Neumann et Morgenstern conçue pour les décisions en situation de risque

[3] la détection de signaux alertant sur la proximité d'un point de basculement (*tipping point*, ou bifurcation en langage mathématique).

Ce sont des approches rationnelles et structurées pour utiliser le plus efficacement possible l'information - incertaine - disponible.

D'autres motivations sont cependant à l'œuvre. Les modèles d'information asymétrique d'Akerlof, Spence et Stiglitz(4) mettent en lumière les avantages qu'il peut y avoir à paraître bon plutôt qu'à l'être réellement. C'est ainsi que, depuis la négation des dangers du tabac jusqu'à celle du changement climatique, la science déguisée et manipulée l'a souvent emporté sur la science authentique. Ces manipulations ont exploité la méfiance de beaucoup de citoyens et d'hommes politiques à l'égard de résultats scientifiques qui ne sont pas perçus comme fiables parce qu'ils comportent une part d'incertitude. Gonfler celle-ci, voilà la stratégie recommandée aux candidats du parti républicain aux élections de 2004 (y compris George Bush candidat à sa réélection) par le conseiller politique Frank Luntz dans son fameux *Straight Talk Memo* :

« Si le public vient à croire que le débat scientifique est clos, ses vues sur le réchauffement global s'ajusteront en conséquence. Vous devez donc sans relâche faire de l'absence de certitude scientifique un thème central pour entretenir le débat. »

2. APPROCHES STRUCTURÉES POUR TRAITER L'INCERTITUDE

[1] Le gouvernement britannique, au début de la décennie 1990, aurait aimé avoir avec la science une relation aussi simple que les utilisateurs de la mécanique quantique ; ce n'est pas que celle-ci soit simple à interpréter et appliquer, mais elle est simple dans son rapport à l'incertitude. La maladie dite de la vache folle faisait rage en Angleterre et au Pays de Galles ; le principe pseudo-scientifique rassurant

selon lequel il y aurait une "barrière des espèces" avait volé en éclats en 1991 avec l'inoculation de la maladie à un chat. Et une forme nouvelle de la maladie de Creutzfeld-Jacob, maladie neurodégénérative elle aussi, était apparue chez des sujets jeunes (la forme connue antérieurement n'atteint que des sujets âgés). Devait-on envisager une transmission à l'homme de la maladie de la vache folle ? Fallait-il interdire la consommation de bœuf britannique ? Confronté à ces questions, le gouvernement britannique se retrouvait sans référence scientifique.

Sauf à regarder du côté de San Francisco. Là-bas, dans son laboratoire de l'Université de Californie, le médecin et biochimiste Stanley Prusiner travaillait sur des maladies dégénératives du cerveau apparemment induites par des agents pathogènes inattendus, des protéines de la famille des prions, devenues pathogènes à la suite de mutations. Bien qu'étonnants, les résultats expérimentaux sur des souris et l'approche théorique de Prusiner paraissaient solides : méthode expérimentale rigoureuse et élucidation au niveau moléculaire d'une partie de la chaîne des événements conduisant aux mutations des prions et à leur action pathogène. Il ne s'agissait assurément pas d'une compréhension complète du développement des maladies neurodégénératives en cause (à cet égard Prusiner a fait au cours des années suivantes des progrès si significatifs que le Prix Nobel lui a été décerné dès 1997), mais il paraissait raisonnable de penser que les résultats expérimentaux obtenus et le cadre d'interprétation proposé constituaient une approche scientifique, certes en partie incertaine, mais néanmoins fiable. Ce que Prusiner proposait au début des années 90 était un morceau de science incertaine, suffisamment convaincant cependant – par sa cohérence, la qualité des résultats expérimentaux obtenus tout partiels fussent-ils, la méthodologie mise en œuvre pour y parvenir, les éléments d'interprétation proposés – pour étayer la décision qui a alors été prise d'interdire au moins provisoirement la consommation de bœuf britannique dans l'ensemble de l'Union Européenne.

Une décision a ainsi été prise, dans le cas de la maladie de la vache folle, en référence à une science incertaine acceptée comme fiable sur la base de critères méthodologiques rigoureux. On peut en d'autres termes dire qu'une approche rationnelle du principe de précaution a ainsi été mise en œuvre. Il en a été différemment dans le cas des maladies résultant de l'exposition à l'amiante. Beaucoup de cancérologues pensent que, dès les années 1950, la science médicale en matière d'effets de l'exposition à l'amiante – bien qu'encore dans une certaine mesure incertaine – était suffisamment fiable pour justifier une interdiction générale, qui n'est venue que 40 ans plus tard. Dans les deux cas, il n'était ni

socialement ni économiquement optimal d'attendre pour prendre une décision que la science soit devenue certaine ; le drame de l'amiante peut à cet égard être compris comme une défaillance majeure de la précaution(5).

[2] Depuis une vingtaine d'années se sont développées des approches structurées et rigoureuses de la décision en incertitude, c'est-à-dire des approches permettant un usage approprié d'une information incertaine dont il faut apprécier rationnellement la fiabilité. Certaines de ces approches montrent le décideur se représentant la situation, à laquelle il est confronté, au moyen d'une batterie de distributions de probabilités – certaines d'entre elles donnant plus de poids aux scénarios défavorables, et d'autres aux scénarios favorables – et, pour formuler une décision, pondérant ces distributions sur la base de sa plus ou moins grande aversion pour l'incertitude(6). Il s'agit d'une généralisation de la méthode de von Neumann et Morgenstern pour la prise de décision en situation de risque ; dans la *Stern Review*, elle est décrite de la manière suivante :

« Le décideur agit comme s'il suivait une procédure formelle le conduisant à choisir l'action qui maximise une moyenne pondérée du meilleur niveau d'utilité et du pire, ces niveaux étant calculés à partir d'un ensemble de distributions de probabilités endogènes à la procédure de choix. Le poids attribué par le décideur au pire niveau d'utilité peut être influencé par l'ampleur de menaces auxquelles il serait exposé, par la perception qu'il en aurait, par la plausibilité à ses yeux des diverses distributions de probabilités considérées,... Ce poids est une mesure de son aversion pour l'incertitude. »

Il apparaît que les grandes compagnies mondiales de réassurance (München Re, Suisse de Réassurance, Partner Re, Score,... ce sont les assureurs des assureurs), qui ne sont certainement pas portées à adopter des innovations à la légère, utilisent ce type de méthodes afin de décider quels contrats offrir lorsqu'il s'agit de couvrir des menaces (désastre naturel ou industriel par exemple) à propos desquelles elles ne disposent pas de séries statistiques satisfaisantes. Il apparaît également que des consultants spécialisés dans l'évaluation des portefeuilles de contrats signés par des compagnies d'assurance et de réassurance utilisent eux aussi dans leurs processus d'évaluation des batteries de distributions de probabilités, et non plus des distributions de probabilités réputées moyennes, qui en réalité effacent ce que la connaissance incertaine véhicule d'information utile. D'une manière générale, on

peut dire que refuser ou négliger la connaissance (partiellement) incertaine, c'est refuser ou négliger une quantité souvent considérable d'information qui ne peut pas être ignorée sans dommage le cas échéant lui aussi considérable, information qui comme on vient de le voir peut être utilisée rationnellement.

En ce qui concerne le changement climatique, des résultats récents montrent qu'une approche structurée de la décision en incertitude, telle que présentée ci-dessus, peut modifier significativement l'analyse coûts-avantages d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Dans *Ambiguity and Climate Policy*, Millner, Dietz et Heal concluent que « *la valeur des réductions d'émissions augmente – fortement dans certaines conditions – lorsque l'aversion à l'ambiguïté [c'est-à-dire à l'incertitude intrinsèque] augmente.* »

[3] Les signaux d'alerte constituent une autre classe d'instruments pour traiter l'incertitude lorsqu'elle se présente sous la forme suivante : un système dynamique complexe dérive-t-il vers un point de basculement, c'est-à-dire un point où le système est susceptible de bifurquer vers une trajectoire aux caractéristiques profondément différentes de celles de la trajectoire actuellement parcourue ? Répondre à cette question peut représenter un enjeu vital, mais est en général très difficile. Des avancées récentes, tant expérimentales que théoriques, permettent de penser que ce n'est pas impossible dans certains contextes.

Van Nes et Scheffer ont montré en 2007 que « *la capacité de récupération des effets d'une perturbation relativement petite est un bon indicateur de la santé de l'écosystème considéré, dans la mesure où cette capacité décroît à l'approche d'un point de basculement.* » Les cas d'application étudiés sont la qualité de l'eau dans un lac menacé d'eutrophisation, et la concurrence entre espèces dans un milieu écologiquement fragile.

Dakos et ses coauteurs ont identifié, dans une étude paléoclimatique publiée en 2008, des signaux d'alerte pour huit modifications abruptes du climat survenues dans des temps géologiques plus ou moins lointains. Eux-mêmes et d'autres chercheurs travaillent sur la transposition de ces résultats au contexte du changement climatique actuel.

3. INCERTITUDE FABRIQUÉE ET SCIENCE MANIPULÉE

Au cours des décennies 1950 et 1960, un nombre croissant d'études épidémiologiques ont mis en évidence les effets du tabac sur la santé. Conscients du danger, les producteurs américains de cigarettes, American Tobacco, Benson and Hedges, Philip Morris, R. J. Reynolds,... ont organisé une contre-offensive vigoureuse au travers d'institutions pouvant passer pour scientifiques, et en apparence indépendantes de leurs créateurs et bailleurs de fonds. La première a même porté un nom très respecté aux États-Unis : Alexis de Tocqueville Institution (François de la Rochefoucauld y aurait peut-être vu un "hommage du vice à la vertu", *Maximes*, 218). Ces institutions ont recruté des scientifiques dont les états de service passés comptaient plus que la compétence médicale. À cette structure verticale a été confiée la mission de mettre en évidence – en les exagérant le cas échéant – les lacunes et incertitudes des études mettant en cause l'industrie du tabac, et de communiquer à ce propos dans les media avec le maximum d'efficacité. Ainsi, et en utilisant tous les recours juridiques possibles, l'industrie du tabac a-t-elle pu repousser les échéances, et donc maintenir des profits élevés, jusqu'au début du 21ème siècle.

Le tabac a été le banc d'essai de cette stratégie ; avec le climat elle donne sa pleine mesure. Les entreprises qui orientent et qui financent sont plus nombreuses et plus diversifiées : Exxon Mobil, BP, Shell, Peabody (première entreprise charbonnière américaine), Ford, General Motors, Koch Industries (la plus grande entreprise industrielle personnelle aux États-Unis, possédée et contrôlée par les frères Koch, sympathisants actifs du Tea Party), quelques-unes des plus grandes entreprises productrices d'électricité,... Les pseudo-institutions scientifiques qui leur sont subordonnées sont aussi plus nombreuses, 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,... Le nombre de scientifiques sollicités augmente lui aussi, avec une constante : ils ne sont pas davantage climatologues (à une exception près) que leurs prédécesseurs n'étaient médecins. Ces scientifiques sont épaulés par des spécialistes des media, certains d'entre eux particulièrement efficaces comme Frank Luntz cité ci-dessus, et Mark Moreno qui a par ailleurs coordonné en 2004 l'opération Swift Boat Veterans

for Truth, laquelle a porté un coup sévère à la campagne présidentielle du candidat démocrate John Kerry.

Dans cette entreprise de déni du changement climatique, et surtout de déni de la contribution humaine au changement climatique, quelles sont les principales méthodes mises en œuvre pour la conduite des opérations ?

- En appeler au "bon sens". Par exemple : « *Comment peuvent-ils avoir la moindre idée de ce que sera le climat dans cent ans, alors qu'on ne peut pas prédire le temps qu'il fera dans quelques mois ?* » (Timothy Ball, de Friends of Science, dans une interview au *Globe and Mail* de Toronto, 12 août 2006).
- Ne pas céder aux arguments scientifiques, aussi bien établis soient-ils. C'est ce qu'observent Oreskes et Conway dans leur livre *Merchants of Doubt*, qui fait référence en la matière : « *Ils continuent à soutenir des positions qui ont été réfutées dans la littérature scientifique, et les media les présentent alors comme des contributions à un débat scientifique qui se poursuit légitimement.* »
- Faire passer l'honnêteté scientifique pour de l'incompétence. Un autre observateur averti, Hoggan, met en lumière le procédé dans son livre *Climate Cover-up* : « *Les scientifiques sont prompts à le reconnaître, quand quelque chose n'est pas rigoureusement correct. Leurs adversaires ont ainsi obtenu nombre d'excuses, corrections, réinterprétations, qui sont utilisées comme preuve que la science en cause est incertaine et fragile.* »
- Sans doute l'arme la plus efficacement utilisée pour entretenir et gonfler le doute à l'égard de la science et des scientifiques est-elle l'exigence d'équilibre (*balance*) dans les media. Le Premier Amendement à la Constitution des Etats-Unis protège rigoureusement l'expression de la pluralité des opinions ; il est impératif qu'aucune position politique, morale, artistique,... ne soit lésée. Cependant, ni des observations ni des lois scientifiques ne sont des opinions. Certes la méthode scientifique les soumet à des vérifications et des débats selon des règles strictes. Quel sens en revanche y a-t-il à les confronter dans des débats médiatiques soi-disant équilibrés (*balanced*) à des mascarades scientifiques, à des affirmations aussi vigoureusement assénées que pauvrement justifiées ? Aucun sens, sinon d'assimiler la science à une opinion parmi d'autres, sans le crédit particulier que justifie la méthode par laquelle elle est produite et contrôlée. De toutes celles mises en œuvre, cette méthode semble avoir été la plus dommageable pour la crédibilité de la science du climat dans

l'opinion et le monde politique américains : tout n'est plus qu'incertitude et relativisme.

Les effets ? L'enquête annuelle du Pew Research Center sur les perceptions des Américains en matière de changement climatique révèle qu'en 2006, 79 % d'entre eux considéraient comme scientifiquement établi que la terre se réchauffe, et 50 % que ce réchauffement est dû aux activités humaines. En 2010, les chiffres correspondants sont 53 % et 34 %. Les effets ne se limitent pas à l'Amérique. Dans les pays émergents, Chine et Inde en particulier, s'ancre l'idée que l'appel à lutter contre le changement climatique est une conspiration des pays développés -puisqu'ils n'y croient pas vraiment – pour priver les autres de leurs moyens de développement.(7)

4. CONCLUSION

Elle a déjà, à peu de chose près, été formulée dans l'Antiquité,

- par Platon dans le *Gorgias* (Première partie) : « *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.* »
- par Virgile dans l'*Enéide* (Chant 2 : Enée raconte à Didon les derniers jours de Troie) : « *Aveuglés de folie nous plaçons le monstre de malheur dans l'enceinte sacrée de la citadelle. Alors Cassandre ouvre la bouche, dévoilant nos malheurs futurs, Cassandre que, par la volonté d'un dieu, les Troyens n'ont jamais crue. Et nous, malheureux dont c'était le dernier jour, par toute la ville nous orons de feuillages les sanctuaires des dieux comme pour une fête.* »

Le dieu, c'est Apollon. Il apparaît qu'il est aujourd'hui remplacé par Exxon Mobil, Murdoch, le Tea Party, et tous leurs pareils.

5. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Akerlof, G. (1970), "The Market for Lemons : Quality Uncertainty and the Market Mechanism", *Quarterly Journal of Economics*, 84 : 488-500.

Dakos, V., M. Scheffer, E. van Nes, V. Brovkin, V. Petoukhov and H. Held (2008), "Slowing Down as an Early Warning Signal for Abrupt Climate Change", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105 : 14308.

Etner, J., M. Jeleva and J.-M. Tallon (2012), "Decision Theory under Ambiguity", *Journal of Economic Surveys*, 26 : 234-270.

European Environmental Agency (2001), *Late Lessons from Early Warnings : The Precautionary Principle 1896-2000*, Copenhagen : EEA Environmental Issue 22.

Fermi, L. and G. Bernardini (2003), *Galileo Galilei and the Scientific Revolution*, New York : Dover.

Foucart, S. (2010), *Le populisme climatique*, Paris : Denoël.

Heisenberg, W. (1969), *Der Teil und das Ganze*, München : R.Piper.

Henry, C. et M. Henry (2003), "Etat de la connaissance scientifique et mobilisation du principe de précaution", *Revue Economique*, 54 : 1277-1289.

Hoggan, J. (2009), *Climate Cover-up : the Crusade to Deny Global Warming*, Vancouver : Greystone Books.

Keynes, J.M. (1921), *A Treatise on Probability*, London : Macmillan.

Klibanoff, P., M. Marinacci and S. Mukerji (2005), "A Smooth Model of Decision-Making under Ambiguity", *Econometrica*, 73 : 1849-1892.

Millner, A., S. Dietz and G. Heal (2010), *Ambiguity and Climate Policy*, NBER Working Papers 16954.

Oreskes, N. and E. Conway (2010), *Merchants of Doubt*, New York: Bloomsbury Press.

Pollack, H. (1997), *Uncertain Science... Uncertain World*, Cambridge University Press.

Scheffer, M., J. Bascompte, W. Brock, V. Brovkin, S. Carpenter, V. Dakos, H. Held, E. van Nes, M. Rietkerk and G. Sugihara (2009), "Early-Warning Signals for Critical Transitions", *Nature*, 461 : 53-59.

Stern, N. (2006), *Stern Review Final Report*, London : HM Treasury.

Van Nes, E. and M. Scheffer (2007), "Slow Recovery from Perturbations as a Generic Indicator of a Nearby Catastrophic Shift", *The American Naturalist*, 169 : 738-74.

Von Neumann, J. and O. Morgenstern (1944), *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press.

NOTES

(1) Dans une lettre à Robert Hooke (1676), Newton écrit « *If I have seen further, it is by standing on the shoulders of giants* » (version plus percutante d'une formule utilisée plusieurs siècles auparavant par Bernard, Chancelier de l'École de la Cathédrale de Chartres). Galilée a plus d'une fois désigné comme ses géants les grecs Euclide et Archimède, ainsi que les astronomes qui l'ont directement précédé, Copernic et Kepler. Newton ajoutait Descartes pour sa géométrie analytique qui fusionne la géométrie pure, héritage grec, et l'algèbre, héritage largement indo-islamique. Le titre du traité le plus connu dans cet héritage a d'ailleurs suggéré le nom d'algèbre à des savants andalous (*Al-kitab al mukhtasar fi hisab al-jabr wal muqabala*, c'est-à-dire Traité de calcul par transposition et réduction) ; il est dû au savant ouzbek Ibn-Musa al-Khwarizmi qui, au 9ème siècle, a longtemps travaillé à Bagdad, à la Maison de la Sagesse fondée par le calife Haroun al-Rachid. C'est bien d'un réseau issu de très loin qu'est née la méthode scientifique, mais certains des nœuds de ce réseau sont plus stratégiques que d'autres.

(2) Voir Heisenberg (1969) et la lettre écrite par Einstein à Max Born le 4 décembre 1926 ; cette lettre est reproduite dans *Born-Einstein Briefwechsel 1916-1955*.

(3) Pour les Nazis cependant, la mécanique quantique était inacceptable pour des raisons idéologiques.

(4) Voir Akerlof (1970).

(5) Voir European Environmental Agency (2001).

(6) Voir Klibanoff et al. (2005), Etner et al. (2009), Henry et Henry (2003).

(7) La situation en France est analysée dans Foucart (2010).