

SOMMAIRE

I. RESUME	3
II. AUTO-SAISINE	4
III. ANALYSE	6
<u>A. Aux origines du principe de précaution</u>	<u>6</u>
1. Science, incertitude et prudence	6
2. Les premières actions	7
3. Actions de prévention, principe de précaution et principe d'innovation	8
<u>B. Estimation du risque par les scientifiques</u>	<u>11</u>
1. L'approche imparfaite de la vérité par les experts	11
2. L'importance des échelles de temps et d'espace	12
3. La responsabilité des chercheurs-experts	12
4. Transparence et vigilance	13
<u>C. Le contexte du principe de précaution</u>	<u>14</u>
1. Le contexte culturel de la notion de précaution	14
2. Les biais cognitifs dans la perception des risques	15
3. Des applications parfois excessives du principe de précaution	17
4. De l'usage légitime du principe de précaution	19
<u>D. Les limites éthiques aux pratiques de la recherche</u>	<u>20</u>
1. Des recherches aux conséquences difficiles à apprécier	21
2. Les intérêts économiques et politiques dans les applications des recherches à risques	22
3. La limitation des libertés individuelles	24
<u>E. Le principe de précaution, les chercheurs et le droit</u>	<u>26</u>
<u>F. Conclusion. Responsabilités, éthique et principe de précaution</u>	<u>28</u>
IV. RECOMMANDATIONS	30
V. ANNEXES	32
VI. GLOSSAIRE DE ABREVIATIONS	36
VII. REMERCIEMENTS	37

I. RESUME

La science a considérablement amélioré la condition de l'humanité. Elle a contribué à l'accroissement du bien-être mondial. Elle a aidé à relever les grands défis lancés aux sociétés humaines. Et, il y a tout lieu d'espérer qu'elle continuera à le faire. Pourtant certaines des applications de la recherche induisent des risques graves et irréversibles tant pour les individus que pour la planète et, par conséquent, pour l'environnement dans lequel seront amenées à vivre les générations futures.

Heureusement, les avancées de la recherche contribuent également à identifier et anticiper ces risques et à nous en prémunir. Le principe de précaution vise alors à tirer parti de ces résultats scientifiques pour prendre des mesures conservatoires, sans attendre que l'on soit en mesure de quantifier avec précision l'ampleur des périls qui nous guettent. On se trouve alors dans une tension entre le progrès de la connaissance, les développements technologiques qu'ils induisent et la conscience des risques qu'ils génèrent.

Le principe de précaution est issu de la Charte de l'environnement de 2004, inscrite en 2005 dans la Constitution française. Son application s'est étendue progressivement du domaine de l'environnement à celui de la santé. Ses origines historiques et philosophiques se trouvent dans les concepts de prudence, puis de prévention et enfin de précaution. Toutefois, si la prévention porte sur des risques avérés, le principe de précaution se rapporte, quant à lui, à des risques contrefactuels, non encore prouvés par des faits d'observation mais cependant prévisibles.

L'estimation du risque s'appuie sur les résultats du travail d'experts-chercheurs consultés par les pouvoirs publics avant de prendre une décision. Compte tenu de la marge d'incertitude propre à la recherche scientifique, de la complexité des problèmes traités et de l'importance des enjeux humains, sociaux et économiques, ces experts se doivent d'avoir une approche multidisciplinaire, de procéder en toute transparence, d'éviter les conflits d'intérêts avec les groupes industriels impliqués et, de façon générale, de respecter les règles de l'intégrité scientifique. Par ailleurs, ces chercheuses et ces chercheurs doivent être attentifs aux réactions de leurs concitoyens, qui peuvent parfois éprouver des difficultés à appréhender la réalité des risques potentiels de certaines technologies, et faire un appel excessif au principe de précaution. D'un autre côté certains citoyens peuvent au contraire être les découvreurs avisés de dangers réels non encore identifiés et doivent être entendus.

Nous souhaitons ici appréhender, avec discernement, la responsabilité morale des chercheurs eux-mêmes quant aux risques occasionnés par les applications de leurs travaux. Sans doute est-il parfois difficile d'apprécier les conséquences de certaines recherches novatrices, par exemple dans le domaine de la génétique, du numérique ou de l'intelligence artificielle. En effet, celles-ci comportent souvent des risques encore peu explorés, tant pour nos vies personnelles que pour l'évolution de la société dans son ensemble. Il importe alors de tenir compte tant des aspects scientifiques du principe de précaution que des problèmes éthiques que peut poser son application, qu'ils soient sociétaux, économiques ou politiques.

Enfin, sur le plan juridique, le principe de précaution interroge la responsabilité indirecte des scientifiques lorsque les magistrats requièrent leur expertise. Le statut juridique de la preuve scientifique, en présence d'incertitude ou de débat, devrait alors susciter des réflexions approfondies, auxquelles les scientifiques devraient être plus étroitement associés qu'ils ne le sont aujourd'hui. Le COMETS y voit une occasion de rapprochement entre les chercheuses et les chercheurs d'un côté, les acteurs de la justice de l'autre.

Des recommandations sont présentées, d'une part aux établissements de recherche, d'autre part à leurs personnels.



II. AUTO-SAISINE

Si la science a considérablement amélioré la condition de l'humanité, ses applications suscitent à la fois espoir et méfiance car elles induisent des risques majeurs, non seulement pour les individus mais pour leur environnement, et aussi à terme pour la survie de l'espèce humaine. Heureusement, les avancées de la recherche contribuent également à évaluer ces risques et à nous en prémunir. Le principe de précaution se situe ainsi dans la tension entre le progrès de la connaissance, les développements technologiques et la conscience des risques qu'ils génèrent.

Le principe de précaution, né il y a un quart de siècle, a été nourri de la réflexion d'un grand philosophe de l'éthique du XX^e siècle, Hans Jonas, qui dans son œuvre majeure *Le principe responsabilité* publiée en 1979¹ nous engage à adopter une *heuristique de la peur*. Celle-ci recommande de prendre en considération les risques que font peser les développements technologiques actuels sur l'humanité future, même en l'absence de preuves scientifiques déterminant avec précision l'ampleur du danger. Après avoir été formulé en 1992 lors du sommet de Rio de Janeiro², le principe de précaution a été intégré dans la législation française en 1995³ et ensuite réaffirmé en 2004, sous une formulation légèrement différente, dans la *Charte de l'environnement*⁴. Cette dernière a été introduite dans le préambule de la Constitution française en 2005.

Au fil des années, le principe de précaution s'est progressivement étendu du domaine de l'environnement à celui de la santé publique, en particulier à la suite de l'affaire du sang contaminé et de la crise de la vache folle. Il est de plus en plus évoqué aujourd'hui en référence à diverses technologies qui sortent du champ de l'environnement et de la santé, telles celles du numérique.

Le recours au principe de précaution peut s'avérer fort judicieux s'il est utilisé à bon escient pour éviter des dommages majeurs et irréversibles à long terme. Il fait parfois écho à des inquiétudes voire des peurs ressenties par les citoyens, avec ou sans fondement rationnel. Il peut aussi servir d'alibi à certains politiques pour couvrir leur manque de connaissances scientifiques et technologiques, bloquant alors des décisions nécessaires ou au contraire poussant à en prendre sans pertinence. Enfin, il peut conduire à museler l'audace de certains innovateurs, au nom de risques présumés pour le futur, mais non encore prouvés par les faits. Des difficultés existent tenant aux tensions entre les progrès des connaissances et la mise en œuvre de mesures préventives, décidées au nom du principe de précaution, mais prises en omettant totalement ou partiellement le savoir scientifique.

Cet avis débutera par un rappel des origines historiques et philosophiques des concepts de prudence, puis de prévention et enfin de précaution. Nous analyserons d'abord comment la science permet souvent d'anticiper les dangers éventuels des technologies qu'elle a inspirées, sans pouvoir pour autant en éliminer

¹ Hans Jonas, « *Le principe responsabilité* », pour la traduction française, Les éditions du Cerf, 1990

² Il s'agit de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement qui s'est tenue à Rio de Janeiro au Brésil en juin 1992

³ Loi no 95-101 du 2 février 1995 dite loi de Michel Barnier relative au renforcement de la protection de l'environnement. « L'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable »

⁴ « Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attributions, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage ».

tous les risques. Puis nous montrerons comment les angoisses des citoyens peuvent d'un côté être une source d'excès dans l'appel au principe de précaution, de l'autre révéler des dangers réels.

L'analyse se placera ensuite du point de vue de la responsabilité des chercheuses et des chercheurs quant aux risques occasionnés par les applications potentielles de leurs travaux. Nous nous demanderons alors comment établir un échange constructif entre chercheurs, décideurs et citoyens. Enfin nous nous interrogerons sur les usages du principe de précaution et sur les contraintes qu'il impose tant aux politiques qu'aux chercheurs et à leurs institutions.



III. ANALYSE

A. Aux origines du principe de précaution

1. Science, incertitude et prudence

Les premiers philosophes grecs⁵ ont tenté de libérer la pensée humaine des mythes et des convictions religieuses. Ils ont affirmé que l'on pouvait comprendre le monde par l'observation et le questionnement et non par l'acceptation passive de fables et de dogmes. Avec le III^e siècle avant notre ère et l'école d'Alexandrie apparaissent les premières vraies mesures effectuées sur le monde qui nous entoure⁶, mais aussi la prise de conscience de l'imprécision de ces mesures. En découvrant ainsi qu'il est possible de s'approcher de la « vérité », les « physiciens » et « ingénieurs » grecs⁷ ont également réalisé qu'il était impossible de connaître totalement la vérité ultime. Les philosophes grecs ont aussi proposé une définition de la notion de « prudence »⁸, qui correspond à la faculté de délibérer avec succès avant toute prise de décision. Le principe de précaution trouve là son origine lointaine, dans le lien qui s'est établi entre la part d'incertitude inhérente à la connaissance et la part de prudence qu'implique une décision.

Le développement de la science moderne à partir du XVI^e siècle a eu pour origine l'éternel besoin de comprendre le monde dans lequel on vit, mais également la nécessité de résoudre les nombreux problèmes que se posent les « ingénieurs » de l'époque (artillerie, marine, machines de levage et de pompage, puis machines à vapeur, etc.). Ainsi beaucoup des concepts qui nourrissent la science moderne ont pour origine aussi bien la compréhension de la nature que le besoin de développer des technologies nouvelles. Toute une série de succès remarquables ont contribué à donner à l'homme le sentiment qu'il est capable de tout expliquer, de tout prévoir et de tout maîtriser par la science.⁹ Le XIX^e siècle a vu le développement des applications de la science à l'échelle industrielle et des enjeux économiques qui en découlent. Dans le même temps, on commence à déplorer les nuisances qui accompagnent cette évolution : nuisances pour la santé (*pollution, amiante, plomb* ...), nuisances pour la nature (*pollution de l'air, contamination des sols*...), etc. La science fondamentale et ses applications technologiques sont étroitement liées et ne peuvent donc être dissociées dans la réflexion sur le principe de précaution. L'application du principe de précaution à la recherche scientifique peut ainsi être définie comme l'application de ce principe aux technologies que la recherche scientifique contribue à produire.

Même si la science et les développements technologiques du XX^e siècle ont contribué à une amélioration considérable des conditions d'existence et à un allongement sans précédent de l'espérance de vie, la société se rend compte progressivement de la dangerosité de certaines technologies issues de la science. Ainsi le

⁵ La distinction entre philosophie et science n'apparaissait pas vraiment clairement

⁶ Aristarque de Samos (au troisième siècle avant notre ère) a déterminé le diamètre relatif de la Lune et de la Terre, la distance Terre-Lune par rapport au diamètre de la Lune, et la distance Terre-Soleil (très sous-estimée) par rapport à la distance Terre-Lune. Eratosthène de Cyrène (mort vers -192) est parvenu à mesurer le diamètre de la Terre, ce qui a permis de mettre des chiffres sur toutes les distances déterminées par Aristarque

⁷ On pratiquait à Alexandrie des expériences sur les métaux et les colorants (ce qui deviendra plus tard la chimie), tout en développant différents types de machines et d'instruments (ce qui deviendra la technologie)

⁸ Aristote, « *Ethique à Nicomaque* », Livre VI, Chapitre V. « ...Voilà pourquoi nous regardons Périclès et ceux qui lui ressemblent comme des hommes prudents, parce qu'ils sont en état de voir ce qui est bon et avantageux pour eux-mêmes et pour les autres ; et nous les croyons capables de diriger avec succès les affaires d'une famille, et celles d'un État... »

⁹ Par exemple en 1846 Urbain le Verrier s'intéressant à une légère anomalie de la trajectoire d'Uranus, prévoit par le calcul l'existence et les caractéristiques (masse, orbite, position) d'une nouvelle planète inconnue. Cette planète, Neptune, est découverte peu après avec les caractéristiques prévues par Le Verrier. Dans une séance de l'académie, Arago indique : « M. Le Verrier vit le nouvel astre au bout de sa plume »

développement d'armes de destruction de grande ampleur lors des deux grandes guerres marque durablement les esprits¹⁰. Après la seconde guerre mondiale, le développement économique considérable et la mondialisation des échanges conduisent à une prise de conscience croissante des dangers avérés ou potentiels des technologies dans les domaines de la santé, de l'environnement, du climat et de la biodiversité. C'est ainsi que Günther Anders¹¹ parle de « honte prométhéenne » pour évoquer les dangers de la technologie. Le sentiment que l'Homme est en train de modifier la planète est désormais largement partagé. Certains considèrent même que nous entrons dans une nouvelle époque de l'histoire de la Terre, l'anthropocène¹². S'installe alors dans la société la conscience de risques non seulement à l'échelle locale et à court terme pour les individus, mais aussi à long terme et à grande échelle pour la survie de l'humanité et de la planète, ce qu'illustre les prémonitions de la science-fiction.

2. Les premières actions

Malgré l'évolution rapide de la science et de ses applications technologiques, il a semblé longtemps évident que la planète pouvait supporter une exploitation massive et systématique de ses ressources et que l'environnement, fortement altéré, pouvait se régénérer tout seul. Mais après plusieurs tragédies humaines et environnementales, entre la fin des années 1950 et les années 1980¹³, on a pris conscience que les sociétés ne peuvent subir indéfiniment un développement technologique anarchique. Diverses réponses ont été proposées successivement par les politiques pour la protection de l'environnement.

La première réponse a été celle du principe du « pollueur-payeur ». Consacré dans l'acte unique européen, il a été adopté par les pays de l'OCDE dès 1972 et défini comme la prise en charge financière par le pollueur de mesures de prévention et de lutte imposées par les pouvoirs publics pour que l'environnement reste dans un état « acceptable ». Assumer le coût de la réhabilitation *a posteriori* des dommages devait pousser l'acteur rationnel à réduire *a priori* les effets potentiellement nocifs. Cependant, même si ce principe du « pollueur-payeur » peut résoudre des problèmes environnementaux locaux et ponctuels, il devient inapplicable lorsque les dégâts ne sont pas perceptibles, s'ils sont diffus ou constatés tardivement, ou encore quand le coût de la réparation est trop élevé. Ceci est encore plus vrai lorsque les dommages sont devenus irréversibles.

Avec ce constat d'une possible irréversibilité des dégâts causés par la technologie, l'attention s'est portée sur la nécessité d'actions de *prévention*¹⁴. Ceci suppose cependant que la science soit capable d'anticiper avec *certitude* et *précision* le niveau de dommage environnemental ainsi que toutes ses conséquences. Or, un tel niveau de connaissance et d'information n'est pas toujours accessible à la science. C'est ainsi que dans les domaines de la pollution chimique sont apparues les notions de *risque hypothétique* et de *menace*, impliquant des prévisions scientifiques basées sur l'*incertitude* et la *probabilité*¹⁵. Les incertitudes concernent avant tout l'extension géographique des dégâts potentiels, la durée de vie et la réactivité des polluants avec

¹⁰ La chimie avec les gaz de combats, mais surtout la physique (et la chimie) avec les armes nucléaires

¹¹ Günther Anders, « L'obsolescence de l'homme », 1956, traduction française 2020 aux Editions de l'encyclopédie des nuisances, Editions IVREA

¹² Le terme a été introduit par Paul Crutzen, prix Nobel de chimie 1995. Bien que l'Anthropocene Working Group (dans lequel siège Crutzen) de la Commission Stratigraphique internationale ait proposé sa reconnaissance, cette Commission, qui établit selon des critères scientifiques précis la définition d'âges géologiques, ne l'a pas à ce jour acté (<https://www.nature.com/articles/d41586-019-01641-5>). L'idée d'un tel nouvel âge est désormais largement mobilisée notamment en sciences humaines et sociales

¹³ Par exemple les accidents industriels de Seveso (1er juillet 1975) et de Bhopal (3 décembre 1984)

¹⁴ La catastrophe d'AZF a entraîné une réflexion approfondie, qui a débouché sur la loi « risques » du 30 juillet 2003. Cette loi renforce les actions préventives dans plusieurs domaines. Des PPRT (Plan de Prévention des Risques Technologiques) organisent la cohabitation des sites industriels à risques et des zones riveraines dans les régions

¹⁵ Ces notions sont apparues surtout avec le constat des effets destructeurs des PCB (polychlorobiphényles ou Pylène, toxiques, écotoxiques et reprotoxiques) et du DDT (dichlorodiphényltrichloroéthane, insecticide, mais polluant organique persistant écotoxique) sur la biodiversité, et des CFC (Chlorofluorocarbures) sur la couche d'ozone

l'environnement, la durée de leurs manifestations (par exemple pour les gaz à effet de serre) et leur caractère réversible / irréversible (altération de la couche d'ozone par exemple)¹⁶.

3. Actions de prévention, principe de précaution et principe d'innovation

a. Actions de prévention

Il n'existe pas de définition très précise pour un principe de prévention. Il vaut mieux parler d'*actions de prévention*. Il signifie que les pouvoirs publics ont le devoir d'imposer des mesures pour éviter ou réduire les dommages liés aux risques avérés que certaines technologies peuvent entraîner pour la société. Il s'agit de risques confirmés par les résultats scientifiques -même s'ils comportent des incertitudes- et dont l'existence ne fait pas ou plus de doute. En France il existe un Conseil supérieur de la prévention des risques technologiques (CSPRT). Créé en 1976 sous le nom de CSIE pour les seules « installations classées » pour la protection de l'environnement¹⁷, il a ensuite vu ses compétences élargies en 2011. C'est aujourd'hui un organe consultatif qui assiste les ministres chargés des installations classées pour la protection de l'environnement et des installations nucléaires. Par exemple le CSPRT s'est manifesté en 2018 pour forcer la limitation des boues rouges rejetées par l'industrie en mer Méditerranée dont les dommages pour l'écosystème marin sont avérés¹⁸.

b. Le principe de précaution

Les actions de prévention se justifient quand les risques de certaines technologies sont bien identifiés pour le temps présent. Mais il peut arriver que les incertitudes soient trop grandes pour que la science puisse évaluer les risques pour l'avenir. On parle alors de risques contrefactuels en ce sens qu'ils ne reposent pas sur des faits d'observation. Ainsi est apparu le *principe de précaution*, qui concerne des menaces potentielles et hypothétiques pour le futur. L'idée à la base de ce principe est que les incertitudes ne doivent pas retarder l'adoption de mesures pour éviter ou ralentir une dégradation probable de l'environnement sur le long terme. A travers la dimension scientifique des notions d'incertitudes et de probabilités, le principe de précaution peut être considéré comme une adaptation à la planète, à l'humanité actuelle et aux générations futures, de la notion de « prudence » qu'Aristote prônait pour la Cité (sans pour autant suggérer de prendre des mesures dans l'incertitude pour des risques contrefactuels pour lesquels l'expérience acquise au fil du temps ne suffit pas).

En 1976 le gouvernement d'Allemagne de l'Ouest, conscient des dégradations de l'environnement provoquées par les pluies acides, appelle à des *actions de précaution*, en défendant l'idée qu'il est inacceptable d'attendre les anticipations scientifiques précises et quantifiées pour envisager des actions préventives. D'autres sujets majeurs concernant l'état de la planète sollicitent ensuite l'attention des pouvoirs

¹⁶ Notons que pour évaluer le niveau d'incertitude, les scientifiques sont largement tributaires des simulations numériques basées sur des modèles sophistiqués, alimentés par les résultats d'une multitude de mesures

¹⁷ Loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées devenue art. L. 512-5 et L. 512-10 du code de l'environnement. Le terme d'installation classée s'applique à toute exploitation industrielle ou agricole susceptible de créer des risques ou de provoquer des pollutions ou nuisances, notamment pour la sécurité et la santé des riverains

¹⁸ Dans un avis rendu le 13 février 2018, le CSPRT demande à ce que les limites des rejets en fer ne soient plus soumises à dérogation, et à ce que les seuils de rejets d'aluminium, d'arsenic et de la DCO (demande chimique en oxygène) soient réduits de moitié. De ce fait, le CSPRT recommande une modification de l'arrêté préfectoral du 28 décembre 2015 qui avait accordé à ALTEO des dérogations importantes concernant les substances chimiques des rejets en fer.

publics. La Convention de Vienne sur la protection de la couche d'ozone, telle qu'adoptée par 28 pays le 22 mars 1985, reconnaît la nécessité d'accroître la coopération internationale en vue de limiter les risques que les activités humaines peuvent faire courir à la couche d'ozone de la planète. La première mention d'un principe de précaution apparaît explicitement en juin 1992 avec la déclaration de Rio sur l'environnement et le développement, qui n'est pas encore opposable en droit. Celle-ci est ainsi formulée : « *En cas de risque de dommages graves ou irréversibles, l'absence de certitude scientifique absolue ne doit pas servir de prétexte pour remettre à plus tard l'adoption de mesures effectives visant à prévenir la dégradation de l'environnement* ». Cette déclaration sera suivie de nombreux rapports.

En France, le principe de précaution est introduit dans le droit interne avec la loi Barnier de 1995 en ces termes, qui ajoutent les notions de proportionnalité et de coût acceptable pour satisfaire aux exigences des grands argentiers de l'État :

« L'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ».

Puis le principe de précaution est introduit dans l'article 5 de la Charte de l'environnement en 2005, elle-même incorporée au préambule de la Constitution française¹⁹. Son application s'est étendue depuis au domaine de la santé.

Les autorités publiques veillent, par application de ce principe dans leurs domaines d'attribution, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures de prévention provisoires et proportionnées, qui de plus doivent être prises à un coût économiquement acceptable. Les deux notions de proportionnalité et de coût économique enrichissent considérablement la définition du principe de précaution, tout en entrant en tension avec le principe lui-même, surtout en ce qui concerne le coût. Cette tension les rend toutefois imprécises et subjectives et leur difficile évaluation dépend beaucoup du contexte, du niveau d'acceptabilité des risques par la population, des priorités du régime qui gouverne, des pressions exercées par les promoteurs des technologies en question, etc. Elles peuvent aussi dépendre de la hiérarchie des valeurs de l'éthique : le devoir de sauver des vies humaines à un coût très élevé, comme dans une crise sanitaire, peut-il l'emporter sur la nécessité de sauver l'économie ?

c. Prévention / précaution : les différences

Il y a donc une différence significative entre la précaution et la prévention²⁰. Pour éviter ou minimiser des risques technologiques pour le futur, les mesures appliquées par les pouvoirs publics font appel à la prévention si les risques sont avérés sur la base d'expériences de dommages évaluables selon les procédures disponibles. Alors les mesures s'imposent. Il en va autrement pour l'application du principe de précaution, où la décision repose, non pas sur des risques certifiés par la science comme pour la prévention, mais sur des risques potentiels avérés et évalués par la science permettant de départager des scénarios divergents de risques pour le futur. On se trouve dans une situation scientifique non classique résultant de la grande complexité du sujet et de son caractère multifactoriel, qui requiert une démarche d'évaluation faisant appel à des compétences multiples et participatives, exposée à la critique et révisable. Notons qu'en l'absence de démonstration scientifique, le principe de précaution a ceci de particulier qu'il n'implique pas

¹⁹ Le texte, après avoir été adopté par le Parlement en 2004, a été soumis au Congrès à Versailles le 28 février 2005. La Charte a alors été adoptée, promulguée le 1er mars 2005 et introduite dans le préambule de la Constitution du 4 octobre 1958 qui fonde la V^{ème} République.

²⁰ Voir par exemple l'article de Robert Delorme dans *Le Monde* du 23 septembre 2010 : « Prévention ou principe de précaution ? Une question insoluble scientifiquement »

l'obligation formelle de prendre une décision, contrairement à la prévention. C'est donc au principe de précaution et non à la prévention qu'il faut faire appel si les risques sont seulement anticipés mais non prouvés avec certitude. Ainsi c'est au nom du principe de précaution et non en référence à la prévention que le ministre de l'agriculture danois a ordonné en octobre 2020 que soient abattus des millions de visons élevés en batterie, après la découverte que certains d'entre eux étaient porteurs d'une forme mutée de Sars-CoV-2 et que le virus muté avait été transmis à douze personnes. Le principe de précaution a été invoqué ici, en fonction du risque hypothétique mais non avéré qu'une mutation du coronavirus, passant des visons aux humains, puisse compromettre l'efficacité d'un futur vaccin²¹.

Mais parfois la frontière entre prévention et précaution est floue et il peut se produire que des risques initialement anticipés sans certitude deviennent avérés ultérieurement lorsque leurs effets se sont clairement manifestés. Citons comme exemple l'interdiction de la fracture hydraulique utilisée pour l'exploitation des gaz de schiste (loi Jacob de 2011), fondée sur un débat associant des scientifiques, le secteur économique et les citoyens²². En fait l'interdiction aurait pu résulter plutôt d'actions de prévention, car les risques pour l'environnement étaient déjà connus en 2011. Toutefois ils n'étaient pas quantifiés et les débats sur l'interdiction ont fait constamment appel au principe de précaution.

Il est aussi des cas où la prévention, justifiée de fait par la connaissance de risques certains, est artificiellement transformée en principe de précaution par un habile détour sémantique, pour faire jouer la non-obligation de prendre des mesures de prévention par les pouvoirs publics. De tels artifices peuvent résulter de la pression de lobbies industriels concernés par les technologies dangereuses en question : ceux-ci gagnent ainsi du temps en insinuant des doutes sur les risques, parfois avec des arguments pseudo-scientifiques, avant que tombent des interdictions qui les pénaliseront. Ainsi l'interdiction de l'amiante dans les travaux publics a été repoussée pendant plusieurs décennies avec des arguments mal étayés, comme ceux sur le risque mineur des faibles doses d'utilisation (voir § C4).

d. Le principe d'innovation

Les milieux industriels ne sont pas tous favorables au principe de précaution, au contraire. Ils sont nombreux à trouver que ce principe peut conduire, au nom de risques présumés pour le futur non encore établis par des faits, à freiner les innovations qui découlent de l'avancée des recherches. En cela, on avance parfois le principe d'innovation à côté du principe de précaution, avec lequel il entrerait en opposition plus ou moins frontalement. Le concept de principe d'innovation fut introduit et discuté lors d'une journée de réflexion de l'OPECST le 5 juin 2014 qui réunit notamment des représentants de grandes entreprises, du MEDEF, de l'IESF (Société des Ingénieurs et Scientifiques de France) et de l'Académie des technologies. A la suite de cette journée l'OPECST se déclara partisan de faire de l'innovation un principe législatif : il proposa en 2015 d'assortir la loi dite « loi Macron » d'un amendement introduisant le principe d'innovation, avec une définition d'ailleurs assez peu précise²³. Certains parlementaires se désolidarisèrent de cette proposition visant à

²¹ Communiqué de l'Académie nationale de médecine et de l'Académie vétérinaire de France, le 5 novembre 2020

²² En fait la loi Jacob n° 2011-835 du 13 juillet 2011. Notons que les dégâts de la fracture hydraulique (pollution des nappes phréatiques, mini-tremblements de terre) semblent confirmés par une étude scientifique anglaise récente et continuent de faire l'objet de recherches

²³ Voici comment est évoqué le principe d'innovation dans l'amendement des députés Jean-Yves Le Déaut et Anne Yvonne Le Dain pour l'OPECST en 2015, proposant de rajouter un article 41B à la loi, modifiant le code de la recherche : « art. L. 131-1 Dans l'exercice de leurs attributions respectives et, en particulier, par la définition de leur politique d'achat, les personnes publiques et les personnes privées chargées d'une mission de service public promeuvent, mettent en œuvre pour l'exercice de leurs missions et appuient toute forme d'innovation, entendue comme l'ensemble des solutions nouvelles en termes de fourniture de biens, de services ou de travaux propres à répondre à des besoins auxquels ne peuvent répondre des solutions déjà disponibles sur le marché. Elles s'attachent, à ce titre, à exercer une veille sur les formes contemporaines d'innovation, y compris celles émanant des petites et moyennes entreprises ».

L'amendement accepté en première lecture au Parlement est finalement repoussé par le Sénat et non adopté dans la loi

réduire la portée du principe de précaution, ce qu'ils jugèrent tout particulièrement dommageable pour la protection de l'environnement.

Le principe d'innovation n'a pas encore trouvé de statut législatif en France, mais le concept revient périodiquement dans les débats politiques. Il a fait une entrée discrète dans la législation européenne en 2018 et figure dans le préambule du programme européen Horizon 2020, sous une forme suffisamment vague pour ne pas remettre en question le principe de précaution²⁴.

B. Estimation du risque par les scientifiques

L'estimation du risque s'appuie sur le travail d'experts-chercheurs. Ceux-ci peuvent être consultés par les pouvoirs publics pour évaluer les risques potentiels à développer une technologie, ou à l'inverse les dommages qu'induirait le non-recours à celle-ci. Cela peut conduire à l'établissement de normes (par exemple sur l'usage des emballages plastiques), ou bien à la prise de décisions dans une situation de crise sanitaire ou environnementale. Il importe donc de comprendre comment la science peut contribuer à appréhender les risques et éventuellement à les surmonter.

1. L'approche imparfaite de la vérité par les experts

Les marges d'incertitude des résultats de la recherche sont d'autant plus importantes que les questions posées sont complexes et que les prédictions sont éloignées dans le temps. Les chercheurs sont souvent amenés à travailler collectivement dans des groupes d'experts pluridisciplinaires dont les compétences diverses se complètent. Ils fournissent alors des informations au plus près de leurs compétences communes de façon à donner un avis global.

Ces groupes d'experts ont à traiter de questions dont les paramètres sont multiples. Ainsi par exemple des estimations de l'évolution climatique résultant de processus intriqués dont les diverses composantes (océans / atmosphère / Terre / Soleil, etc.) interagissent entre elles et rétroagissent les unes sur les autres. Il n'y a pas toujours de lien simple entre causes et effets pour les scientifiques, contrairement à la vision fréquente du public et de certains politiques qui tendent naturellement à associer un effet à une cause unique. L'affectation de marges d'erreurs à toutes les prédictions des scientifiques n'est pas toujours bien comprise. De plus, la complexité des phénomènes mis en jeu impose que les experts prennent en compte les points de vue différents et quelquefois divergents sur la réalité qu'ils examinent. Celle-ci comporte le plus souvent des aspects économiques, culturels et sociétaux que la multidisciplinarité des groupes d'experts permet d'appréhender au plus près, comme dans le cadre du GIEC²⁵ par exemple.

Par ailleurs, les résultats des travaux reflètent toujours un état des connaissances à un moment donné. Or celles-ci sont susceptibles d'évoluer, voire d'être réfutées ultérieurement. L'expert lui-même peut avoir sa propre grille de lecture dans le cas de phénomènes très complexes et peut donc être conduit à avoir sa propre interprétation. Ce caractère interprétatif tient beaucoup à l'incertitude qui s'attache aux résultats et donc à l'inaccessibilité d'une vérité absolue.

²⁴ https://www.lemonde.fr/planete/article/2018/12/16/le-principe-d-innovation-entre-dans-la-loi-europeenne_5398455_3244.html

²⁵ GIEC : Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat, créé en 1998 afin de fournir des informations détaillées de l'état des connaissances scientifiques, techniques et socio-économiques sur les changements climatiques, leurs causes, leurs répercussions potentielles et les stratégies de parade

2. L'importance des échelles de temps et d'espace

Le principe de précaution s'appuie sur l'estimation de risques d'autant plus difficiles à évaluer que les incertitudes varient selon que l'on se place à court, moyen ou long terme, et à l'échelle locale ou planétaire. Ainsi dans le cas du climat, la prévision des risques tient compte de l'interaction entre les fluctuations naturelles du climat, pilotées en grande partie par des processus propres au système climatique, et la plus ou moins grande émission des gaz à effet de serre. L'incertitude des fluctuations naturelles est irréductible, tandis que l'incertitude des fluctuations de l'émission des gaz à effet de serre dépend des évolutions sociétales : elle n'est donc potentiellement qu'en partie évaluable, mais justifie l'application de mesures relevant du principe de précaution. L'importance des incertitudes des modèles prédictifs diffère ainsi selon les échelles de temps et d'espace. Les incertitudes à l'échelle du temps long (fin du XXI^e siècle) sont nombreuses et les prévisions sont peu précises car elles dépendent pour une large part de la politique adoptée dès maintenant au niveau mondial face au réchauffement climatique. Les répercussions seront globales et concerneront la planète tout entière. A plus court terme, par exemple pour la dizaine d'années à venir, les évolutions sont en partie fonction des fluctuations naturelles du climat et les incertitudes des modèles dépendent davantage des conditions locales. Elles indiquent cependant déjà à l'évidence d'une accélération du réchauffement climatique.

Dans le domaine de la santé, les risques associés à de nouveaux traitements sont évalués en fonction de la pratique à un moment donné et sont bien encadrés par le système de pharmacovigilance. Mais ce contrôle se heurte à l'incertitude *a priori* tant que ces traitements n'ont pas été expérimentés sur le temps long car des effets secondaires néfastes peuvent se déclarer tardivement. Notons que dans le domaine médical l'incertitude est inhérente au développement de nouvelles molécules, de nouveaux médicaments, et l'on fait en général plus référence au rapport bénéfice/risque pour le groupe pharmaceutique concerné qu'au principe de précaution, qui concerne la société²⁶. C'est ainsi que face à l'urgence créée par la pandémie de Sars-Cov-2 et en prenant en compte ce rapport bénéfice/risque, les étapes conduisant à la mise sur le marché des vaccins ont été raccourcies.

3. La responsabilité des chercheurs-experts

Une évaluation des risques inhérents à une technologie, lorsqu'elle est préconisée par un commanditaire (l'État, une commission parlementaire, un conseil régional, une agence de régulation, etc.) exige que l'expertise scientifique ne soit pas biaisée par des conflits d'intérêts. Ceux-ci peuvent par exemple résulter de contrats de recherche souscrits par les chercheurs-experts avec des entreprises (*funding effect*). Des exemples sont donnés dans un précédent avis du COMETS²⁷, qui rappelle une affaire où, lors d'une enquête d'État sur la qualité de l'air, un scientifique consulté a omis de déclarer ses liens financiers avec un groupe industriel responsable de pollution. Les experts ont à se garder des pressions des groupes d'intérêt extérieurs tels que des lobbies économiques. Cette exigence est particulièrement cruciale pour les expertises commanditées par les agences de réglementation (nationales ou internationales). Au fil du temps, cette exigence s'est accrue, tout particulièrement quand elle porte sur des produits industriels (alimentation,

²⁶ Voir https://www.lemonde.fr/sciences/article/2015/03/31/principe-de-precaution-et-innovation-medicamenteuse_4606696_1650684.html. Cette analyse montre qu'en termes d'irréversibilité les dommages sont moindres pour les effets des médicaments que pour beaucoup d'autres technologies

²⁷ Avis du COMETS n° 2019-39 « Des liens d'intérêts aux conflits d'intérêts dans la recherche publique ». Rappelons l'importance des Déclarations d'Intérêts à remplir avec sincérité par les experts

médicaments, cosmétiques, phytosanitaires, ...) et sur l'exploitation des ressources naturelles (biodiversité, environnement, ressources minières, ...)²⁸.

Quand ils sont consultés par un commanditaire politique dans une situation d'urgence comme une alerte à un risque naturel ou à une crise sanitaire, les chercheurs-experts peuvent être conduits faute de temps à bousculer quelque peu les standards méthodologiques de l'expertise scientifique. La crise de la Covid-19 en a donné des exemples : au nom d'un pragmatisme de l'urgence, certains chercheurs ont publié leurs travaux en contournant les exigences de la démarche scientifique et les procédures usuelles, en particulier la fiabilité et la transparence des méthodes utilisées, l'évaluation critique des publications par les pairs et l'absence de conflits d'intérêts²⁹. Les médias et les réseaux sociaux ont servi d'amplificateurs à des déclarations publiques sur l'utilisation à grande échelle de traitements non validés par les normes en vigueur de l'intégrité scientifique³⁰. Si la médecine a pour objectif premier de sauver des vies, il faut rappeler que cet objectif ne peut se fonder que sur une recherche fiable ayant recours à des expérimentations cliniques contrôlées, et répondant aux mêmes critères de fiabilité que les autres domaines de la recherche. L'éthique de la recherche biomédicale, à savoir le respect de l'éthique de l'expérimentation et de l'intégrité scientifique, garantit tout à la fois l'absence de nocivité et l'efficacité des traitements et donc la confiance que la société peut faire à ses scientifiques³¹.

4. Transparence et vigilance

Il est important qu'il soit clair pour tous (le commanditaire politique, les médias, les citoyens) que le rapport scientifique est une aide aux décisions, mais que la responsabilité du groupe d'experts se limite à l'exactitude et à la complétude du rapport. Le rapport scientifique n'est qu'un élément dans la prise de décision qui met en jeu des critères multiples. Cette réalité est démontrée à échéances régulières pendant la crise sanitaire de 2020 : le Conseil scientifique Covid-19 mis en place par l'exécutif en mars 2020 produit à la demande du politique des rapports successifs qui ont vocation à être rendus publics³² et communique avec les médias sur leur contenu. Certaines de leurs préconisations pourraient susciter l'invocation du principe de précaution, par exemple le confinement des citoyens, compte tenu des très grandes incertitudes qui existent concernant le développement de la pandémie³³.

Une vigilance particulière s'impose aux chercheurs-experts quant à l'usage qui est fait de leur rapport afin que de mauvaises décisions ne leur soient pas attribuées, comme ce fut le cas des sismologues italiens consultés sur la possibilité d'un tremblement de terre de l'Aquila en 2009³⁴. Le rapport d'un groupe d'experts est souvent repris et commenté par les médias et les réseaux sociaux. Le rapporteur du groupe doit clairement faire connaître les marges d'incertitude de l'expertise et les communiquer avec toute la

²⁸ Ces agences visent à garantir leur neutralité face aux pressions en instaurant des commissions de déontologie qui font faire des enquêtes sur les liens d'intérêt de leurs chercheurs experts. Ces agences tiennent un compte exact de leurs auditions avec les lobbies industriels, les groupes d'experts scientifiques et les commanditaires étatiques du rapport

²⁹ Voir l'avis 2020-42 du COMETS « La communication scientifique en temps de crise sanitaire » à paraître

³⁰ Voir le communiqué du COMETS et de la MIS (Mission pour l'intégrité scientifique du CNRS) publié le 16 avril 2020 « Recherche en temps de crise sanitaire : débats éthiques et intégrité scientifique »

³¹ Voir par exemple Emmanuel Hirsch, *TheConversation* 27-03-2020 « Quels principes éthiques en temps de pandémie ? »

³² Les avis du Conseil Scientifique Covid-19 sont accessibles sur le site du Ministère des Solidarités et de la Santé

³³ On peut citer par exemple la préconisation de l'auto-confinement préventif et ciblé qui fait partie de la note du 14 décembre 2020

³⁴ Leur consultation orale donnait des marges d'incertitudes sur l'éventualité de la catastrophe ; les responsables n'en ont pas tenu compte et ont conclu à l'absence de risques ; or la catastrophe a bien eu lieu, il y a eu beaucoup de victimes dans la population non évacuée ; les sismologues ont été accusés par les familles des victimes et ont dû subir un procès qui a duré plusieurs années. Cet exemple est discuté dans l'avis du COMETS n°2013-27 « Risques naturels, expertise et situation de crise ». On peut penser que la situation aurait été différente si les sismologues consultés avaient davantage veillé à ce que leur rapport ne soit pas déformé après qu'ils l'aient remis aux décideurs

transparence qu'implique sa mission. Pour s'assurer que les médias ne déforment pas les conclusions du rapport, il importe d'expliciter ses incertitudes et de répondre aux sollicitations avec pédagogie.

Dans certains cas il peut être de la responsabilité des scientifiques de lancer des alertes avant même d'être sollicités en tant qu'experts par les pouvoirs publics. Dans l'éventualité d'une situation de crise, il leur appartient de faire connaître avec force, en priorité à leurs tutelles, leur appréciation des dangers dès qu'ils les voient apparaître. On peut ainsi estimer qu'au départ de la crise de la Covid-19, l'alerte aurait pu être donnée plus rapidement en France compte tenu du démarrage de la pandémie en Chine, ce qui aurait pu faire pressentir plus tôt la gravité de la crise sanitaire qui se profilait.

Plus généralement dans les milieux universitaires il faudrait veiller à poursuivre les travaux liés à des risques potentiels pour la santé ou tout autre domaine. Il arrive que des secteurs entiers de recherche cessent d'être financés car considérés comme dépassés ou peu créatifs, tant est fort l'impératif de produire toujours du neuf sur des sujets à la mode pour obtenir des contrats. C'est ainsi que de nombreuses équipes performantes en virologie se sont vu refuser des moyens suffisants pour poursuivre à bon niveau leurs travaux sur les coronavirus, une dizaine d'années avant l'apparition du Sars-CoV-2³⁵, ralentissant ainsi les progrès possibles pour un traitement de la pandémie. Les exemples de ce genre sont nombreux dans d'autres secteurs de la recherche comme ceux concernant l'environnement, quand les avantages entre des bénéfices et des risques de nature contrefactuels n'ont pas été bien pesés par les décideurs - en l'occurrence les institutions et agences de recherche - et que la confiance dans la compétence des chercheurs n'a pas été suffisamment prise en compte.

C. Le contexte du principe de précaution

1. Le contexte culturel de la notion de précaution

Les risques induits par une innovation peuvent ne pas être appréciés de la même façon par le chercheur, les médias et le public. Ce qui peut apparaître au chercheur comme de l'irrationalité de la part du public peut en réalité être un malentendu culturel. En effet toute culture est fondée sur des croyances profondément enracinées dans ce qu'on appelle souvent une « tradition ». Ce qui apparaît au chercheur comme une évidence peut être ressenti comme une mise en cause de cette culture.

Le rapport qu'entretiennent les êtres vivants avec leur environnement, tel qu'il est envisagé par les scientifiques, peut se révéler incompréhensible pour une partie de l'humanité. C'est par exemple le cas chez les Amazoniens, pour qui la nature et la culture sont situées l'une par rapport à l'autre dans une continuité systémique étrangère à la science³⁶. Pour les Achuar et de nombreux peuples d'Amazonie et d'autres continents, les animaux et certains êtres inanimés possèdent un « esprit », des intentions, des sentiments, un langage, une morale, une culture en somme qui ne diffère pas fondamentalement de celles des humains. En revanche, c'est par leur « enveloppe physique », leur corps, qu'ils diffèrent de l'Homme.

³⁵ On peut citer l'exemple de Bruno Canard, directeur de recherche CNRS dans le laboratoire « Architecture et fonction des macromolécules biologiques » à Marseille, dont les travaux sur les virus à ARN dès 2004 ont fait spectaculairement progresser la compréhension de leur reproduction. Pourtant, à partir de 2006 les financements de son équipe ont fortement baissé, les priorités des bailleurs de fonds s'étant déplacées vers d'autres sujets. Le chercheur a déclaré dans une tribune au Monde le 29 février 2020 « Face au coronavirus, beaucoup de temps a été perdu pour trouver des médicaments »

³⁶ Descola Philippe « Par delà nature et culture », Paris, Gallimard (2005)

Aux îles Fidji, il est difficile de mener des recherches sur la surpêche afin de délimiter des zones marines protégées. Pour les Fidjiens les poissons se cachent des pêcheurs qui n'ont pas respecté les codes collectifs. Par ailleurs, pour eux certaines espèces de poissons appartiennent à certains clans. L'un de ceux-ci peut prêter ses bancs de poissons à un autre village pour nourrir les invités d'une fête par exemple. Si plus tard le poisson se fait rare dans le récif de son village d'origine, on dira que ceux à qui on l'avait prêté ont oublié de le rendre³⁷. On comprend ainsi que les Fidjiens ne voient pas pourquoi appliquer un principe de précaution sur les zones marines protégées.

Des croyances irrationnelles affectent jusqu'aux fondements de notre culture porteuse de la pensée scientifique. Au XIXe siècle, il était recommandé de ne pas prendre le train car l'on pouvait devenir fou en voyant le paysage défiler si vite et parce que les poumons des voyageurs pouvaient éclater quand le train entrait dans un tunnel. Aujourd'hui encore de nombreuses légendes urbaines circulent recommandant des précautions difficilement acceptables³⁸, par exemple celles que les femmes doivent prendre pour ne pas «tomber» enceintes en dehors de rapports sexuels. Une rumeur très répandue prévient même qu'il est possible pour elles d'être fécondées simplement en partageant l'eau d'un bain avec un homme³⁹. C'est d'ailleurs un argument pour leur conseiller de ne point fréquenter les piscines. Les prescriptions de prudence font même l'objet de certains rituels compulsifs et de stratégies obsessionnelles d'évitement pour conjurer des risques imaginaires de la vie quotidienne. La précaution peut ainsi induire des comportements très éloignés de la rationalité scientifique. Ceux-ci ont même permis aux anthropologues d'avancer le concept de « *risk rituals* », rapprochant les précautions irrationnelles des exercices religieux⁴⁰. La perception du principe de précaution ne peut être qu'affectée par ces systèmes spécifiques de représentation.

2. Les biais cognitifs dans la perception des risques

Quand une discussion est entamée sur l'application possible du principe de précaution à une technologie à la demande des pouvoirs publics, parfois à la suite d'une alerte, les scientifiques consultés peuvent se trouver en décalage par rapport aux inquiétudes et aux opinions de la population dont ils font eux-mêmes partie en tant que citoyens. Les raisons des malentendus sont nombreuses.

Certains biais cognitifs peuvent déformer la perception des risques. Comme l'ont montré des études déjà anciennes⁴¹, l'humain est porté à surestimer les très faibles probabilités et sous-estimer les très fortes probabilités. Ainsi certains parents qui refusent de faire vacciner leurs enfants n'envisagent pas forcément que la rougeole représente un danger bien plus grand que le risque extrêmement faible de complications consécutives au vaccin⁴². D'autres préjugés peuvent induire une méconnaissance des résultats acquis dans des pays étrangers. Des raccourcis historiques abusifs peuvent fausser la vision d'événements présents :

³⁷ Elodie Fache & Simonne Pauwels (2020), « Tackling coastal "overfishing" in Fiji: advocating for indigenous worldview, knowledge, and values to be the backbone of fisheries management strategies », *Maritime Studies*
<https://doi.org/10.1007/s40152-020-00162-6>

³⁸ Voir l'ouvrage de deux sociologues, Campion-Vincent, Véronique et Renard, Jean-Bruno, « 100% rumeurs. Codes cachés, objets piégés, aliments contaminés...la vérité sur 50 rumeurs extravagantes », Paris, Payot, 2014

³⁹ <https://sante.journaldesfemmes.fr/fiches-sexo-gyneco/2506122-tomber-enceinte-sans-rapport-sans-penetration/#tomber-enceinte-sans-rapport-idees-recues>
<https://www.cnews.fr/monde/2020-02-25/selon-une-responsable-indonesienne-les-femmes-pourraient-tomber-enceintes-dans-les>

⁴⁰ Moore, Sarah E. H. and Burgess, Adam (2010) "Risk rituals?", *Journal of Risk Research*, first published on 05 October 2010.
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/13669877.2010.505347>

⁴¹ Preston, M.G. et Baratta, P. (1948) « An experimental study of the auction-value of an uncertain outcome », *American Journal of Psychology*, 61, 83-193

⁴² Sur les 14600 cas de rougeole en France en 2017 (dont 37 décès), 87% n'étaient pas vaccinés.

D'après l'Institut National de Prévention et d'Éducation pour la Santé (INPES), les incidences de complications du vaccin ROR sont l'encéphalomyélite (1 cas sur 1 million).

par exemple on évalue les risques de la Covid-19 en les rapportant à ceux des pandémies précédentes, pourtant bien différentes. La prise de conscience des risques réels ne s'opère que par paliers et avec retard : une pandémie est souvent mal appréciée à son démarrage car la contamination, par nature exponentielle, n'est pas comprise tant que les statistiques restent basses. Enfin l'impatience et le désir d'être rassurés nous font parfois sur-réagir. De plus, nous pouvons comprendre les arguments scientifiques, tels ceux qui alertent sur le réchauffement climatique, mais sans vraiment les assimiler et en tirer les conséquences (« c'est vrai mais quand même... »), surtout si elles doivent remettre en cause nos habitudes.

Dans des cas extrêmes, et particulièrement dans les situations de crise, l'opinion peut être manipulée par des rumeurs ou des infos (*fake-news*) inspirées par des théories complotistes ou des volontés de déstabilisation politique, massivement diffusées. Basées sur des affirmations sans aucun fondement scientifique, des infos finissent par s'imposer dans une large fraction de l'opinion et atteindre la masse critique à leur auto-entretien grâce aux réseaux sociaux. Un exemple absurde en est donné par la théorie des *chemtrails*, selon laquelle les traînées de condensation des avions sont des épandages chimiques intentionnels, théorie totalement réfutée par la science sans la moindre trace d'incertitude⁴³. Cependant une étude publiée dans un journal du groupe *Nature* en 2017 a montré que 30 à 40% des américains interrogés croient à la théorie des *chemtrails*⁴⁴. Aucun pays n'est épargné par cette contagion complotiste⁴⁵. Et face à des événements angoissants, nous aimerions refuser de croire au hasard et trouver des explications en ayant recours à une relation de causalité (par exemple que le SARS-CoV-2 aurait été fabriqué par tel ou tel individu dans un but de destruction massive...).

Les chercheurs ne sont pas toujours en capacité de répondre aux peurs irrationnelles (eux-mêmes doivent d'ailleurs se méfier de ne pas y être sensibles). Des épidémies de symptômes, ou plutôt de « ressentis de symptômes », sont amplifiées par la médiatisation d'un danger, fût-il non prouvé ou même totalement fictif, comme dans le cas des affections causées par les compteurs électriques Linky⁴⁶. Certains médias ont une attirance pour le sensationnel voire le catastrophisme, ce qui accroît d'autant la difficulté des scientifiques : ceux-ci ont en effet besoin de rigueur et de pédagogie pour expliquer.

En écho à des craintes irrationnelles du public, les chercheurs peuvent se trouver dans une impasse quand ils ne parviennent pas à convaincre le plus grand nombre des faits que la méthode scientifique leur a permis d'établir. Les techniques de vérification des faits (*fact-checking*), ont souvent un impact mitigé sur la contestation des idées fausses qui circulent sur les réseaux sociaux, même si elles sont indispensables. Le but d'infléchir l'opinion est rarement atteint une fois la méfiance semée dans le public (« Il n'y a pas de fumée sans feu ») ; la démarche de réfutation ponctuelle est peu efficace. Le décalage entre l'évaluation scientifique d'un risque et sa perception par les citoyens ne se traite pas uniquement par le didactisme d'une science qui aurait vocation à expliquer et à protéger. Il faut affronter les objections en retour et tenter de comprendre comment la peur peut s'installer.

Il ne faut pas sous-estimer que la perception du risque par la population peut résulter de manipulations politiques et avoir des enjeux démocratiques. Les citoyens ont parfois appris, souvent aux dépens de leur santé, que le doute pouvait être volontairement entretenu par intérêt par les entreprises concernées, comme

⁴³ Cette théorie conspirationniste est née en 1996. Elle est surtout favorisée par les groupes d'extrême droite et reprise sans aucun sens critique par des personnes de tous bords

⁴⁴ "Solar geoengineering and the chemtrails conspiracy, on social media". Tingley, D & Wagner, G. (2017) Palgrave Communications / DOI: 10.1057/s41599-017-0014-3. Notons que la portée de cette étude est limitée car elle ne porte que sur 1000 personnes.

⁴⁵ Ainsi les chemtrails ont fait l'objet d'une question à l'Assemblée Nationale par le député des Hautes Alpes, Joël Giraud ; Question n°42050 du 12/11/2013

⁴⁶ Notons que les réticences du public par rapport aux compteurs Linky tiennent aussi au souci d'intrusion et de contrôle de leur vie privée

par exemple sur les méfaits de l'amiante ou la nocivité du tabac⁴⁷. Dans certaines situations ce sont pourtant les citoyens qui ont des connaissances de première main que les scientifiques peuvent confirmer, comme celles des associations rassemblant des riverains qui subissent les rejets toxiques d'usines chimiques⁴⁸. Dans le domaine de la santé, les associations de patients contribuent à informer des effets secondaires potentiels de certains médicaments. Ainsi les malades du sida, dont l'association militante *Act-up*, ont fait progresser la compréhension de la maladie.

Les citoyens sont aussi légitimes comme lanceurs d'alerte lorsqu'ils sensibilisent les pouvoirs publics à la nécessité de mettre en œuvre le principe de précaution. Ils sont souvent les premiers à anticiper les dangers prévisibles qui pourraient résulter des politiques locales menée avec des objectifs économiques qui les concernent directement. Un débat est alors entrepris, pertinent à condition qu'il repose sur des bases rationnelles. Le cas se présente souvent dans les domaines qui touchent à l'écologie, par exemple lorsque des aménagements de territoire sont susceptibles d'avoir de lourds impacts sur la biodiversité et les milieux aquatiques. Le recours au principe de précaution peut être invoqué par les riverains concernés au moment de la mise en place des normes relatives aux infrastructures. Il est donc nécessaire que la réaction des citoyens soit entendue.

Notons que le principe de précaution n'est pas perçu et appliqué de la même façon partout dans le monde. De nombreux pays, outre la Chine, poursuivent des travaux en génétique porteurs de questionnements éthiques (voir les exemples fournis au § D1). De même les inquiétudes relatives à la protection de la nature ne sont pas ressenties partout comme essentielles. Il faut d'ailleurs souligner que, en ce qui concerne les technologies issues de la science, une gestion soucieuse du bien commun dépend fortement des régimes politiques. Les idées fausses sont parfois amplifiées par les déclarations des dirigeants à la tête de l'État. Un pouvoir exécutif autoritaire, comme celui du Président du Brésil en 2020, peut s'arroger le droit d'imposer ses interprétations sur des recherches en cours, contredisant les conclusions des scientifiques les plus compétents.

3. Des applications parfois excessives du principe de précaution

Les décideurs peuvent s'abriter derrière le principe de précaution quand la potentialité d'un danger n'est pas quantifiable et l'absence de risque ne peut pas être prouvée compte tenu de l'état actuel de la science. Décider d'appliquer le principe de précaution paraît légitime si le risque, même très faible, engendre un potentiel danger fort à long terme. Toutefois, dans certains cas le principe de précaution est appliqué au titre de risques supposés dont il est bien difficile de prouver qu'ils n'existent pas. Il est en effet souvent impossible de prouver qu'un instrument, un procédé ou un produit nouveau n'aura jamais aucun effet dangereux⁴⁹. Et il arrive parfois qu'un résidu d'incertitude, pourtant extrêmement faible, justifie au titre du principe de précaution d'interdire ou de remettre indéfiniment le développement d'un produit ou d'une technologie. Ceci est particulièrement vrai dans le domaine de la santé où les principes actifs ont toujours des effets secondaires difficilement quantifiables tant qu'ils n'auront pas été testés sur un vaste échantillon de la population : une politique de précaution dans ce cas reviendrait alors à dire qu'il ne faut jamais introduire de nouveaux médicaments, ce qui serait absurde.

⁴⁷ Voir par exemple Naomi Oreskes et Eric Conway « Marchands de doute ou comment une poignée de scientifiques ont masqué la vérité sur des enjeux de société tels que le tabagisme et le réchauffement climatique » (Le Pommier 2012)

⁴⁸ Voir par exemple l'article de Michel Callon et Pierre Lascoumes dans *The Conversation* du 22 mai 2020

⁴⁹ Ainsi le CERN a été assigné devant la Cour fédérale d'Hawaï sous prétexte que le LHC serait susceptible de produire un trou noir qui engloberait la Terre. Bien qu'une telle apocalypse relève du fantasme, les scientifiques ne pouvaient pas (ou ne voulaient perdre leur temps à) apporter la preuve absolue qu'elle était absurde. Notons que les plaignants n'ont pas exactement fait appel au principe de précaution mais ont seulement poussé un cri d'alarme

A la limite, si l'on considère qu'aucun risque n'est acceptable et qu'il faut suivre à la lettre la devise « en cas de doute, envisage le pire », un excès de « précautionisme » peut aboutir à paralyser le développement technologique et l'économie⁵⁰. Les pouvoirs publics peuvent ainsi être conduits à prendre des décisions d'une précaution excessive sous la pression de l'opinion peu informée. L'implantation des antennes relais 3G et 4G est repoussée par certaines communes aux limites de leur territoire, en dépit des communiqués rassurants de l'ANSES⁵¹ (Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation de l'environnement et du travail)⁵².

Des techniques de mesure de plus en plus sensibles peuvent induire à surévaluer des risques qui en fait n'existent pas, car faire une mesure revient à donner des chiffres, et ce sont les chiffres qui inspirent des craintes même quand ils sont largement en dessous du seuil de dangerosité. L'application du principe de précaution dans de telles situations peut alors entraîner des décisions coûteuses sans réel bénéfice pour la société, voire même stimuler l'imaginaire conspirationniste. Un exemple connu est fourni par la « découverte » en 2000 d'un taux de radioactivité anormal sur les plages de Camargue.⁵³ Cette information, relayée par les grands médias,⁵⁴ a induit certains à soupçonner la centrale nucléaire de Marcoule d'avoir jeté clandestinement des déchets radioactifs sur ces plages. Les conséquences économiques locales ont été immédiates (tourisme, producteurs de riz ...). Et cependant cette radioactivité est tout à fait naturelle et connue depuis longtemps des géologues⁵⁵. La grande discrétion (voire l'absence) des médias pour démentir l'information initiale a pour conséquence que même lorsque la vérité est rétablie, le malaise et la crainte sont définitivement installés dans l'opinion publique.

Le principe de précaution peut cependant avoir un effet stimulant pour la recherche. Toute la difficulté que suscite son établissement vient du fait qu'il doit reposer sur des arguments rationnels concernant les risques envisagés sans que l'on soit capable de déterminer l'ampleur exacte de ceux-ci. Les chercheurs peuvent être incités à proposer des idées de substitution pour des technologies qui comportent des risques, ou plus généralement être enclins à compléter les connaissances concernant les risques de certaines technologies qui inquiètent leurs concitoyens. Un exemple est celui des études statistiques très rigoureuses qui progressent depuis une dizaine d'années sur les risques sanitaires résultant de l'exposition aux rayonnements des antennes-relais, souvent évoqués au titre du principe de précaution (voir plus haut). Ces études ont contribué (mais seulement en partie) à rassurer la population et elles se poursuivent actuellement par des travaux de recherche sur l'EHS (l'hypersensibilité aux ondes électromagnétiques). Des croyances populaires ou des peurs peuvent ainsi au final se retrouver marginalisées et la confiance ranimée par des

⁵⁰ Voir Gérald Bronner et Etienne Géhin « L'inquiétant principe de précaution » PUF (2010)

⁵¹ Depuis 2002 l'ANSES a été saisie à plusieurs reprises pour établir un bilan scientifique à partir des connaissances issues de publications internationales sur les risques sanitaires éventuels liés à la téléphonie mobile. Après avoir recensé et analysé plus de 1.000 études, en majorité rigoureuses, sur les risques sanitaires occasionnés par les radiofréquences, l'ANSES a clairement établi qu'il fallait distinguer les risques faibles des antennes-relais de ceux des téléphones portables, considérablement plus élevés. Notons que certaines prises de positions de l'ANSES ont été critiquées car ses membres n'avaient pas tous fait part de tous leurs liens d'intérêt possibles avec les opérateurs

⁵² Notons que l'effet NIMBY (« not in my back yard ») peut aussi jouer un rôle dans les réactions de certains décideurs qui, bien que convaincus de l'innocuité des ondes « prouvée pas la science », tiennent compte des réticences de leurs concitoyens à voir une antenne relais sous leurs fenêtres...

⁵³ Ce taux « anormal » d'irradiation est cependant 4 fois moins élevé que celui reçu par les passagers lors d'un vol Paris- San Francisco par exemple.

⁵⁴ Information relayée entre-autre au JT de 20h de TF1 le 2 avril 2000.

⁵⁵ A. Rivière, Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences, 241 (1955) 964. Cette radioactivité est due à la présence dans ces sables de grains de monazite, un minéral enrichi en éléments radioactifs tels que l'uranium et le thorium.

résultats scientifiques lorsque ceux-ci deviennent plus précis, mieux explicités et plus difficilement contournables.

4. De l'usage légitime du principe de précaution

Il ne faudrait pourtant pas conclure de ce qui précède que les usages du principe de précaution sont toujours excessifs. Il y a au contraire des situations où son application est appropriée et son absence d'application dommageable.

Un exemple d'application légitime du principe de précaution est fourni par la procédure européenne REACH⁵⁶, entrée en vigueur en juin 2008, qui consiste en une série de protections réglementaires contre la dangerosité potentielle de nouvelles substances chimiques. Il s'agit là de la mise en place organisée d'un principe de précaution intégré au niveau européen qui concerne potentiellement 60.000 substances. Cette décision a suscité, avant d'être adoptée, beaucoup de crainte de la part des industriels de la chimie, contrebalancée par la pression de diverses ONG. La mise en œuvre de ce principe de précaution nécessite la coopération des scientifiques des organismes publics, incluant ceux des sciences humaines et sociales, pour l'évaluation des risques « acceptables » en matière de substances chimiques⁵⁷. Il implique d'attribuer des statuts différents selon les types de produits. L'application des réglementations de REACH est un chantier permanent. On peut en effet remarquer que le risque induit par chaque substance est unique, car le même composé chimique présente une réactivité différente, donc un risque différent, selon la taille des particules sous la forme desquelles il se présente⁵⁸. Toutefois il ne fait pas de doute que l'application du principe de précaution prévu par la réglementation REACH est globalement justifiée et bénéfique pour la santé et l'environnement.

A l'inverse, un contre-exemple est fourni par la non-application des mesures de prévention contre l'amiante pendant un siècle après les premières alertes sur ses dangers pour la santé qui remontent à 1906 en France⁵⁹. Ce retard à décréter l'interdiction a pris prétexte de doutes pseudo-scientifiques instillés par des lobbies, selon lesquels de faibles doses d'amiante inhalées seraient sans danger pour les voies respiratoires. Ce délai catastrophique à la prise de décision est encore aujourd'hui la cause du décès de milliers de personnes ayant contracté des cancers de la plèvre dans des locaux comportant de l'amiante. Il aurait pu être sinon évité du moins limité si une action de prévention avait été engagée des décennies plus tôt. Ce très grand scandale sanitaire, désormais bien documenté, s'explique par les multiples pressions qui ont suscité la réticence des politiques à prendre les risques en compte⁶⁰.

⁵⁶ *Registration, Evaluation, Authorization and restriction of CHemicals (REACH)* — est un règlement du Parlement européen et du Conseil de l'Union européenne qui modernise la législation européenne en matière de substances chimiques et met en place un système intégré unique d'enregistrement, d'évaluation et d'autorisation de milliers de substances chimiques.

⁵⁷ Voir l'avis du COMETS 2009-19 « Le rôle de la communauté scientifique dans le débat sur les substances chimiques ».

⁵⁸ On associe parfois abusivement nanoparticules et risques sanitaires. Il faut bien distinguer différents types de nanoparticules : l'emploi de celles qui sont métalliques ou des composés inorganiques peuvent induire des risques, tandis que les nanoparticules organiques, tels les lipides utilisés dans les nouveaux vaccins contre la Covid-19, ne présentent pas de danger.

⁵⁹ A partir de 1927 sont établis les problèmes respiratoires de certains travailleurs de l'amiante qui est mise en cause, dès 1950, dans certains cancers broncho-pulmonaires, cancers de la plèvre (mésothéliome pleural) et fibroses pulmonaires (asbestose). En 1975 les chercheurs travailleurs de la Faculté des Sciences du campus de Jussieu à Paris découvrent que leurs bâtiments sont isolés à l'amiante et se mobilisent. En 1977 l'État, sans l'interdire, met en place une politique sanitaire dite raisonnée de son utilisation, dont le pilotage fût de fait délégué à un groupe informel, le Comité Permanent Amiante, regroupant notamment les industriels de l'amiante. L'interdiction officielle d'utiliser l'amiante ne date en France que de 1997.

⁶⁰ Voir *Le Monde* « L'amiante : un scandale sanitaire sans procès », 20 juillet 2019

A une échelle encore plus générale, signalons la vaste étude intitulée « *Late lessons from early warnings : science, precaution, innovation* » commanditée en 2001 et renouvelée en 2013 par l'agence EEA (European Environment Agency)⁶¹. Il s'agit d'une étude rétrospective de cas où l'application du principe de précaution avait été jugée injustifiée ou excessive par les pouvoirs publics, dans des situations où des risques étaient pourtant suspectés pour des domaines très variés allant des menaces de pollution à la mise en cause de la sécurité alimentaire ou à l'émergence de maladies. De très nombreuses contributions internationales ont été sollicitées pour cette étude. Le décompte a été fait entre les cas de « *false positive* » (lorsque la réglementation appliquée s'est révélée non nécessaire)⁶² et « *false negative* » (lorsque l'absence d'action préventive a entraîné des dommages certains alors que des alertes aux dangers avaient été émises) : sur 14 cas étudiés 12 ont été reconnus comme des « *false negative* »⁶³. Les auteurs du rapport pour l'EEA en ont tiré 12 leçons judicieuses pour améliorer les méthodes de la décision publique et ont conclu que fabriquer du doute sur la réalité des risques relève souvent d'une stratégie délibérée pour saper le principe de précaution dans la prise de décision.

D. Les limites éthiques aux pratiques de la recherche

Les scientifiques eux-mêmes doivent s'interroger sur les risques que leurs travaux de recherche font potentiellement courir dans des domaines allant de la sphère privée à la santé publique, l'environnement ou l'économie. Ils bénéficient grâce aux « libertés académiques »⁶⁴ d'une grande liberté dans le choix de leur sujet de recherche, limitée toutefois par la condition du respect des valeurs de tolérance et d'objectivité. Rappelons que cette liberté est assortie d'une non moins grande responsabilité⁶⁵. Ils ont de fait la possibilité de s'imposer eux-mêmes des limites à leurs expérimentations. Il faut bien admettre que certains chercheurs, croyant surtout travailler pour améliorer le bien-être de l'humanité, jouent en fait aux apprentis sorciers, tel le héros du très populaire poème de Goethe.

https://www.lemonde.fr/planete/article/2019/07/20/face-a-l-echec-des-instructions-penales-des-victimes-de-l-amiante-adoptent-une-autre-strategie-judiciaire_5491411_3244.html

⁶¹ EEA "Late lessons from early warnings", volume II, 2013, article de Steffen F Hansen et Joel A Tickner "The precautionary principle and false alarms, lessons learned"

⁶² Sur les 88 cas étudiés, seulement 4 ont été considérés a posteriori comme « *false positive* », pour lesquels l'application du principe de précaution a été inutile et coûteuse pour la société, par exemple la vaccination de 50 millions d'américains en 1976 contre le virus d'une variante de grippe ayant fait seulement quelques morts qui ne s'est jamais transformée en pandémie. Pour tous les 78 autres cas l'application du principe de précaution a été justifiée a posteriori

⁶³ Citons l'exemple du Dibromochloropropane (DBCP), un pesticide utilisé dans l'agriculture aux États-Unis depuis 1955 contre les vers qui endommagent les fruits tropicaux. En 1970 il a été prouvé, après de récurrentes alertes, que les travailleurs qui pulvérisent ces produits ont des problèmes de fertilité. Mieux contrôlé de nos jours aux États-Unis, le produit continue d'être vendu et utilisé en Amérique Latine, aux Philippines et dans des pays africains

⁶⁴ Loi Article L. 952-2 du code de l'éducation issu de la loi Savary de 1984 modifiée par la loi LPR par la loi 2020 -1674 du 42 décembre 2020-art 15. Aujourd'hui, en France, cette loi garantit les libertés académiques comme suit : « les enseignants-chercheurs, les enseignants et les chercheurs jouissent d'une pleine indépendance et d'une entière liberté d'expression dans l'exercice de leurs fonctions d'enseignement et de leurs activités de recherche, sous les réserves que leur imposent, conformément aux traditions universitaires et aux dispositions du présent code, les principes de tolérance et d'objectivité. Les libertés académiques...s'exercent conformément au principe à caractère constitutionnel d'indépendance des enseignants-chercheurs »

⁶⁵ Voir l'avis du COMETS 2018-35 « Libertés et responsabilités dans la recherche académique ».

1. Des recherches aux conséquences difficiles à apprécier

Il faut d'abord poser le problème des risques que certaines expérimentations peuvent comporter pour ceux qui les mènent ou pour leur entourage. On peut citer l'exemple des recherches sur des agents biologiques hautement pathogènes menées dans les laboratoires ultra-sécurisés dits P4 : compte tenu de toutes les précautions prises, les risques de contamination des travailleurs et de propagation dans la collectivité sont rendus aussi faibles que possible, sans qu'on puisse affirmer qu'ils soient totalement nuls⁶⁶.

Plus généralement, il n'est pas toujours possible de prévoir toutes les conséquences d'une expérimentation entreprise dans des champs de recherche nouveaux et passionnants intellectuellement. Ainsi des interrogations fortes apparaissent dans le domaine de la biologie et de la médecine. La technique CRISPR/cas9, ou ciseaux génétiques, ouvre bien des possibilités fascinantes, telles que la modification simultanée de plusieurs gènes sur le génome⁶⁷. Elle a d'ailleurs été récompensée par le prix Nobel de chimie 2020⁶⁸. Appliquée à un être humain, elle peut avoir plusieurs types d'objectifs, certains thérapeutiques, d'autres visant à une amélioration de l'espèce. Ainsi l'un des buts louables de la thérapie génique est de diminuer les probabilités d'une maladie grave. Toutefois la technique CRISPR/cas9 a des effets imprévisibles et implique un risque d'affecter plusieurs fonctions en altérant un gène particulier. En Chine a eu lieu en 2018 la naissance de bébés-jumelles à l'ADN modifié selon les méthodes CRISPR, ce qui a provoqué une mobilisation internationale de protestation contre cette violation de l'éthique⁶⁹. En outre, les ciseaux génétiques sont utilisés pour le forçage génétique (« gene drive »), qui permet de modifier n'importe quel être vivant se reproduisant de manière sexuée de façon à ce que cette modification génétique se transmette à la plupart de sa descendance⁷⁰. Ceci peut conduire, au bout de quelques générations, à la propagation de la modification à toute une population, même si cette modification diminue la survie ou la reproduction de l'individu qui la porte. La technique de forçage génétique est encore au stade de développement au laboratoire. Elle pourrait permettre de modifier des populations d'insectes vecteurs de maladies afin d'en diminuer la capacité vectorielle ou de les éradiquer.

Bien des recherches en génétique ont des conséquences difficiles à apprécier. Ainsi la création d'embryons chimères par implantation de cellules humaines sur un embryon animal fait l'objet au Japon d'une expérimentation autorisée depuis 2019. L'objectif affiché est d'humaniser des espèces animales pour développer des organes susceptibles d'être greffés sur l'homme, afin de remédier à la pénurie d'organes.

⁶⁶ Mis en cause par certains dans l'émergence de la pandémie de Covid-19, le laboratoire P4 de Wuhan a finalement été disculpé par l'Organisation mondiale de la Santé. Lors d'une conférence de presse organisée le 21 avril, une porte-parole de l'OMS a ainsi affirmé que « toutes les preuves disponibles suggèrent que le virus a une origine animale et qu'il n'est pas le résultat d'une construction ou d'une manipulation, dans un laboratoire ou ailleurs ».

⁶⁷ Voir le rapport de JY Le Deaut pour l'OPECST disponible sur <https://www.senat.fr/rap/r16-507-1/r16-507-11.pdf>.

⁶⁸ Prix Nobel de chimie 2020 décerné à Emmanuelle Charpentier et Jennifer Doudna.

⁶⁹ voir https://www.huffingtonpost.fr/2018/11/26/crispr-polemique-apres-la-naissance-de-bebes-aux-genes-modifies-en-chine_a_23601100/ Notons que le scientifique responsable de cette recherche a été ensuite emprisonné en 2019 par le régime chinois.

⁷⁰ Le forçage génétique (« gene drive ») est une nouvelle technique de génie génétique qui vise à propager un transgène afin de modifier un caractère d'intérêt dans une population-cible (par exemple, pour en réduire la taille, voire pour l'éradiquer). Chez les individus hétérozygotes, portant un chromosome avec ce transgène et un chromosome homologue sauvage, le transgène est copié sur le chromosome homologue et se transmet alors de manière préférentielle à la descendance. Ainsi, l'outil d'édition du génome CRISPR/Cas9 a été utilisé pour insérer un transgène qui inactive un gène de fertilité chez *Anopheles gambiae*, le principal vecteur du paludisme pour les humains. Ce transgène a envahi une population de moustiques au laboratoire en quelques générations, menant à l'extinction de cette population. Ces méthodes techniques suscitent néanmoins des interrogations sur de potentiels effets non-intentionnels et sur les conséquences possibles de telles manipulations sur l'ensemble de l'écosystème naturel.

Maintenant discutées en France en vue de leur autorisation par les lois de bioéthique⁷¹, de telles manipulations font l'objet d'interrogations identifiées par le Conseil d'État, certaines relatives à la sécurité sanitaire, d'autres plus hypothétiques relevant du brouillage des frontières entre les espèces. Elles posent ainsi de lourdes questions éthiques relatives à l'altération de l'écosystème de la nature dont l'homme fait partie⁷².

D'autres recherches sont susceptibles, par leurs applications possibles à grande échelle, de mettre la planète en danger. C'est le cas de l'ingénierie climatique visant à mieux contrôler le réchauffement climatique. Il s'agit d'adapter des techniques dites NET (« *Negative Emission Techniques* ») qui présentent des risques associés incitant à avoir recours au principe de précaution (par exemple la fertilisation des océans par le fer peut provoquer, entre autres dégâts, une anoxie ou diminution de l'oxygène des eaux). En parallèle, des recherches visent à modifier l'albédo de la planète (« l'effet parasol ») par pulvérisation d'aérosols d'eau ou de sulfates dans la haute atmosphère : celle-ci risque de s'en trouver détériorée irréversiblement (voir Annexe 1).

Pourtant, les chercheurs sont entraînés naturellement à pousser le plus loin possible les recherches fondamentales sur « leur » sujet. Certains pensent même que de toute façon « tout ce qui est faisable se fera ». Ne devraient-ils pas pourtant souscrire au principe de précaution pour éviter un dangereux déploiement de leurs résultats à une toute autre échelle que celle du laboratoire ? Ces questions se posent pour nombre de domaines de recherche. Particulièrement sensibles sont les domaines qui impliquent des transformations sociétales. C'est ainsi que dans certains pays du tiers monde le développement de tel ou tel cultigène (c'est-à-dire une espèce de plante délibérément altérée ou sélectionnée par l'homme) peut entraîner des modifications sociales susceptibles de mettre en danger des communautés entières. Certaines équipes du CIRAD ont ainsi pris l'habitude de discuter collectivement des risques potentiels d'un projet de développement de leurs recherches avant même de décider de le déposer pour financement.

2. Les intérêts économiques et politiques dans les applications des recherches à risques

Le développement des technologies fait l'objet d'enjeux politiques. Les quelques exemples développés plus haut indiquent que les chercheurs et les ingénieurs ne sont pas les seuls responsables des applications inappropriées voire potentiellement dangereuses de leurs travaux. Des personnalités politiques peuvent faire prévaloir des priorités liées à des critères électoraux ou des stratégies de prestige. L'évaluation de la balance bénéfices-risques diffère souvent selon les acteurs. En outre des intérêts économiques puissants peuvent intervenir dans les choix des recherches à risques, à l'échelle nationale et le plus souvent internationale.

L'histoire du nucléaire en France en fournit un exemple. Sans rouvrir ici le débat sur les risques des armes nucléaires, qui mobilise une partie des citoyens du monde entier depuis la Seconde Guerre mondiale, il est bon de rappeler qu'en ce qui concerne la production d'énergie nucléaire certains chercheurs ont de longue date manifesté des réticences. Il s'est trouvé des physiciens chercheurs de l'IN2P3⁷³ lanceurs d'alerte dès le démarrage des grands programmes de production industrielle au début des années 1970. Ces chercheurs

⁷¹ Dans le projet de la loi de bioéthique, l'article 17 autorise la création des embryons « animal-homme » et leur transfert chez la femelle. Une commission spéciale du Sénat a fait supprimer l'article 17 le 5 février 2020, mais l'Assemblée nationale l'a réintroduit dans la loi le 31 juillet 2020

⁷² Voir Boris Cyrulnik « les embryons-chimères, une folie au nom de la liberté de la recherche » dans le hors-série Psychologie de « La Vie », octobre 2019

⁷³ IN2P3 : Institut National de Physique Nucléaire et de Physique des Particules, crée en 1971. Il regroupe l'ensemble des laboratoires et des plates-formes de recherche travaillant dans ces domaines en France

membres du GSIEN⁷⁴ mettaient clairement dès cette période l'accent sur la sécurité non parfaitement maîtrisée des réacteurs et sur la question des déchets, qu'ils jugeaient non résolue et préoccupante. Ces inquiétudes se reflètent encore aujourd'hui à travers des associations militantes comme « Sortir du nucléaire » ou « Négawatt », qui rassemblent des citoyens dont beaucoup sont scientifiques.

Revenons aussi sur la perspective d'atténuation du réchauffement climatique, où de forts intérêts industriels sont impliqués dans les techniques NET. La compagnie SHELL a financé les premières recherches sur l'ensemencement des océans, considéré pourtant comme extrêmement dangereux. Aujourd'hui les recherches sur la modification du rayonnement solaire, qui reviennent à la mode, sont fortement poussées par des intérêts militaires et industriels, bien qu'il existe des risques sérieux de modification irréversible de l'atmosphère terrestre à grande échelle et bien que le niveau d'acceptation social soit bas. Dans l'impossibilité d'imposer un moratoire à de telles recherches, les autorités au Royaume-Uni ont érigé un minimum de règles de prudence, dits principes d'Oxford (voir annexe 1).

Dans le domaine de l'agronomie, de multiples travaux de recherche visent à améliorer les rendements, fertiliser les sols et éliminer les parasites. Les applications de ces recherches sont encadrées par des règlements qui relèvent du principe de précaution. Les intérêts des diverses associations d'agriculteurs, ainsi que ceux des lobbies industriels concernés, interviennent pour imposer, ou au contraire faire reculer les limites imposées par les États, ce qui peut donner lieu à de vives controverses politiques largement couvertes par les médias⁷⁵. Dans certains cas, et malgré des dangers graves et irréversibles bien identifiés, les intérêts économiques l'emportent sur la protection de la santé des populations, et ceci avec d'autant plus de désinvolture s'il s'agit de populations distantes dont la survie économique est conditionnée par des lobbies industriels ou agricoles⁷⁶. À juste titre les organismes de recherche impliqués se préoccupent des aspects éthiques des travaux dans ces domaines⁷⁷.

Les dangers que font courir certaines industries à l'homme et à la planète ont souvent une dimension internationale. Ces problèmes se posent par exemple dans l'exploitation massive des ressources naturelles en métaux stratégiques (terres rares, lithium, etc.) qui sont nécessaires à nos technologies modernes. En effet ils entrent dans la composition de certains systèmes destinés aux énergies « décarbonées » (tels les éoliennes, les batteries, ...), ou dans la conception des téléphones portables et tablettes numériques. La conscience de la pénurie à venir de ces métaux stratégiques inquiète, même si elle est modérée par les pratiques du recyclage qui rendent possible une exploitation durable. S'y ajoutent les risques de l'exploitation généralisée par les ouvriers dans les mines et les dangers provoqués par les pollutions massives des écosystèmes des régions minières. Les pays occidentaux ont cessé d'exploiter leurs ressources minérales pour des raisons de coûts et de pollution, ce qui relève principalement de mesures de prévention et secondairement du principe de précaution. Notons qu'ils ont délégué les dangers à des pays moins scrupuleux ou dépendant de ces exploitations pour leur économie.

⁷⁴ Voir « Electro-nucléaire DANGER », Seuil, collection Combats (1977), rédigé par le Groupement de Scientifiques pour l'Information sur l'Energie Nucléaire (GSIEN). Le GSIEN a été alors un groupe notoirement anti-nucléaire

⁷⁵ Citons l'exemple de l'utilisation du glyphosate (ou roundup) commercialisé par la firme MONSANTO (maintenant propriété de BASF), ainsi que celui des néonicotinoïdes pour la culture de la betterave à sucre

⁷⁶ Citons le cas de la chlordécone, insecticide organochloré utilisé pendant plusieurs décennies contre le charançon du bananier. Reconnu dangereux pour la contamination des sols et la pollution des nappes d'eau souterraine, la chlordécone a été interdite en France en 1990 mais a continué d'être utilisée aux Antilles françaises jusqu'en 1993. Elle est responsable d'un taux élevé de cancers de la prostate.

⁷⁷ L'INRAe (Institut National de recherche pour l'agronomie, l'alimentation et l'environnement), le CIRAD (Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement) et l'IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) ont un comité d'éthique commun qui, dans son avis de juin 2019, discute les implications éthiques pour la recherche des grands objectifs internationaux sur le développement durable et sur le climat. Cet avis analyse « l'interculturalité ou comment prendre en compte les différentes cultures et pratiques liées aux groupes sociaux dans l'application par la recherche d'accords exprimés sous une forme universelle ». Il s'intéresse aussi à la gouvernance de la recherche et aux pratiques des chercheurs

3. La limitation des libertés individuelles

Le secteur du numérique et de l'intelligence artificielle, dont la recherche est en plein développement, a des applications comportant des risques encore peu explorés. Nous pressentons que les développements des recherches dans ce domaine auront des conséquences très importantes tant pour nos vies personnelles que publiques. Compte tenu de la nouveauté de ces technologies et des transformations radicales qu'elles engagent aux plans social et politique, il est difficile de se projeter sur l'avenir. Qu'est-ce qui se construit ? Qu'est-ce qui se détruit ?

À titre d'exemple, grâce aux percées de l'intelligence artificielle, des méthodes sans cesse perfectionnées permettent de reconnaître les visages dans une foule sur une vidéo ou une photographie. L'identification des personnes à partir d'une image peut se révéler très utile pour indexer des bases de données multimédia, pour s'authentifier lorsqu'on accède à son ordinateur ou à son compte bancaire, pour conduire une enquête après un attentat terroriste, sur requête d'un magistrat, à partir de l'analyse des données issues de caméras de surveillance. Mais les abus potentiels sont nombreux. On peut craindre que l'utilisation massive de ces technologies, pour repérer les faits et gestes de chacun, ne réduise les libertés individuelles d'aller et venir ou de se réunir. Par exemple, si l'on est capable de vous reconnaître dans la rue, on saura avec qui vous vous êtes promené et avez échangé...

Il existe bien d'autres tentatives d'utilisation des technologies de l'intelligence artificielle aux conséquences dommageables ; citons, à titre d'illustration, la détection de l'orientation sexuelle, comme prétend le faire une équipe de psychologie sociale de l'université de Stanford⁷⁸, ou bien l'identification de l'ethnie d'un individu, comme on le fait en Chine pour repérer les Ouïghours⁷⁹, ou encore le repérage des « esprits délinquants » chez les enfants dès leur plus jeune âge. On se retrouve là dans la droite ligne de Cesare Lombroso et de son essai de sinistre mémoire, paru en 1876 « L'homme criminel »⁸⁰. La réactivation des principes de la physiognomonie, dont on sait les effets désastreux qu'elle a eus XIX^{ème} siècle, devrait pourtant conduire à fortement encadrer certaines recherches qui portent sur la caractérisation de groupes humains, sans recueillir le consentement de l'intégralité des membres de ces groupes ?

On doit craindre des usages irraisonnés de ces technologies d'où découleraient des risques pour la vie privée contre lesquels il convient d'ores et déjà de se prémunir avec vigueur. Dans les cas où il n'y pas d'incertitude sur leurs effets dévastateurs, cela relève à l'évidence d'une politique de prévention que l'on doit mettre en place sans attendre. Pour invoquer le principe de précaution pour certains usages, il faudrait alors montrer que ceux-ci seraient imprévisibles, non quantifiables et irréversibles pour les générations futures. Ajoutons à cela que les inquiétudes que l'on nourrit légitimement ne portent pas sur des recherches fondamentales elles-mêmes, car elles apparaissent très génériques, mais sur la mise en œuvre d'applications problématiques.

Le numérique permet aussi le traçage des personnes au moyen de différentes applications de suivi des déplacements et des contacts téléchargeables sur téléphones portables, comme ce fut le cas en 2020 dans

⁷⁸ Yilun Wang and Michal Kosinski, "Deep Neural Networks Are More Accurate Than Humans at Detecting Sexual Orientation from Facial Images," *Journal of Personality and Social Psychology* 114: 2 (2018): 246–57, accessible at: <http://dx.doi.org/10.1037/pspa0000098>

⁷⁹ Voir le dossier paru dans *Nature*, vol. 587, 19 novembre 2020

⁸⁰ Dans cet essai, Lombroso défend la thèse selon laquelle la « délinquance » serait nettement plus fréquente chez certaines personnes porteuses de caractéristiques physiques, ce qui démontrerait le caractère inné de certains comportements. Il s'oppose ainsi aux conceptions sociologiques qui avancent que les déviances sont la conséquence du milieu.

certaines pays asiatiques pour circonscrire la pandémie de Covid-19. En France les applications « StopCovid » tout d'abord, puis « TousAntiCovid » à partir de l'automne 2020, ont été fortement conseillées par les pouvoirs publics pour tenter de casser les chaînes de transmission de la pandémie⁸¹, sans enrayer totalement les réticences de certains citoyens qui y voient une limitation à leur liberté de se déplacer. Néanmoins, en dépit des craintes et objections manifestées en France comme ailleurs en Europe, il y a loin de telles applications de traçage, tout à la fois transparentes et auditées par les autorités compétentes comme la CNIL, à la surveillance de masse opérée en Chine, où chaque individu est contrôlé à son insu dans tous ses déplacements et toutes ses activités quotidiennes. Il s'agit là, à très grande échelle, d'un système de coercition morale qui se traduit par l'instauration d'un score, le « *crédit social* », accordé par l'État à chaque citoyen, fondé sur un « *capital de points* » qui peut être bonifié ou bien s'éroder⁸². Un tel contrôle « orwellien » de la vie privée heurte fortement notre attachement éthique à la liberté individuelle. Il est en fait contesté par les opposants au régime dictatorial chinois. Notons que les états démocratiques ne sont pas à l'abri de contrôles ou de manipulations de cette nature, certes moins clairement affichés.

Il existe d'autres dimensions du numérique qui pourraient demander que l'on invoque le principe de précaution. Ainsi en va-t-il de certaines technologies neurocognitives. Soulignons que les interfaces cerveau-ordinateurs pourraient aider à la réhabilitation après des accidents vasculaires-cérébraux et d'autres traumatismes cérébraux, ou remédier à des handicaps, voire permettre à des « emmurés vivants » de communiquer avec le reste du monde. On doit se féliciter de ces applications potentiellement bénéfiques. De même, la stimulation électrique profonde à l'aide d'implants neuronaux permet de soigner les symptômes de certaines formes de la maladie de Parkinson. En revanche, des hommes d'affaires comme Marc Zuckerberg ou Elon Musk⁸³ (avec la société Neuralink qu'il a montée avec cette finalité) proposent d'employer les technologies neurocognitives en vue d'augmenter les capacités cognitives humaines et, surtout, de faire intrusion dans notre intériorité, avec des dispositifs électroniques censés accéder directement à nos pensées. Si cela advenait, les conséquences seraient terrifiantes car comportant des dangers d'une police de la pensée et de diverses formes de coercition. Il apparaît donc que des projets de cet ordre, même s'ils ont très peu de chance d'aboutir, de même que ceux qui conduiraient au transhumanisme⁸⁴, mériteraient d'être interrogés à l'aune du principe de précaution⁸⁵ (rapport OCDE).

De même, certaines technologies comme la 6G pourraient, à terme, avoir des effets néfastes pour l'équilibre de la planète, compte tenu de la consommation énergétique qu'elles induiraient. Là encore les risques mériteraient d'être interrogés et le principe de précaution pourrait être invoqué.

En résumé, nous avons discuté ici de technologies « Janus » présentant deux faces, l'une potentiellement bénéfique pour la société, l'autre porteuse de menaces pour les libertés des individus. Ces menaces, plus ou moins affirmées selon les pays, demandent à être précisées et lorsque cela s'avère pertinent, elles doivent conduire à déployer une politique de prévention ; certaines d'entre elles peuvent aussi justifier un recours au principe de précaution lorsqu'on identifie des effets à la fois imprévisibles et irréversibles pour les générations futures.

⁸¹ L'application TousAntiCovid a été lancée le 22 octobre 2020, faisant suite à la mise à jour de l'application StopCovid. Elle a été approuvée par la CNIL (Commission nationale de l'informatique et des libertés). Le bilan de son utilisation par les citoyens et de son efficacité est encore à venir

⁸² Voir par exemple l'article du Monde du 16 janvier 2020

https://www.lemonde.fr/idees/article/2020/01/16/le-credit-social-les-devoirs-avant-les-droits_6026047_3232.html

⁸³ Nick Statt, "Elon Musk Launches Neuralink, a Venture to Merge the Human Brain with AI," *The Verge* (March 27, 2017), accessible at: <https://www.theverge.com/2017/3/27/15077864/elon-musk-neuralink-brain-computer-interface-ai-cyborgs>

⁸⁴ https://www.academie-medecine.fr/wp-content/uploads/2021/02/Rapport-20-06-Interfaces-cerveau-machine-essais_2021_Bulletin-de-l-Acad-.pdf

⁸⁵ <https://www.oecd.org/fr/sti/tech-emergentes/recommandation-innovation-responsable-dans-le-domaine-des-neurotechnologies.htm>

D'une façon générale les technologies du numérique, qui d'ailleurs ne sont pas récentes, soulèvent des problèmes d'éthique qui sont discutés dans de multiples comités d'éthique spécifiques. Il faut rappeler la spécificité des méthodes de fouille de données appliquées aux données personnelles, qui permettent la fusion de toutes sortes d'informations confidentielles sur les individus. De nouvelles vulnérabilités apparaissent liées au vol d'identité et au piratage des données personnelles. Ces dernières sont susceptibles d'être d'exploitées avec des finalités mercantiles⁸⁶ ou politiques. Il en va ainsi des informations innombrables fournies gratuitement sur les comportements des personnes aux GAFAM (Google, Apple, Facebook, Amazon, Microsoft), ces géants du web qui génèrent un trafic colossal sur internet et regroupent des milliards d'utilisateurs. Chacun de ces géants a un rôle différent mais tous font des milliards de dollars de profit leur permettant de se développer de plus en plus, à partir des données fournies gratuitement par leurs utilisateurs, sans que ceux-ci se rendent compte d'être ainsi observés, et sans contrepoids aux intérêts de ces compagnies privées qui font du « marketing comportemental ». Un enjeu essentiel est de faire prendre conscience aux citoyens de ces pratiques lucratives.

D'ailleurs pour ce qui concerne le contrôle des comportements, les progrès du numérique ne sont pas les seuls porteurs d'interrogations. Ainsi les sciences comportementales (sciences cognitives, psychologie, économie ou marketing comportementaux) bâtissent des outils puissants pour contourner des biais cognitifs et orienter les comportements individuels et collectifs. Les très grandes entreprises et les États recourent aux chercheurs pour les accompagner dans des applications directes de ces outils. Or la frontière est ténue entre une simple orientation de l'architecture des choix et une manipulation qui compromet l'autonomie des individus et des organisations⁸⁷. Jusqu'où les chercheurs sont-ils éthiquement justifiés de s'aventurer sans précaution dans ces domaines.

E. Le principe de précaution, les chercheurs et le droit

Devant les juridictions civiles, la mise en œuvre du principe de précaution apparaît délicate car la notion de risque se retrouve sous différentes formes en droit de la responsabilité civile. Par sa nature, le principe de précaution interroge l'avenir et concerne le débat politique en impliquant les décideurs et aussi tous les acteurs de la science. En droit il ne concerne le juge que lorsque des décisions ont été prises. La saisine du juge civil suppose l'existence soit d'un dommage réalisé, soit d'un risque de dommage à la condition qu'il soit certain ou au moins prévisible. En responsabilité civile, le risque est devenu à partir du XX^{ème} siècle un nouveau fondement de responsabilité, complétant celui de la responsabilité pour faute. Cependant, c'est seulement le risque suspecté et par nature incalculable qui peut donner lieu à l'application du principe de précaution, en raison d'incertitudes dans les arguments scientifiques qui se doivent cependant d'avoir un fondement aussi rationnel que possible.

Lorsque se déroule un procès où le principe de précaution est invoqué, ce sont en général des décisions prises par des politiques ou des industriels qui sont mises en cause. Mais les chercheurs peuvent être indirectement concernés quand des expertises scientifiques ont été requises par les magistrats.

⁸⁶ En mars 2018 la société britannique Cambridge Analytica aurait récupéré les données de 50 millions d'utilisateurs de Facebook permettant un « behavioral microtargeting » des potentiels électeurs de Donald Trump

⁸⁷ Si l'État Canadien a bien intégré des principes éthiques clairs (en matière de construction de ses politiques comportementales⁸⁷, ce n'est pas le cas de nombre d'états y compris démocratiques. Voir (https://horizons.gc.ca/wp-content/uploads/2018/11/bi_ethics_summary_fr_0.pdf)

Les juges peuvent alors adopter différentes attitudes face à l'expertise scientifique⁸⁸. Rarement, ils peuvent refuser de s'immiscer dans la controverse scientifique. C'est le cas par exemple d'une jurisprudence de la Cour d'appel de Lyon sur le « danger » de la proximité des antennes-relais, le juge refusant de se forger une opinion sur le rapport scientifique déposé et constatant que le danger allégué n'est pas suffisamment prouvé⁸⁹. Au contraire, lorsque le fait scientifique est évident, le juge tient pour acquise une vérité scientifique incontestable. C'est le cas par exemple d'une décision de justice qui affirme « qu'en l'état des connaissances l'origine et le danger de l'amiante pour la santé de l'homme était parfaitement identifié et connu »⁹⁰. Une troisième situation, assez fréquente, a lieu lorsque le juge fait sienne l'opinion exprimée par un expert durant le procès. Ceci nécessite que le juge comprenne l'analyse scientifique (ce qui implique qu'il peut aussi la réfuter). Celle-ci est ainsi assimilée par le juge qui lui donne une traduction juridique. Ainsi, toujours dans le contentieux des antennes-relais, des juges ont cité et résumé un grand nombre d'expertises scientifiques publiques pour rejeter la proximité des antennes-relais comme cause de troubles physiologiques des populations⁹¹.

Mais le juge peut également se détacher totalement de l'opinion de l'expert, ce qui semble regrettable, et n'utiliser dans ce cas que les données scientifiques brutes (les faits) de l'expertise. Dans le domaine de la santé, cela peut être le cas lorsque les bonnes pratiques médicales sont décrites non pas dans la littérature scientifique, mais dans des textes juridiques (Code de la santé publique, arrêté ministériel)⁹². En appel, les juges apprécient systématiquement les faits, y compris scientifiques, en lien avec un cas particulier : compte tenu des éléments scientifiques dont ils ont connaissance, ils estiment la causalité établie ou non pour ce cas. Une situation extrême est celle où les juges n'hésitent pas à prendre position dans une controverse scientifique dominée par l'incertitude, agissant ainsi comme de « vrais scientifiques ». Dans de tels cas, les décisions rendues par plusieurs Cours d'appel peuvent être différentes même si les faits jugés sont les mêmes. C'est typiquement le cas du contentieux sur le lien entre le vaccin de l'hépatite B et l'apparition postérieure de la sclérose en plaques, où l'analyse des relations causales par les juges s'assimile à un vrai raisonnement scientifique. Soit le juge raisonne « par l'absurde » en éliminant toutes les causes envisageables (antécédents du patient, prédispositions, ...) pour en déduire que la vaccination est la seule cause de la maladie⁹³, soit il estime que l'absence de manifestations de la maladie antérieure à la vaccination est « de faible valeur probante », et rejette le lien de causalité entre sclérose en plaques et vaccination contre l'hépatite B, la preuve ne pouvant être rapportée par des faits négatifs⁹⁴. La Cour de cassation peut ainsi valider deux décisions en apparence contraires, car elle se borne à vérifier que le raisonnement tenu est correct et ne va pas contrôler la qualification du juge relativement aux faits examinés.

En résumé, l'attitude des juges à l'égard des scientifiques est assez variable lors des procès où le principe de précaution est invoqué. Le juge accède à la conviction qu'un fait est prouvé par une représentation intellectuelle qui nécessite le recours à une analyse scientifique de la situation de fait. Comme le principe de précaution fait appel à des risques qui ne sont que potentiels mais non prouvés, les magistrats qui font appel à l'expertise des scientifiques ont ainsi une grande latitude pour se forger une conviction et rendre des jugements. Le traitement judiciaire en droit de la responsabilité civile de la preuve scientifique en présence d'incertitude ou de débats est un sujet appelant à une réflexion approfondie, à laquelle les scientifiques

⁸⁸ E. Verges et L. Khoury, *Le traitement judiciaire de la preuve scientifique*, *Les cahiers de droit*, (2017), 58, 383. <https://doi.org/10.7202/1041010ar>

⁸⁹ *Cours d'appel de Lyon*, 3 février 2011, n°09/06433 : *Juris-Data* n° 2011-002705.

⁹⁰ *Cours d'appel de Rennes*, 22 juin 2012, n°10/04672 : *Juris-Data* n°2012-018965.

⁹¹ *Cours d'appel d'Aix-en-Provence*, 24 juin 2011, n°09/18929 : *Juris-Data* n°2011-014016.

⁹² C'est le cas par exemple de la conclusion d'une faute médicale liée à l'association d'un test de tuberculose et d'un vaccin BCG, dont la pratique est régie par un arrêté ministériel. *Cours d'appel d'Aix-en-Provence*, 29 février 2012, n°10/04437 : *Juris-Data* n°2012-004869.

⁹³ *Cours d'appel de Lyon*, 22 novembre 2007, n°06/02450.

⁹⁴ *Cours d'appel d'Orléans*, 31 octobre 2011, n°12-20903 : *Juris-Data* n°2013-010739.

devraient être conviés. Ce serait là une occasion d'effectuer un rapprochement entre le secteur de la recherche et les acteurs de la justice.

Dans les procès il arrive donc que les magistrats invoquent le principe de précaution, leur rôle étant de contrôler sa bonne application. Toutefois les mesures juridiques résultant du recours à ce principe peuvent prendre des formes différentes selon que les autorités politiques ont décidé d'agir ou de ne pas agir. Agir sans attendre peut prendre diverses formes : adoption d'actes juridiques susceptibles d'un contrôle juridictionnel, financement d'un programme de recherche, information du public quant aux effets négatifs d'un produit ou d'une technologie. Il peut alors être exigé de l'acteur concerné qu'il fournisse la preuve de l'absence de danger. A l'inverse, ne pas agir peut conduire à la mise en cause d'une responsabilité (civile ou pénale plus particulièrement). Rappelons pour conclure que de telles décisions sont de l'entière obligation morale des magistrats. Toutefois les scientifiques, s'ils ont été consultés, ont aussi indirectement engagé leur responsabilité, celle d'éclairer les juges par leur expertise, en toute indépendance et de la façon la plus rationnelle possible.

F. Conclusion. Responsabilités, éthique et principe de précaution

Les risques des technologies faisant l'objet du principe de précaution peuvent être qualifiés de contrefactuels, en ce sens qu'ils ne reposent pas sur l'observation de faits passés mais qu'il peut être démontré qu'ils sont probables dans le futur sans correspondre à des faits. En conséquence, beaucoup considèrent ces risques soit comme peu crédibles, soit comme si improbables qu'il peut apparaître trop coûteux de prendre des mesures adéquates pour y parer. Les politiques de précaution relatives à ces risques contrefactuels se heurtent à des écueils multiples analysés dans cet avis, dont le moindre n'est pas la manipulation des convictions chez certains citoyens qui ne croient pas aux conclusions des scientifiques. En effet, de nombreux biais cognitifs affectent la perception des risques et sont renforcés notamment par la communication via les réseaux sociaux. D'un autre côté des pressions s'exercent pour éviter les applications du principe de précaution lorsque des intérêts économiques trop importants sont en jeu. Ce principe apparaît alors comme un blocage au développement sans fin de nouvelles technologies soumis à la dictature économique qui règne partout dans le monde, quel que soit le régime. C'est pourquoi le principe de précaution reste l'objet d'attaques récurrentes et demande à être défendu, quoiqu'il soit maintenant bien établi dans la législation française.

Cet avis développe une analyse sur la nécessité de faire appel au principe de précaution dans de nombreuses situations pour protéger dans le futur l'environnement, la santé, la biodiversité et les libertés. La définition de ce principe postule que les mesures adoptées par les décideurs soient économiquement acceptables. Il est difficile de définir à quoi correspond précisément ce concept, qui est à évaluer au cas par cas et se fonde sur l'estimation d'une balance raisonnée entre les bénéfices et les risques. Les choix se fondent sur la hiérarchie de valeurs qui prévaut au moment de la prise de décision. Par exemple, lors d'une pandémie, la santé de la population peut être considérée comme plus importante que le maintien des emplois, le choix fait par les autorités pouvant alors se révéler d'un coût économique énorme mais néanmoins accepté.

Il importe donc d'envisager la façon dont est mis en œuvre le principe de précaution et de s'interroger sur le rôle des différents acteurs : les politiques qui prennent les décisions, les scientifiques qui les éclairent, les usagers qui les informent ou les critiquent, sans oublier les juges qui contrôlent l'application des mesures décidées. La nécessaire prise en compte de l'avis de la population est une question éthique difficile à mettre en pratique et qui dépend des domaines, d'autant que les citoyens doivent être éclairés car ils ne sauraient

avoir un avis spontané. Une solution a été trouvée pour les sciences de la vie et de la santé avec l'organisation du débat public par le Comité Consultatif National d'Éthique (CCNE), qui intègre des citoyens-usagers, des associations de malades et d'autres représentants de la société civile. Sur ce modèle des comités d'éthique pourraient être établis dans d'autres domaines, par exemple celui du changement climatique, ou encore des collèges d'éthique faisant éventuellement partie d'un CCNE élargi, comme avec le Comité National Pilote pour l'Éthique du Numérique (CNPEN) en cours de constitution.

Le principe de précaution est en prise directe avec le politique et a donc toute sa place dans la Constitution. Pour ce qui est du rôle des scientifiques, il est clair que même s'ils ne portent pas le poids des décisions à prendre, leur part de responsabilité est grande. Ils ont un rôle de premier plan à jouer dans l'évaluation des risques non encore avérés de certaines technologies et sur l'identification des problématiques sur lesquelles on doit solliciter le principe de précaution. Ils apportent leurs connaissances, elles-mêmes assorties d'incertitudes. Ils ne sont pas les seuls acteurs : leur expertise se conjugue avec les contraintes des lois du marché et avec les stratégies des politiques nationales ou internationales.

Revenons ici sur la formulation de la loi Barnier de 1995 (voir plus haut) : « *l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable* ». Ceci présuppose évidemment que toutes les connaissances scientifiques aient été mobilisées. Tous les personnels impliqués dans la recherche fondamentale et la recherche technologique se doivent de contribuer à l'animation de débats autour des applications de leurs travaux, dans leurs domaines de compétences respectifs et à partir de données robustes. L'objectif est celui d'un progrès raisonné et partagé sur lequel repose la prévention des risques, en particulier des risques irréversibles à long terme, et qu'anime en dernier ressort une éthique de la responsabilité soucieuse de protéger les êtres humains, d'où qu'ils viennent, et de préserver un futur à l'humanité.



IV. RECOMMANDATIONS

1. Le principe de précaution, initialement instauré pour l'environnement puis étendu à la santé, est invoqué aujourd'hui dans de nombreux domaines technologiques. Les scientifiques ont un rôle à jouer dans une réflexion nécessaire pour en faire évoluer les champs d'application.
2. Cette réflexion pourrait s'appuyer sur des études concernant le principe de précaution lui-même, qui pourraient faire l'objet de programmes de recherche. Ce serait là une occasion de développer les liens entre les scientifiques et les juristes pour faire évoluer les concepts de prévention et de précaution ainsi que leurs modes d'application.
3. Lors d'une consultation citoyenne sur les risques écologiques ou sanitaires d'une technologie, les scientifiques doivent éclairer les enjeux par leurs connaissances, sans éluder les marges d'incertitude lorsque celles-ci existent.
4. Pour mieux organiser le débat public sur les technologies dans des domaines comme celui du numérique ou du changement climatique, le COMETS suggère une réflexion sur la création de comités d'éthique sur le modèle du CCNE ou éventuellement au sein d'un CCNE élargi à des collègues tels que le CNPEN.
5. En présence d'incertitude ou de débats sur l'application du principe de précaution, les scientifiques devraient être amenés à une réflexion approfondie sur le traitement en droit de la responsabilité civile qu'implique la preuve scientifique. Cette réflexion serait à mener avec les acteurs de la justice.
6. En dehors de toute consultation officielle, les scientifiques ont un devoir d'alerte auprès des autorités lorsqu'ils prennent conscience de risques susceptibles d'invoquer le principe de précaution dans leur domaine de compétences.
7. Les scientifiques consultés comme experts par un commanditaire au titre du principe de précaution doivent afficher avec transparence les liens d'intérêts qui pourraient interférer avec leur expertise.
8. L'expertise des scientifiques sollicités sur des questions relevant potentiellement de l'application du principe de précaution doit être collégiale, ouverte aux préoccupations de la société civile et attentive aux informations dont celle-ci est éventuellement porteuse.
9. Les scientifiques consultés comme experts au titre du principe de précaution ne sauraient endosser la responsabilité des décisions prises par leurs commanditaires. Ils doivent s'assurer que la présentation qui est faite de leur expertise aux citoyens et aux médias est conforme à leurs conclusions.
10. Les Conseils scientifiques des Instituts (CSI) du CNRS, dans le cadre de leur mission de prospective, devraient être incités à réfléchir aux risques que font courir à l'environnement et aux citoyens les recherches menées dans leur domaine. Ils pourraient, le cas échéant, échanger avec le COMETS, voire même demander à ce que celui-ci soit saisi d'en étudier les aspects éthiques, en utilisant le canal adapté à une telle saisine.

11. Les chercheurs doivent de même, à leur niveau, réfléchir sur les risques induits par leurs travaux. A ce titre, ils peuvent consulter le référent déontologue du CNRS pour les aider à se situer au regard des textes déontologiques existants. Nous les encourageons à soumettre alors le problème à l'Institut concerné, à charge pour celui-ci, si nécessaire, d'organiser l'analyse scientifique du problème et d'ouvrir à la dimension éthique pour laquelle le COMETS pourra contribuer.



V. ANNEXES

Annexe 1 : L'ingénierie climatique. Émissions négatives de CO₂ et réduction de l'albédo

L'objectif de limiter l'augmentation de température moyenne de l'atmosphère due au réchauffement climatique sous le seuil de 2°C de plus que sa valeur en 1850 conduit naturellement au développement de techniques d'ingénierie climatiques intitulées « *Negative Emissions Techniques* » (ou NET). La plupart présentent un risque associé qui incite à l'application du principe de précaution. Les techniques NET ne doivent pas être confondues avec d'autres projets d'ensemencement de l'atmosphère par des aérosols dans le but d'atténuer les effets du réchauffement (effet parasol) en modifiant l'albédo.

I-Quelques projets d'émissions négatives (NET)

a) **La plus prisée par les entreprises est la bioénergie.** Le principe est d'utiliser la combustion du bois (ou de granules) pour fabriquer de l'éthanol, puis capter le CO₂ émis par le procédé pour l'enfouir dans des failles géologiques. Cependant, les surfaces de forêt requises sont telles qu'il faudrait utiliser jusqu'à un tiers des terres agricoles mondiales, mettant en danger la ressource alimentaire et la biodiversité. Enfin, des études très récentes soulèvent le risque du stress hydrique pour des techniques très demandeuses en eau.

b) **La reforestation** : très populaire auprès des grandes compagnies industrielles, entreprises de transport ou tertiaires. Or les forêts posent leur propre problème : le temps de croissance des arbres fait qu'ils ne seront pas efficaces assez vite, l'extension des forêts se ferait au détriment des terres agricoles, les forêts elle-même pourraient se transformer en émettrice de carbone car plus fragiles sous l'effet du réchauffement. Les spécialistes préfèrent de loin l'arrêt de la déforestation.

c) **La manipulation des océans** : que ce soit la fertilisation par le carbonate de calcium ou ses dérivés chimiques (pour stimuler la soustraction directe du CO₂ atmosphérique par l'océan) ou par le fer (pour stimuler le développement des algues et donc la séquestration du CO₂ par l'activité biologique), ces projets sont aussi irréalistes que potentiellement dangereux. Le premier conduirait assez rapidement à un problème de ressource minérale, le second à l'anoxie des eaux (l'oxygène étant consommé par les bactéries qui détruisent la matière organique morte) et à l'obligation de réinjecter en permanence.

d) **Les projets de capture de CO₂ émis par les installations industrielles** pour le transporter par gazoduc vers des sites géologiques se multiplient aussi. Dix-neuf « usines » de ce type existent dans le monde, 50 sont en construction. Le coût énergétique et les émissions générées par de telles installations ne compensent pas aujourd'hui le flux de carbone piégé et le nombre de sites de stockage est limité ; cependant les effets secondaires estimés à ce jour ne sont pas insurmontables et les recherches menées comportent a priori un risque moindre que les projets cités plus haut

II-La modification du rayonnement solaire

Les protocoles proposent d'injecter des aérosols dans l'atmosphère afin de créer un gigantesque « parasol » autour de la planète. Cela peut être de l'eau au-dessus des océans (afin d'augmenter la réflectivité des nuages marins) « vaporisée » à partir de navires injecteurs. Ou encore des aérosols sulfatés, comme l'ont développé des équipes britanniques entre 2010 et 2012 (projet SPICE vite arrêté par la controverse), alors

que les Russes sont allés plus loin, pratiquant une recherche de terrain en géo-ingénierie en injectant des aérosols à partir d'hélicoptères à 200 m d'altitude.

Cette solution de court terme permettrait de gagner du temps pour mettre en place des techniques de mitigation efficaces, mais pose une question d'éthique majeure. Le coût d'injection d'aérosols sulfatés pendant 15 ans -en incluant la R&D- est énorme. Ces techniques de gestion du rayonnement solaire se rapprochent dans l'esprit des citoyens des techniques de modification du temps, dont la pratique est acceptée et continue dans de nombreux pays, malgré une efficacité qui est loin d'être établie.

III Bases de réflexions sur les possibilités d'encadrement de la géo-ingénierie : les principes d'Oxford

Des consortiums de chercheurs ont tenté d'établir des principes pour encadrer la géo-ingénierie. On citera ici les « principes d'Oxford »⁹⁵ :

- Principe 1 : La géo-ingénierie doit être régulée comme un bien public

Si le développement de techniques de géo-ingénierie se fait par le secteur privé (pas exclu par ce principe), la régulation de telles techniques devrait être contrôlée par les institutions appropriées et publiques. A noter que les expériences privées sur la fertilisation en fer ou toute autre manipulation du climat échappent à ce principe ;

- Principe 2 : Participation du public à la prise de décision sur la géo-ingénierie

Il s'agit ici de transparence : avant de développer toute technologie, il est recommandé d'informer, de consulter et d'obtenir le consentement éclairé préalable de ceux qui sont touchés par les activités de recherche. Si la technique touche un territoire (captage dans réservoir local), une consultation territoriale devrait suffire ; si la technique est mondiale (manipulation de l'albédo de la planète), un accord mondial serait requis ;

- Principe 3 : Révélation des résultats de la recherche en géoingénierie et libre accès aux résultats publiés

La mise à disposition des projets et résultats des développements technologiques aurait pour but une meilleure compréhension (appropriation) du public, voire des décideurs. Ce principe rejoint les débats sur l'intégrité scientifique (voire la recommandation du COMETS sur ce sujet). Cette mise à disposition des résultats n'est pas non plus dans la culture de la recherche privée. En outre, les revues devraient être gratuites, ce qui n'est pas le cas et est un frein à la diffusion des résultats ;

- Principe 4 : Évaluation indépendante des impacts

L'évaluation des impacts de la technologie développée doit non seulement être faite, mais par un organisme indépendant de ceux qui la développent ;

- Principe 5 : La gouvernance avant le déploiement

Toute décision en matière de déploiement ne doit être prise qu'avec des structures de gouvernance solides déjà en place, en utilisant les règles et les institutions existantes chaque fois que possible.

⁹⁵ Source : Oxford Geoengineering Programme <http://www.geoengineering.ox.ac.uk>.

Annexe 2 : L'évolution juridique du principe de précaution

En 1979⁹⁶, dans le « Principe responsabilité » le philosophe allemand Hans Jonas estime que « le pouvoir énorme qui est conféré à l'homme par la technoscience constitue un problème auquel doit répondre, en l'homme, une nouvelle forme de responsabilité ». Selon lui, « Cette responsabilité-là interdirait à l'homme d'entreprendre toute action qui pourrait mettre en danger soit l'existence des générations futures, soit la qualité de l'existence future sur terre ».

Cette réflexion servira à l'élaboration progressive du principe de précaution dont la nécessité se trouve affirmée au niveau mondial dans des conventions et des traités auxquels se sont ajoutés des « Déclarations », « Rapports » et autres communications européennes⁹⁷.

Le principe de précaution poursuit ensuite son évolution en France par intégration dans divers textes nationaux (code, loi et charte) :

- Loi Barnier n° 95-101 du 2 février 1995 qui fournit une définition du principe : « le principe de précaution, selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable »⁹⁸.
- Le principe de précaution entretient des liens directs avec divers autres codes : notamment avec le Code rural, le Code de l'urbanisme, le Code de commerce, en raison des liens de leurs activités et risques pour l'environnement. Il respecte les dispositions du bloc de constitutionnalité (principes de la charte de l'environnement, particulièrement) et du bloc de conventionalité (directives européennes, traités internationaux en rapport avec l'environnement).
En son article L110-1 II 1°, il se réfère expressément au principe de précaution qu'il définit en reprenant la définition de la loi Barnier⁹⁹ et insère quatre grands principes dans le Code rural¹⁰⁰ : précaution, action préventive et de correction, pollueur-payeur et participation du citoyen.

Simple principe juridique général, le principe de précaution voit sa force obligatoire renforcée par la Charte de l'environnement, discutée et adoptée par le Parlement en 2004 avant d'être soumise au Congrès à Versailles le 28 février 2005. Le droit de l'environnement connaît alors une consécration constitutionnelle. Elle reconnaît les droits et les devoirs fondamentaux relatifs à la protection de l'environnement. Son extension en jurisprudence à la santé (affaire dite du sang contaminé se comprend aisément au regard de la porosité avec l'environnement. Affirmant que chacun a le droit de vivre dans un environnement équilibré et respectueux de la santé, elle énonce notamment les grands principes suivants :

- Toute personne a le devoir de prendre part à la préservation et à l'amélioration de l'environnement (participation du citoyen)

⁹⁶ Pour rappel : la création du ministère de l'environnement date de 1971

⁹⁷ La Convention de Vienne pour la protection de la couche d'ozone du 22 mars 1985 (Signée par 28 pays, elle est entrée en vigueur le 22 septembre 1988), Le Traité de Maastricht du 7 février 1992 (entré en vigueur le 1er novembre 1993), Déclaration de Rio du 3-14 juin 1992

⁹⁸ Définition inscrite dans l'article L200-1 du code rural que la loi a créé

⁹⁹ Le principe de précaution, selon lequel l'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable

¹⁰⁰ Article L200-1

- Toute personne doit, dans les conditions définies par la loi, prévenir les atteintes qu'elle est susceptible de porter à l'environnement ou, à défaut, en limiter les conséquences (principe de prévention)
- Toute personne doit contribuer à la réparation des dommages qu'elle cause à l'environnement, dans les conditions définies par la loi (principe pollueur-payeur)

En son article 5, la Charte se réfère expressément au principe de précaution¹⁰¹ : « Lorsque la réalisation d'un dommage, bien qu'incertaine en l'état des connaissances scientifiques, pourrait affecter de manière grave et irréversible l'environnement, les autorités publiques veillent, par application du principe de précaution et dans leurs domaines d'attributions, à la mise en œuvre de procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires et proportionnées afin de parer à la réalisation du dommage ».

Le texte ne reprend donc pas la définition de la loi Barnier et du code de l'environnement mais conserve la notion de dommage incertain.

Il articule des droits et des devoirs de tout citoyen dans les articles 2 à 4.

Tandis qu'il met à la charge des seules autorités publiques la mise en œuvre de mesures adaptées¹⁰². Au titre des procédures d'évaluation des risques et à l'adoption de mesures provisoires, les autorités seront ainsi conduites à recourir à l'expertise scientifique que prévoit l'article 7.

Le Conseil constitutionnel reconnaît par une décision n° 2016-737 DC du 4 août 2016 relative à la loi pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, clairement la valeur constitutionnelle du principe de précaution.

Pour conclure, on pourrait envisager la création d'un conseil permanent¹⁰³ consacré au principe de précaution. Ce conseil regrouperait l'ensemble des acteurs concernés, les scientifiques pourraient y participer et accompagneraient la réflexion sur l'évolution du principe de précaution, ses champs d'application et son utilisation. Une approche plus spécifiquement juridique pourrait tendre à la création d'un Observatoire Juridique du Principe de Précaution regroupant en son sein des scientifiques et des juristes, permettant aux uns et aux autres de se sensibiliser¹⁰⁴ aux problématiques existantes et aux possibles mises en cause de responsabilité.

* * *

¹⁰¹ Qui se conjugue donc avec les principes de prévention et de réparation des articles 3 et 4 mais aussi avec les obligations de l'éducation et de la formation de l'article 8 et de la recherche de l'article 9.

¹⁰² Faisant ainsi du principe de précaution un principe d'action (procédures d'évaluation ainsi que mesures provisoires et proportionnées).

¹⁰³ A l'image du Comité Consultatif National d'Ethique pour les sciences de la vie et de la santé créé en 1983

¹⁰⁴ Et peut-être de se responsabiliser aux effets de l'évolution.

VI. GLOSSAIRE DES ABREVIATIONS

ARN : Acide ribonucléique
 ANSES : Agence nationale de sécurité de l'alimentation, de l'environnement et du travail
 CCNE : Comité Consultatif National d'Éthique
 CFC : Chlorofluorocarbures
 CSPRT : Conseil Supérieur de Prévention des Risques Technologiques
 CIRAD : Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
 CNIL : Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés
 CNPEN : Comité National Pilote d'Éthique pour le Numérique
 CRISPR : *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*
 DBCP : Dibromo-chloro-propane
 DCO : Demande chimique en oxygène
 DDT : Dichlorodiphényltrichloroéthane
 EEA : *European Environment Agency*
 EHS : Electro-hyper-sensibilité
 GIEC : Groupe d'experts Inter-gouvernemental sur l'Évolution du Climat
 GSIEN : Groupement de scientifiques pour l'information sur l'énergie nucléaire
 IESF : Ingénieurs et scientifiques de France
 IFREMER : Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer
 IN2P3 : Institut national de physique nucléaire et de physique des particules
 INPES : Institut national de prévention et d'éducation pour la santé
 INRAe : Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
 LHC : *Large Hadron Collider*
 MEDEF : Mouvement des entreprises de France
 MIS : Mission pour l'Intégrité Scientifique
 NET : *Negative Emission Techniques*
 NIMBY : *Not in my back yard*
 OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Économique
 OMS : Organisation Mondiale de la Santé
 ONG : Organisation non gouvernementale
 PCB : Polychlorobiphényles
 PPRT : Plan de Prévention des Risques Technologiques
 OPECST : Office parlementaire des choix scientifiques et techniques
 REACH : *Registration Evaluation and Authorisation of Chemicals*
 ROR : Rougeole Oreillons Rubéole
 SPICE : *Stratospheric Particle Injection for Climate*

VII. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier Alain Omont, Joël Moret-Bailly et Thierry Wahl pour leur relecture critique de cet avis.

