



HAL
open science

Sur la science des risques et les risques de la science

Nicolas Bouleau

► **To cite this version:**

| Nicolas Bouleau. Sur la science des risques et les risques de la science. 1992. halshs-00448203

HAL Id: halshs-00448203

<https://shs.hal.science/halshs-00448203>

Preprint submitted on 20 Jan 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SUR LA SCIENCE DU RISQUE ET LES RISQUES DE LA SCIENCE

117ème Congrès National des Sociétés Savantes,
Clermont-Ferrand, 26-30 Octobre 1992,
Section histoire des sciences et des techniques

Nicolas Bouleau

Les épistémologues tentent de rendre compte du processus de construction des connaissances qu'on appelle science, avec plus ou moins de bonheur devant la prodigieuse complexité du phénomène. Par le couplage des spécialisations et des synthèses partielles, par le jeu concomitant d'une maîtrise croissante de la combinatoire grâce à l'informatique, d'une meilleure utilisation des connaissances par les entreprises et de l'amélioration de l'efficacité de la recherche par le développement économique, la science avance en hiérarchisant ses rapports avec le réel et la technique se transforme en complexifiant les solutions qu'elle met en œuvre. La conséquence de ce processus est que de plus en plus souvent l'ouvrage, l'équipement ou le système qui est la solution moderne d'un problème est la cause insoupçonnée de difficultés nouvelles. Que l'on pense, par exemple, à la pollution par le plomb engendrée par l'automobile, au problème des déchets nucléaires, à la couche d'ozone attaquée par les CFC, aux conséquences du barrage d'Assouan, etc. Les principales difficultés sur lesquelles les scientifiques butent aujourd'hui sont les résultats de transformations technologiques liées au progrès de la science. En avançant la science fabrique aussi de l'ignorance. Sans doute cet effet a toujours existé depuis le début de l'ère historique, ce qui est nouveau c'est l'ampleur du phénomène. Devant de tels risques quelle attitude peut-on avoir ? Comment la société peut-elle prendre conscience de ces risques, comment peuvent se répartir les responsabilités ?

L'attitude classique, consiste, ici comme ailleurs, à faire appel à la science : la science du risque utilisant la théorie des probabilités avec les outils de la statistique. Mais n'est-ce pas là un tour de passe-passe ? Une attitude hyperpositiviste ? La science peut-elle quantifier les ignorances de la science ?

L'analyse du langage de l'ingénieur et l'étude de l'élaboration des projets permettent de mieux dégager où se situe la ligne de démarcation entre l'univers probabilisable et les ignorances pures et simples, Il devient alors possible d'envisager une attitude différente vis à vis des risques scientifiques et technologiques, plus modeste, plus pragmatique aussi, qui consiste à prendre la mesure des ignorances en faisant fonctionner l'imagination créatrice des scientifiques dans le sens de la critique. Une telle attitude répartit nécessairement les responsabilités d'innovation différemment dans le corps social.

1. Diverses façons de simplifier la science

Si "la science est la théorie du réel" c'est-à-dire la représentation actuelle pertinente du monde, elle ne constitue pas pour autant directement un cadre pour l'action, d'abord parce que l'objectivité et l'universalité qui sont présentes, au moins idéalement, dans la démarche scientifique exigent une distanciation par rapport à l'intérêt des acteurs, ensuite parce que les situations particulières portent des spécificités telles qu'elles ne se réduisent pas à des instances de théories générales, Ces limitations épistémologiques n'empêchent

pas les concepteurs d'utiliser la science dans leur démarche, bien au contraire. Ceci est vrai non seulement pour l'ingénieur, le technicien, l'architecte ou l'aménageur mais pour tous les citoyens et particulièrement dans les pays technologiquement avancés ou chacun dans sa vie quotidienne professionnelle, familiale et culturelle utilise des connaissances scientifiques.

Cependant les connaissances que la science tient pour valides sont trop compliquées pour être utilisables en l'état. On a besoin de choses plus simples à la fois dans leur interprétation c'est-à-dire sémantiquement et dans leur combinatoire c'est-à-dire formellement.

Prenons quelques exemples:

- Une construction, disons une école, un immeuble d'habitation ou installation industrielle, est en cours d'étude, les options techniques et géométriques sont encore infiniment nombreuses. On a besoin à ce stade de méthodes rapides pour dimensionner la structure. On peut utiliser des calculs en élasticité linéaire et les méthodes regroupées sous le terme de *résistance des matériaux*, même si en toute rigueur ces théories sont fausses.

- On veut optimiser la circulation des automobiles dans une ville. Le nombre des possibilités de rythme de feux est gigantesque, on remplace les voitures par un fluide et on utilise des équations aux dérivées partielles de la mécanique des fluides.

Pour ces estimations simplifiées, l'ingénieur a dans sa besace des théories anciennes qui ne sont plus valides aujourd'hui qu'en un sens asymptotique telles que la résistance des matériaux, l'optique de Gauss, la théorie des gaz parfaits, la théorie de la houle linéaire d'Airy, etc. ainsi que les sciences de l'ingénieur (hydraulique, acoustique, mécanique des sols, thermique, etc.) qui constituent des cadres de concepts cohérents permettant l'élaboration rapide de modèles commodes. Notons déjà, nous y reviendrons, qu'on ne peut se faire une idée de l'erreur de ces modélisations sans sortir de ces cadres de pensée et utiliser des représentations plus fines ou en tout cas différentes. L'ingénieur dispose aussi d'un attirail de méthodes mathématiques d'interpolation, d'osculation par des fonctions simples (fonctions de Bézier, fonctions splines, développements en séries de polynômes ou d'ondelettes etc.) permettant d'accélérer un programme lourd dans le champ utile des paramètres, réalisant ainsi (sans support sémantique nouveau) un modèle "tangent" plus simple. Plusieurs de ces méthodes peuvent être utilisées simultanément et constituent un corpus de symboles et de concepts au sein duquel des raisonnements et des argumentations sont échangés entre les acteurs. Evidemment en général le modèle "correct" sous-jacent n'est pas connu et ces "petites théories" sont vécues comme des visions d'une certaine "réalité".

Le point que nous voudrions souligner est que les "langages scientifiques simplifiés" ont tendance à mettre l'ignorance partielle, dans laquelle on se trouve en fait, dans une certaine perspective qui est trompeuse parce qu'elle ne sort pas de la catégorie de pensée dans laquelle le discours est élaboré. Alors que d'autres modélisations fondées sur des idées différentes montrent que l'ignorance est bien plus vaste qu'on pouvait le croire. Un exemple est ici utile: Si on utilise la très célèbre "théorie" des processus ARMA (processus gaussiens autorégressifs moyennes mobiles) pour modéliser la série temporelle des hauteurs d'eau de la Seine, on est induit à croire que si le nombre des mesures augmente, un modèle ARMA(p,q) avec davantage de paramètres va représenter avec plus de précision la réalité ainsi dégagée. La théorie, adaptable à un accroissement des données, devient non réfutable par l'expérience, non obstant le fait que bien d'autres modélisations le sont tout autant (celle qui considère que *les débits* sont gaussiens, celle qui considère que *les logarithmes* des hauteurs d'eau sont gaussiennes, les modèles non gaussiens etc.).

Ainsi on perçoit que ce qu'on peut appeler les "langages d'ingénieurs", en introduisant des modes d'approximation du réel considérés comme "naturels", dissimulent un certain nombre d'hypothèses dont ils tendent même à rendre l'expression impossible. Ce n'est qu'en sortant du type de modélisation proposé, en changeant de langage qu'on peut prendre la mesure des ignorances et donc des risques ainsi dissimulés. (Dans le cas des

modèles de trafic par exemple, en plus du langage de la mécanique des fluides il y a celui des flux de particules ou ceux des réseaux de files d'attente, etc.).

Le cas de la réalisation d'un ouvrage d'art ou d'un grand équipement est particulièrement intéressant et mérite d'être examiné plus au détail. Ce sont des objets "sur mesure" pour lesquels une préconception est nécessaire qui en constitue le **projet**, les langages d'ingénieurs sont utilisés dans une élaboration sociale conduisant à des choix techniques et spatiaux et sont un des modes par lesquels les décisions sont obtenues. Ils contribuent donc à ce processus complexe et curieux par lequel la société accepte finalement certains risques explicités (parfois quantifiés) et accepte aussi d'en ignorer d'autres.

2. Utilisation de la science pour concevoir : le projet, son parti, et sa justification.

On distingue classiquement, aussi bien en architecture que pour les systèmes technologiques, trois ordres de préoccupation qui conditionnent l'élaboration d'un projet : la forme, la structure, la fonction. La fonction est ce à quoi sert l'ouvrage. Elle peut être multiple : un barrage est à la fois une liaison routière, une source de production d'énergie, un moyen de réguler un fleuve, d'élever le niveau phréatique et de diminuer l'érosion, etc. Elle est parfois exprimée avec le langage des organigrammes et des graphes. La structure est le principe constructif de l'ouvrage. S'il s'agit d'un pont ce peut être un tablier précontraint sur appuis simples, une voûte autoportante, un tablier suspendu ou haubané etc.

Pour analyser le processus de conception il est important de se rendre compte que la fonction, même définie avec la plus grande rigueur n'est jamais déterminante de la forme. (Les courants architecturaux fonctionnalistes — Mies van der Rohe, etc. — ne sont, on le sait bien, qu'un style parmi d'autres avec ses propres coquetteries.) De même la fonction ne détermine pas le choix de la structure et le couple fonction-structure laisse le projet encore largement formellement indéterminé.

Sous cet angle, et c'est la philosophie courante, le rôle du concepteur est précisément de prendre des choix, d'exhiber parmi toutes les solutions possibles du problème une organisation qui, selon une certaine argumentation, peut être défendue vis à vis d'autres choix. Un maximum local dans le vocabulaire de l'optimisation. C'est là que réside le "génie" de l'ingénieur: choisir *un parti* eu égard à de multiples critères.

Le souci bien naturel, et renforcé par le jeu social des décideurs, de rendre la critique plus difficile conduit à des pratiques qui accentuent les effets inhérents aux langages d'ingénieurs:

- a) obtenir absolument des résultats numériques,
- b) utiliser le maximum d'esotérisme dans l'appareil mathématique qui accompagne le calcul (qui se limite souvent à l'inversion d'une matrice) de sorte que le travail d'ingénieur ne puisse pas être défait facilement,
- c) masquer l'ignorance par des concepts probabilistes.

Je ne ferai ici que citer quelques situations typiques [voir aussi C. Henry (1991)] en m'excusant de leur technicité, due au fait que ce sont des exemples effectivement rencontrés et non des cas d'école :

- Pour le calcul des structures soumises aux intempéries, (notamment offshore), la méthode dite de linéarisation statistique consiste à remplacer l'équation stochastique non linéaire qui régit la réponse de la structure à la houle

$$g(Y, \dot{Y}, \ddot{Y}) = X(t)$$

où $X(t)$ représente les actions (processus stochastique à valeurs R^n) et $Y(t)$ la réponse de la structure paramétrée, par l'équation linéaire

$$m \ddot{Y} + c \dot{Y} + kY = X(t)$$

en choisissant m, c, k , de sorte que l'erreur

$$g(Y, \dot{Y}, \ddot{Y}) - m \ddot{Y} - c \dot{Y} - kY$$

soit un processus de variance minimale. Comme on ne sait résoudre que l'équation linéaire, cette minimisation est faite pour Y solution de l'équation linéarisée, ce qui fournit les conditions donnant m, c, k . On obtient quelque chose, évidemment, quelque chose d'aléatoire, mais la logique de cette "production" est pour le moins discutable.

- Les problèmes de "clôture" dans la méthode des perturbations ou dans la méthode des moments. Lors de la modélisation de la diffusion dans l'eau souterraine des particules radioactives dues au stockage des déchets nucléaires dans une roche dont les propriétés sont mal connues (donc considérées comme aléatoires !) on rencontre le problème de trouver la loi d'un processus aléatoire stationnaire qui vérifie une certaine équation vectorielle non linéaire:

$$(*) \quad h(Y, \dot{Y}) = 0 \quad \text{par exemple } \dot{Y} = F(Y) + G(t).$$

Selon le bon principe que toute loi de probabilité est approximativement gaussienne, on cherche l'espérance de Y en prenant l'espérance dans (*) mise sous forme développée, mais ceci fait intervenir la variance et le calcul de la variance fait intervenir des moments d'ordre supérieur etc. Alors, soit on tronque les développements à l'ordre 2 en supposant Y gaussien, soit on suppose que la loi de Y n'a qu'un nombre fini de cumulants non nuls:

$$E[e^{iuY}] = e^{P(u)}, \quad P \text{ polynôme}$$

ce qui est une pratique courante, non obstant un théorème apparemment peu connu de Marcinkiewicz établissant qu'il n'y a pas de loi avec un nombre fini de cumulants non nuls hors mis les gaussiennes.

- Mentionnons aussi la fameuse méthode des lois de valeurs extrêmes, avec laquelle, par exemple, on est en train de calculer la probabilité de ruine par le vent du pont de Normandie. Ce pont à haubans étant de portée plus grande que ceux réalisés en France à ce jour, la répartition spatiale du vent à l'échelle de l'ouvrage est inconnue et des extrapolations sont nécessaires. Dans ce genre d'affaire, aussi bien que pour la prévision des crues, des inondations, des risques nucléaires etc., sévit une méthode qui fabrique véritablement de l'information là où il n'y avait qu'ignorance. Elle consiste étant donné un nombre fini d'observations X_1, \dots, X_n ,

a) d'après les informations dont on dispose *a priori* sur la loi commune des X_i , à chercher laquelle des trois familles de lois de valeurs extrêmes est atteinte dans le théorème (asymptotique) des types

b) à caler les paramètres d'une loi de cette famille grâce aux extrêmes de l'échantillon lui-même

c) à déduire de la loi ainsi calée les probabilités d'événements rares (queue de la loi des X_i). On a donc maintenant des informations sur la probabilité de mesures d'observation complètement extérieures aux valeurs de l'échantillon.

Pour plus de détails, et pour les problèmes de changement d'échelle non linéaire dans les lois de valeurs extrêmes, cf. [Bouleau (1991)].

Le même genre de "cuisine" se rencontre évidemment aussi dans des calculs purement déterministes. Il y a cependant une tendance actuelle à mettre des probabilités partout. On parle de risques, et on fait comme si l'univers était un espace (Ω, \mathcal{A}, P) . Il y a lieu d'être très attentif à ce qui relève d'une modélisation probabiliste et à ce qui n'est purement et simplement qu'ignorance. Obtenir une vision probabiliste du monde, par l'inférence statistique est chose aisée mais cela installe une rationalité en dissimulant les ignorances réelles. Plus intéressant et plus difficile est de faire la part des phénomènes qui relèvent réellement d'une modélisation probabiliste parce qu'ils sont engendrés par quelque généralisation du jeu de pile ou face, et ceux qui sont régis par des lois déterministes qu'on ignore ou dont on ignore les modalités d'application à la situation spécifique concernée. Il faut admettre que la science ne "couvre" qu'une partie du réel et en particulier les systèmes dont on ne connaît pas l'évolution soit par indécidabilité formelle, soit par conflit entre

intérêts individuels et collectifs, ne sont pas pour autant régis en quoique ce soit par une quelconque probabilité. En connexion avec les questions d'ignorance cf. [I. Ekeland (1991)].

Les exemples ci-dessus pourraient être analysés davantage sous l'angle épistémologique. Cela montrerait que la prétention des modèles d'être — implicitement — "approximation" de la réalité, n'est pas anodine mais le lieu du passage entre une attitude descriptive et un discours prescriptif. Nous voulons juste souligner ici que la philosophie qui sous-tend la pratique d'accorder une "confiance provisoire" à des représentations obtenues en poussant les langages classiques au delà de leur paradigmes éprouvés — méthode courante bien avant que Karl Popper ne la systématise — en se disant plus ou moins que le jeu des forces économiques viendra de toute façon faire le tri entre ce qui est pertinent et ce qui ne l'est pas, cette attitude, non seulement est dangereuse eu égard à un principe général de précaution dans le domaine de l'environnement où des phénomènes irréversibles sont à craindre, mais elle est *une manière de ne pas penser* les possibles, ce qui est pourtant le plus intéressant et le plus riche en situation d'incertitude.

3. Répartition des responsabilités de conception

Dans la pratique actuelle, Il y a scission du travail : d'un côté la science et ceux qui l'étendent, la restructurent et la perfectionnent, de l'autre ceux qui l'utilisent et assument la fonction sociale de la manière de s'y prendre, notamment par l'intermédiaire de la notion de projet en tant que processus social. La responsabilité du concepteur est alors codifiée juridiquement. Désigné par le terme de maître d'œuvre dans le bâtiment et le génie civil, il est soumis à des assurances obligatoires et le partage avec les responsabilités financières (maître d'ouvrage) est réglé par contrat.

Lorsqu'une catastrophe survient, par exemple lorsque le barrage voûte de Malpasset a cédé, une grande activité des divers acteurs s'est déployé pour la recherche des causes et la réparation des dommages, mais aux yeux de l'opinion publique le responsable désigné fut l'ingénieur maître d'œuvre André Coyne, au demeurant mis hors de cause par tous ses collègues scientifiques et techniciens, décédé quelque temps après de maladie. On notera qu'on n'a pas fait remonter les responsabilités à Archimède et à sa poussée, ni même aux professeurs des cours d'ouvrages d'art ni aux mécaniciens Saint Venant et Navier qui ont préconisé certaines modélisations ni aux mathématiciens appliqués qui ont proposé des méthodes d'approximation pour le calcul des contraintes dans l'ouvrage et dans la roche.

Ce partage des responsabilités ne peut être pertinent que sous deux conditions minimales qui ne semblent plus toujours réunies aujourd'hui :

- 1) il existe un corpus de connaissances reconnu, bien établi, et disponible par tout un chacun,

- 2) Les divers choix compatibles avec la théorie sont relativement indifférents aux usagers et ne les scindent pas en groupes d'intérêt divergents.

Le domaine de l'environnement fournit de nombreux exemples où ces conditions ne sont pas remplies. D'abord il n'y a pas de corpus de référence bien établi: Les spécialistes ne sont pas d'accord, causes et effets n'étant pas dissociables. Claude Allègre préconise de rejeter les phosphates et nitrates en haute mer. Voici un exemple de projet: "Nous suggérons de jeter en pleine mer (pas près des côtes !) le lisier des élevages bretons, en même temps que les déchets des exploitations minières de fer ou les surplus de phosphates et de nitrates. Tous ces déchets ne peuvent être que bénéfiques" écrit-il. La pratique de la modélisation des systèmes instables inciterait à plus de prudence. La prolifération d'une espèce particulière peut être catastrophique pour un grand nombre d'autres (on l'a vu avec l'eutrophisation des lacs, les algues en mer du Nord ou à Venise et avec *Caulerpa Taxifolia* en Méditerranée). En général pour la plupart des risques sur l'environnement. il y a indétermination scientifique: On ne sait pas. Cela a été étudié par J. P. Moatti (1989) dans le cas du risque technologique majeur.

Ensuite, évidemment, les choix ne sont pas indifférents aux usagers et relèvent d'une procédure politique. Dans le cas de projets ayant des conséquences complexes pour la collectivité on n'est plus aujourd'hui fondé de faire totalement confiance ni aux hommes de science ni aux ingénieurs.

D'une part parce qu'ils ne peuvent garantir l'examen exhaustif des causes susceptibles d'entraîner un accident (on peut rappeler que le TGV atlantique, fleuron de la technologie française est tombé quatre fois en panne durant l'été 1991) C'est la même chose en ce qui concerne l'exhaustivité des effets (la solution du problème de sécurité incendie par flocage d'amiante au campus universitaire de Jussieu n'a pas résolu celui de la protection contre le cancer !)

D'autre part, et surtout, à cause de la dynamique propre des groupes sociaux que sont les scientifiques et les ingénieurs dans le contexte actuel de l'élaboration des carrières individuelles : Déjà en 1974 Alexandre Grothendieck écrivait "l'immense majorité des scientifiques sont tout à fait prêts à accepter leur rôle de prêtres et de grands prêtres de la religion dominante d'aujourd'hui [le scientisme]. Ils réagiront à toute attaque contre cette religion ou l'un de ses dogmes ou l'un de ses sous-produits avec toute la violence émotionnelle d'une élite régnante aux privilèges menacés". Plus récemment des sociologues contemporains tels que Michel Callon décrivent les "arrangements" qui se mettent en place entre "le scientifique qui attend avec angoisse le jugement de son collègue, l'ingénieur qui s'efforce de passer du prototype au pilote sans divulguer d'informations et le consommateur qui ne veut pas de panne et qui guette dans le regard de son voisin un signe de reconnaissance sociale". Il y a un parallèle saisissant entre l'usage croissant par les acteurs économiques du World Competitiveness Index, indice classant les entreprises d'après leur compétitivité élaboré par l'institute for Management Development et l'usage croissant du Science Citation Index élaboré par l'institute for Scientific Information éditeur du Current Contents.

Plus fondamentalement, on peut dire que la dynamique sociale propre des carrières scientifiques met l'accent sur **l'audace** alors qu'on cherche des solutions qui garantissent la sécurité collective. Ainsi, en grossissant le trait, le scientifique ou l'ingénieur brillants ont tendance à vouloir faire prendre des risques à l'humanité parce que c'est en prenant des risques intellectuels qu'ils ont eux-mêmes réussi. On est en droit de penser d'ailleurs que ce qu'on appelle la méthode scientifique (ce qui laisse croire faussement que la direction de développement est univoque) a été élaborée dans une période de l'humanité de conquête de la nature et qu'il se pose aujourd'hui des problèmes nouveaux dont les responsabilités ne peuvent être assumées que par des instances collectives dont la logique ne se limite pas à accepter des tentatives dont la seule justification serait leur "réfutabilité" ultérieure éventuelle.

Lorsqu'un ouvrage ou un aménagement est réalisé, les incertitudes probabilisables qui interviennent dans son fonctionnement et dans les conséquences de sa réalisation ne sont que la partie émergée des risques, ceux qui s'explicitent dans les langages employés. La majeure partie est cependant cachée et provient d'ignorance pure qui ne relève pas de la théorie des probabilités ni de la statistique. Actuellement, le plus souvent, pour faciliter la réalisation du projet, le concepteur consciemment ou non, camoufle ces ignorances, au lieu, dans un souci de transparence, de tenter de les expliciter. Il est vain d'espérer obtenir ces risques cachés alors que la conception de l'ouvrage est régie selon le principe du despote éclairé. Loin de nous l'idée d'imaginer une société sans risques, bien au contraire, il y a plus de risques que ce que l'on veut croire selon les pratiques actuelles. Comment prendre la mesure, autant qu'on peut de ces ignorances génératrices de dangers ? Il n'y a qu'une voie : inventer des modélisations différentes compatibles avec les données, relever les hypothèses implicites, construire des solutions qui jalonnent l'étendue du possible. Les bureaux d'étude doivent savoir non seulement travailler pour justifier mais aussi pour critiquer des choix. Par l'enseignement et la pédagogie il convient de sensibiliser les ingénieurs aux limitations des théories scientifiques et de leurs applications, au lieu de

recevoir une formation qui actuellement n'est qu'un abrégé de positivisme. La critique scientifique de dossiers de projets est une discipline qui devrait être incluse à part entière des cursus en dernière année pré-professionnelle des formations d'ingénieurs. Les ingénieurs doivent admettre le principe que des risques sont occultés par un langage et un processus de conception. Plutôt que de se retrancher dans une dangereuse paranoïa de compétence offensée [D. Duclos (1989)] c'est en jouant la transparence qu'ils permettront, par des critiques imaginatives, aux responsabilités de se répartir dans la société.

Bibliographie

- Rapport Brundtland, Commission mondiale sur l'environnement et le développement. *Notre Avenir à tous*, les Editions du Fleuve Montréal, (1988).
- I. Ekeland, hasard et probabilités, in *Conquête de la sécurité, gestion des risques, logique sociales*, Éditions l'Harmattan (1991).
- Cl. Henry, Fait accompli et normes techniques dans la conduite des projets publics, in *Les figures de l'irréversibilité en économie*, Edition de l'EHESS (1991).
- N. Bouleau, Splendeurs et misères des lois de valeurs extrêmes, revue *Risques* n°4, 85-92, (1991).
- U. Beck, *Risikogesellschaft : Auf dem Weg in eine andere Moderne*, Suhrkamp 1986.
- Cl. Allègre, *Economiser la planète*, Fayard (1990).
- J. P. Moatti, *Economie de la sécurité, de l'évaluation à la prévention des risques technologiques*, INSERM (1989).
- A. Grothendieck, La nouvelle église universelle, in *Pourquoi la mathématique ?* Union générale d'édition (1974).
- M. Callon, réseaux technico-économiques et irréversibilité, in *Les figures de l'irréversibilité en économie*, Edition de l'EHESS (1991).
- D. Duclos, *La peur et le savoir, la société face à la science, la technique et leurs dangers*, éd. La Découverte, (1989).