

AllEnvi

Alliance nationale de recherche
pour l'environnement

Groupe thématique

RISQUES ENVIRONNEMENTAUX, NATURELS ET ÉCOTOXIQUES

PERSPECTIVES SCIENTIFIQUES DANS LE DOMAINE DES RISQUES

Octobre 2013

Les 12 membres fondateurs



Sommaire

Résumé exécutif.....	4
Introduction.....	8
1 Risques environnementaux et sanitaires d'origine anthropique.....	10
1.1 Conséquences environnementales et sanitaires des rejets ponctuels et diffus de substances chimiques, microbiologiques et de radionucléides dans l'environnement.....	11
1.1.1 Enjeux sociaux des risques d'origine anthropique.....	11
1.1.2 Le cas particulier des perturbateurs endocriniens.....	12
1.2 Risques environnementaux d'origine biologique.....	13
1.2.1 Maladies infectieuses émergentes (MIE).....	14
1.2.2 Invasions biologiques.....	16
1.2.3 Organismes génétiquement modifiés (OGM).....	16
1.3 Risques sanitaires et pour les écosystèmes liés aux agents physiques non ionisants (sonores, électromagnétiques, nanomatériaux, autres substances...).....	18
1.3.1 Bruit	18
1.3.2 Risques liés aux rayonnements non ionisants.....	19
1.3.3 Risques liés aux particules fines.....	19
1.3.4 Risques liés aux nanomatériaux.....	20
1.3.5 Risques liés à la dissémination de déchets macroscopiques dans le milieu marin.....	21
1.4 Risques liés à l'exploitation des ressources naturelles.....	21
1.4.1 Exploitation des gaz et huile de roche-mère (GHRM).....	21
1.4.1.1 Une terminologie peu précise.....	22
1.4.1.2 Une méfiance vis-à-vis de la fracturation hydraulique.....	22
1.4.1.3 Des controverses sur les risques et impacts.....	23
1.4.1.4 Des enjeux économiques et géopolitiques.....	24
1.4.1.5 Un déficit de transparence et de communication sur un projet sensible.....	25
1.4.2 Exploitation des ressources minérales marines profondes.....	25
1.4.3 Exploitation des hydrates de méthane.....	26
1.4.3.1 Un phénomène géologique particulier.....	26
1.4.3.2 Une répartition planétaire.....	27
1.4.3.3 Vers une exploitation des hydrates de gaz.....	27
1.4.3.4 Des risques d'instabilité et de dégazage massif.....	27
2 Risques Naturels.....	29
2.1 Les différents aléas et risques naturels et les enjeux sociaux et environnementaux.....	29
2.1.1 Aléas d'origine tellurique.....	29
2.1.2 Aléas d'origine extra-terrestre.....	30
2.1.3 Aléas naturels d'origine météorologiques.....	31
2.1.4 Enjeux sociétaux et environnementaux des aléas naturels.....	31
2.2 De l'aléa au risque ; liens entre événements extrêmes et grandes catastrophes.....	32
2.3 Évaluer les paramètres déterminants de l'aléa pour mieux contraindre le risque.....	32
2.4 Amélioration des méthodes d'observation intégrées pour une meilleure connaissance des aléas et risques d'origine naturelle.....	33
2.5 Impact des changements globaux (climat, occupation des sols, vulnérabilité...) sur les risques d'origine naturelle.....	37
2.6 Protection du patrimoine culturel face aux risques d'origine naturelle.....	38
2.7 Protection des installations industrielles face aux risques d'origine naturelle (Na-Tech).....	39
2.8 Évaluation de l'impact de la prévention sur la réduction du coût des risques d'origine naturelle.....	40
3 Méthodologie de l'évaluation des risques.....	41
3.1 Vulnérabilité systémique des éléments exposés aux aléas naturels ou anthropiques.....	41

3.1.1 Vulnérabilité face aux aléas anthropiques.....	41
3.1.2 Vulnérabilité face aux aléas naturels.....	42
3.2 Quantification des incertitudes épistémiques et aléatoires et leur propagation dans la chaîne d'évaluation des risques.....	42
3.3 Changements d'échelles, intégration et déconvolution de la vision globale. Construction d'une vision intégrée entre épidémiologie toxicologie et écotoxicologie.....	43
3.3.1 L'évaluation de l'impact sur la santé d'une modification de l'environnement.....	44
3.3.2 La recherche des facteurs environnementaux à l'origine d'une modification de l'état de santé.....	44
3.3.3 Besoins de recherche.....	44
3.4 Analyse multirisques des effets simultanés ou en cascade, intégrant les probabilités conjointes.....	45
3.5 Les grandes actions et infrastructures liées au domaine des risques.....	47
4 Gestion des risques.....	48
4.1 Enjeux économiques de la gestion des risques	48
4.2 Les enjeux sociaux.....	49
4.3 Bases scientifiques des règlements et normes.....	51
4.4 Développer et structurer l'expertise pour la décision publique.....	52
5 Enjeux des risques pour le Sud	59
5.1 Risques naturels telluriques et météorologiques.....	59
5.2 Agriculture, sols, forêts, eau.....	60
5.3 La ville et l'industrie.....	61
5.4 Maladies infectieuses émergentes (MIE).....	61
6 Pour un agenda stratégique de recherche sur les risques.....	62
6.1 Recherches prioritaires pour les risques anthropiques.....	63
6.1.1 Risques liés aux substances toxiques.....	63
6.1.2 Risques biologiques et les maladies infectieuses émergentes.....	64
6.1.3 Risques sanitaires et pour les écosystèmes liés aux agents physiques non ionisants.....	65
6.1.3.1 Bruit.....	65
6.1.3.2 Rayonnements non ionisants.....	65
6.1.3.3 Risques liés aux particules fines.....	66
6.1.3.4 Risques liés aux nanomatériaux.....	67
6.1.3.5 Risques liés à la dissémination de déchets macroscopiques dans le milieu marin.....	67
6.1.4 Risques liés à l'exploitation des ressources naturelles.....	67
6.1.4.1 Exploitation des gaz et huile de roche-mère (GHRM).....	67
6.1.4.2 Exploitation des ressources minérales marines profondes.....	68
6.1.4.3 Exploitation des hydrates de méthane.....	68
6.2 Risques Naturels.....	69
6.2.1 Connaître les différents aléas et risques naturels et les enjeux sociaux et environnementaux.....	69
6.2.2 Évaluer les paramètres déterminants de l'aléa pour mieux contraindre le risque.....	69
6.2.3 Amélioration des méthodes d'observation intégrées pour une meilleure connaissance des aléas et risques d'origine naturelle.....	70
6.2.4 Impact des changements globaux sur les risques d'origine naturelle.....	71
6.2.5 Protection du patrimoine culturel face aux risques d'origine naturelle.....	71
6.2.6 Protection des installations industrielles face aux risques d'origine naturelle (Na-Tech).....	71
6.2.7 Évaluation de l'impact de la prévention sur la réduction du coût des risques d'origine naturelle.....	71
6.3 Méthodologie de l'évaluation des risques.....	72
6.4 Aborder résolument la dimension sociale des risques.....	73
6.5 Développer l'expertise pour une meilleure gestion des risques.....	74
Conclusions.....	75
Annexe : Liste des membres du Groupe Thématique 9 - Risques environnementaux, naturels et écotoxiques	76

Résumé exécutif

Le risque est un terme apparemment simple qui recouvre cependant une complexité extrême. Si le sens commun comprend bien la notion de danger, souvent comme une fatalité (à travers les sports ou activités dangereuses) et celle de risque qui fait bien référence aux probabilités (on calcule les risques, on les maîtrise, mais le risque zéro n'existe pas), pour les scientifiques cela recouvre des aspects multiples touchant à de nombreuses disciplines. On distingue par exemple d'une part les risques d'origine naturelle, liés aux mouvements de l'écorce terrestre, aux événements d'origine météorologique, voire extra-terrestre comme la collision avec des astéroïdes ; d'autre part les risques d'origine anthropique qui prennent leur source dans les activités humaines. Cette distinction qui correspond notamment à la réalité des équipes, organismes et disciplines concernées ne doit pas être une frontière. Les concepts d'aléa et de vulnérabilité sont identiques dans les deux domaines. L'influence de l'activité humaine sur la vulnérabilité, mais aussi sur les aléas, via les changements à l'échelle du globe ou des modifications locales des milieux, relativise le caractère strictement naturel de la plupart des risques ainsi étiquetés. Le groupe thématique 9 (GT9) d'AllEnvi : « Risques environnementaux, naturels et écotoxiques » a donc insisté, dans le présent document, sur les enjeux méthodologiques communs de la recherche sur les risques.

Une pratique courante consiste à séparer évaluation et gestion des risques, la première seule étant étroitement liée à la recherche. Il n'est pas certain qu'il ne s'agisse pas à l'origine d'une difficulté de traduction des concepts américains de « risk assessment » et « risk management », en réalité ce qui semble impératif c'est la séparation des rôles entre expert donnant un avis sur les risques et décideur, prenant les mesures de gestion et de prévention dans l'exercice de ses responsabilités. Le GT9 a donc délibérément abordé les enjeux de recherche pour la gestion des risques, sans abandonner, évidemment, ceux qui concernent l'évaluation des risques. Enfin, puisque cela fait débat, nous avons également franchi la limite, certes très poreuse, entre recherche et expertise en proposant une réflexion sur cette dernière qui constitue une activité importante des organismes d'AllEnvi.

Les risques anthropiques sont l'objet de nombreuses interrogations sociales notamment dès lors qu'ils concernent la santé humaine. Le caractère insidieux et très difficilement prouvable des risques chroniques liés aux faibles doses de substances toxiques questionne le monde de la recherche autant que celui des décideurs. Le principe de précaution est régulièrement attaqué au nom d'un progrès intrinsèquement vertueux tandis que pour beaucoup de citoyens et de chercheurs c'est le monde de la science qui se trouve en défaut de responsabilité quant aux impacts de ses productions. Nous avons distingué différentes grandes questions qui méritent un approfondissement significatif de l'activité de recherche dans ce domaine : 1) les conséquences environnementales et sanitaires des rejets ponctuels et diffus de substances chimiques, microbiologiques et de radionucléides sur la santé humaine

et les écosystèmes, avec un focus particulier sur les perturbateurs endocriniens ; 2) les risques d'origine biologique (Maladies infectieuses émergentes, organismes génétiquement modifiés et invasions biologiques) ; 3) les risques liés aux agents physiques (rayonnements non ionisants, nanomatériaux, macro-déchets, particules fines ; 4) les risques liés à l'exploitation des ressources géologiques et marines (gaz de roche mère, ressources minérales profondes et hydrates de gaz). Les questions majeures dans ces domaines tiennent aux effets de faibles doses, aux conséquences des modifications du fonctionnement des écosystèmes et aux technologies nouvelles non encore stabilisées.

Les risques naturels sont abordés sous l'angle de l'aléa, avec une catégorisation des différents aléas et risques naturels, et sous l'angle de la vulnérabilité, en matière d'enjeux sociaux et environnementaux. On distingue les aléas telluriques, extraterrestres et météorologiques. Le document aborde également la question du passage de l'aléa au risque, au sujet notamment des événements extrêmes et des grandes catastrophes. Il est également souligné l'importance des méthodes d'observation intégrées pour une meilleure connaissance des aléas et risques d'origine naturelle. Nous traitons ensuite des impacts des changements globaux sur les risques d'origine naturelle en termes de vulnérabilité. Nous nous intéressons à la protection du patrimoine culturel et à celle des installations industrielles. Enfin, nous développons l'intérêt d'évaluer l'impact de la prévention sur la réduction du coût des risques d'origine naturelle.

Un des apports originaux de ce document tient à son traitement dans un chapitre spécifique (chapitre 3 page 41) des aspects méthodologiques de la recherche sur les risques de façon intégrée et pluridisciplinaire. Il est important à nos yeux de développer une recherche de qualité sur ces aspects qui concernent : 1) l'étude de la vulnérabilité systémique des sociétés, territoires et écosystèmes face aux aléas de toute nature ; 2) le traitement des incertitudes épistémiques et aléatoires, notamment dans un contexte d'évaluation des risques ; 3) les outils de gestion des changements d'échelle et d'analyse globale des risques intégrant des enjeux prédictifs et de surveillance ; 4) l'analyse des effets conjoints de risques multiples, y compris dans des situations de dépendance (effets dominos) ; 5) la question des grandes infrastructures liées aux risques. Les projets de recherche gagneront à prendre en compte ensemble plusieurs des dimensions du risque évoquées plus haut et à intégrer l'ensemble des disciplines concernées. Les enjeux de surveillance de l'environnement sont également soulignés pour leurs apports majeurs à la science du risque, sous réserve de pérennité des systèmes d'observation.

L'importance des sciences humaines et sociales est constamment soulignée dans le document. À l'évidence la question des risques ne peut être réduite à sa vision probabiliste sans comprendre également ce qu'elle signifie pour les populations concernées. La dimension économique est cruciale, les recherches sur l'analyse coût-bénéfice ou l'analyse multi-critères ont, à cet égard, une importance majeure. Les questions sont d'autant plus difficiles que s'agissant de phénomènes probabilistes il est toujours difficile de consentir le coût des mesures de prévention quand aucun événement ne se produit ; y compris du fait même de ces mesures de prévention coûteuses ! Mais cette dimension est loin d'être la seule. La compréhension des enjeux sociaux des risques est fondamentale et encore

trop peu développée par la communauté scientifique. La perception des risques est très variée, selon leur nature évidemment, mais également selon la nature du danger, la situation sociale des personnes concernées, le bénéfice tiré de l'activité qui produit le risque ou encore la confiance accordée aux chercheurs, aux décideurs et aux politiques de sûreté. Les enjeux principaux sont les suivants, sans exhaustivité : perception des seuils réglementaires, dont la réalité objective est forcément questionnable, le rôle des comportements dans la prise en compte ou au contraire la négation des risques, l'étude détaillée des mécanismes d'alerte, d'évaluation et de décision, mise en perspective historique et comparaisons internationales des politiques publiques.

L'expertise, si elle n'est pas à proprement parler une activité de recherche, a sa place dans ce document de stratégie scientifique car elle s'appuie de façon extrêmement étroite sur la recherche. Les scientifiques du risque sont de toutes façons concernés par l'expertise et peuvent se retrouver, faute d'anticipation des problèmes, en situation délicate. Nous partons des exemples du séisme de l'Aquila et de la crise de la pandémie de grippe de 2009 pour illustrer la nécessité de se saisir des questions liées à l'expertise. Ce sont à la fois des questions de recherche et des enjeux d'organisation du lien entre la recherche et la décision, notamment publique.

Les enjeux des risques au sud sont soulignés par la présence d'un chapitre dédié. Ces risques sont souvent, mais pas toujours, identiques aux risques équivalents dans les pays du nord, même dans ce cas ils méritent des recherches particulières du fait d'aléas renforcés, ou de vulnérabilités accrues dues notamment à des situations climatiques ou sociales. Le couplage de l'accroissement économique et démographique, de l'urbanisation et de ces vulnérabilités est source potentielle de catastrophes qu'il convient de prévenir. La gestion des risques des pays émergents est également comprise comme une opportunité de mise en place *ab initio* d'un développement plus durable.

Le chapitre 6 page 62 développe un agenda de recherche sur les risques. Le groupe thématique risques souligne l'intérêt d'une programmation intégrée de la recherche sur les risques afin de développer des visions et des outils méthodologiques génériques et de favoriser l'approche interdisciplinaire. Cet agenda propose également des questions de recherche spécifiques à chacun de secteurs.

Dans le domaine des risques anthropiques la distinction classique des risques chroniques liés aux substances toxiques, aux agents biologiques et aux agents physiques reste d'actualité. Les éléments concernant la toxicologie et l'écotoxicologie, sciences qui contribuent à l'évaluation des risques, sont cohérents avec le plan d'action soumis à la ministre de l'enseignement supérieur et de la recherche en juillet 2013. Un chapitre explore les questions de risques liées à l'exploitation des hydrates de méthane et des gaz de roche mère, questions politiques et environnementales fortes de l'actualité.

Concernant les risques naturels, le document questionne les enjeux de connaissance des aléas, de la vulnérabilité et l'importance des instruments d'observation des risques et de leurs causes. La question des changements globaux et de leurs interactions avec les risques est également abordée. Le chapitre évoque également les impacts des risques sur le patrimoine culturel et les interactions avec

les risques industriels. Enfin, la question du coût de la prévention est mise en évidence avec les analyses coût-bénéfices et les analyses multicritères.

Le chapitre sur la méthodologie de l'évaluation des risques souligne l'importance des recherches sur les enjeux de modélisation et d'incertitudes épistémiques et aléatoires. La dimension sociale des risques et l'appui scientifique à la gestion des risques font l'objet d'un paragraphe qui signale l'importance de ce sujet. Cela ne signifie pas qu'il doit systématiquement faire l'objet de recherches isolées, au contraire, nous attendons des programmes qu'ils couplent des approches complémentaires dans une logique d'interaction positive entre les disciplines. Enfin, l'agenda évoque les enjeux d'expertise mentionnées précédemment pour en rappeler l'importance pour la recherche.

En conclusion, la stratégie de recherche du groupe thématique « Risques naturels et écotoxiques » ambitionne de donner de son domaine une présentation complète et milite pour une vision intégrée des recherches sous la forme, par exemple, d'un grand programme de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Elle constitue également un document à l'usage des membres d'AllEnvi pour les appuyer dans la définition de leur stratégie concernant ce domaine scientifique proche des politiques publiques et objet d'une demande sociale forte.

Introduction

La recherche sur les risques est à la fois concentrée et répartie. Elle est concentrée dans des organismes d'expertise et de recherche qui alimentent ainsi les connaissances qu'ils mettent eux-mêmes à profit pour évaluer les risques, notamment pour les décideurs publics. Elle est également répartie au sein d'un grand nombre d'organismes de recherche et d'établissements d'enseignement supérieur car chaque spécialité contribue à la connaissance des risques sans forcément aborder celui-ci comme une discipline. Cette caractéristique donne tout son intérêt à un groupe thématique d'AllEnvi qui regroupe l'ensemble des partenaires pour structurer l'offre de recherche nationale dans le domaine des risques.

On distingue en général les risques naturels de ceux liés directement aux activités anthropiques mais on les explore selon une méthodologie commune. Aujourd'hui, un des enjeux forts consiste à analyser les interactions qui existent entre les modifications de l'environnement d'origine anthropique, l'aléa et la vulnérabilité aux risques des écosystèmes et des sociétés humaines.

Le domaine des risques naturels concerne les conséquences physiques, sociales, économiques et écologiques de phénomènes naturels prévisibles mais pas toujours prédictibles¹. Comprendre l'origine de ces phénomènes, estimer leur probabilité d'occurrence, leurs signes précurseurs, évaluer la vulnérabilité des éléments exposés sont des enjeux majeurs pour les recherches dans ce vaste domaine où l'on retrouve risques telluriques (séismes, éruptions volcaniques et mouvements gravitaires), extra-terrestres (collisions avec des astéroïdes), météorologiques (inondations, cyclones, vents violents, fortes précipitations, orage, neige et verglas, canicule, avalanches, sécheresses, feux de forêts et certains mouvements de terrain). La plupart de ces phénomènes sont interdépendants et potentiellement synergiques dans leurs conséquences.

Ce groupe thématique s'intéresse également aux risques liés à aux activités humaines, à la fois pour ses effets sur la santé humaine et pour tous ceux qui pourraient affecter les écosystèmes. Sont concernés l'impact des substances chimiques, des agents biologiques (agents infectieux ou toxiques, toxines), des agents physiques (électromagnétisme) ou des radioéléments qui sont abordés depuis l'exposition jusqu'aux effets (relation dose-réponse). Il est fréquent qu'exposition et effets ne puissent être anticipés correctement de façon déterministe et le groupe promeut l'approche probabiliste, même en situation de pollution chronique. Il en est de même de l'impact des microorganismes pathogènes ou toxiques et des très nombreuses maladies transmissibles, et en particulier de celles que l'on nomme les maladies infectieuses émergentes (MIE). Une très grande majorité d'entre-elles sont d'origine animale ou environnementale, leur émergence et leur transmission répondent souvent

¹ La prédiction implique un outil mathématique déterministe à l'inverse de la prévision qui est une vision d'expert.

à des ruptures dans les équilibres dynamiques (altération de la diversité biologique, modifications d'écosystèmes, contacts avec les vecteurs ou les réservoirs, afflux de population, migration, promiscuité...). Les risques industriels, en particulier les risques accidentels aux sein des entreprises ne font pas partie du périmètre traité par ce groupe.

Le présent document synthétise l'ensemble des réflexions du groupe thématique 9, consacré aux risques. Il aborde les notions essentielles qui spécifient et structurent ce vaste domaine, puis il propose des pistes de recherche. Ces pistes ont vocation à alimenter la réflexion stratégique des membres d'AllEnvi. Elles visent également l'éclairage du conseil de l'alliance, notamment lors des exercices annuels de programmation scientifique avec l'Agence nationale de la recherche.

Dans la mesure où les domaines des risques anthropiques ou naturels impliquent des communautés bien distinctes nous les aborderons séparément pour les expliciter puis nous tenterons d'aborder les enjeux communs de l'évaluation et de la gestion des risques naturels et anthropiques. Ces enjeux impliquent une intégration encore plus poussée des disciplines, y compris des sciences humaines et sociales. Alors que le rapport bénéfice/risque semble être une notion intuitive, elle n'est pas forcément partagée au même niveau pour tous les aléas et diffère largement en fonction de l'histoire industrielle des sociétés. Nous traiterons enfin de façon distincte, dans un dernier chapitre, la question des risques dans les pays du Sud. Cette distinction est artificielle sur le plan épistémologique mais elle s'impose étant donné l'ampleur des problèmes et des enjeux dans ces pays à forte croissance démographique et très divers dans leurs approches de la protection de la santé et de l'environnement.

D'autres groupes thématiques, comme ceux qui s'intéressent spécifiquement au climat, à l'alimentation, à l'eau, à la ville ou à la biodiversité ne peuvent ignorer la notion de risque. Le groupe thématique risque est ouvert à l'organisation de réflexions scientifiques aux interfaces avec ces groupes. Ce document peut d'ailleurs constituer la base de telles réflexions, tentant de dessiner un cadre commun et cohérent pour l'analyse des risques qui est souvent abordée de façon trop spécifique.

1 Risques environnementaux et sanitaires d'origine anthropique

Ces risques sont régulièrement évoqués dans la presse et font l'objet d'une inquiétude sociale grandissante dans les pays du Nord. Les opinions publiques placent les risques liés aux activités humaines bien devant ceux d'origine naturelle dans l'échelle de leurs préoccupations. A titre d'exemple, le baromètre annuel de l'IRSN² sur les risques montre bien qu'une majorité des Français fait confiance aux actions publiques contre l'insécurité routière, les incendies de forêt ou la prévention du sida. En revanche, la lutte contre les pollutions, la gestion des risques, liés par exemple aux nanoparticules, aux organismes génétiquement modifiés ou aux pesticides, rejoignent dans la défiance ceux liés à l'accident de Tchernobyl, avec un taux de confiance inférieur à 20 %. (Cf. illustration 1 page 10)

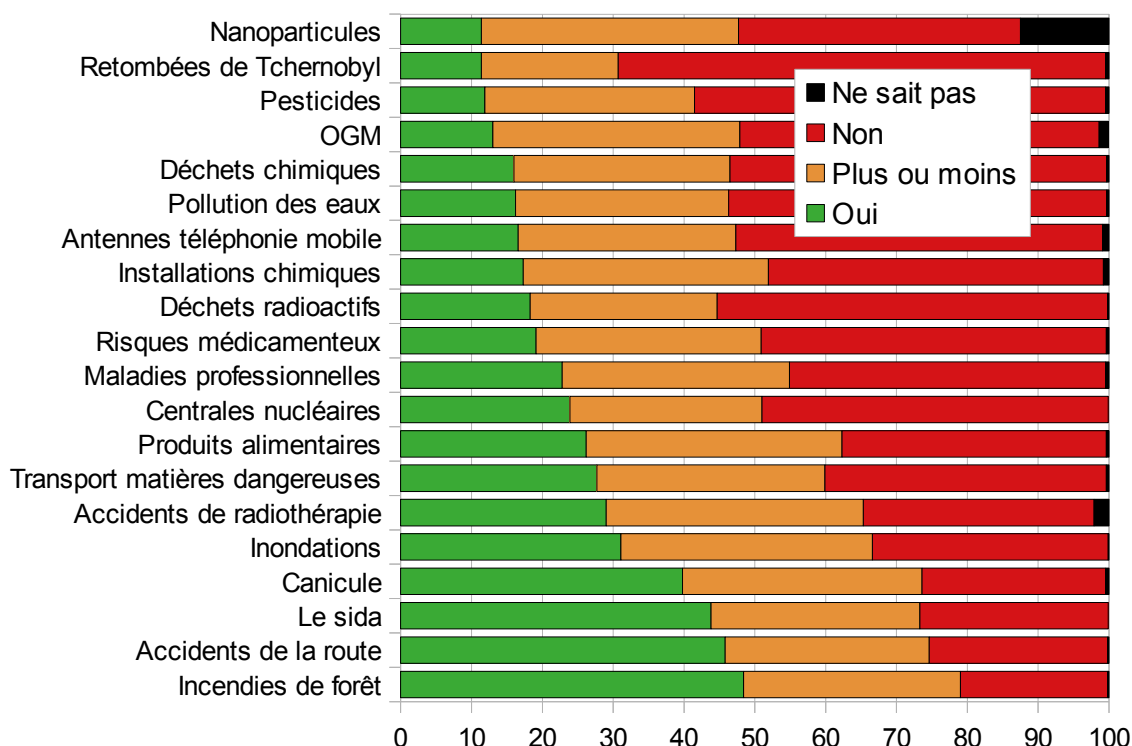


Illustration 1 : Réponses des français à la question : "Avez-vous confiance dans les autorités publiques françaises pour leurs actions de protection des personnes dans les domaines suivants ?". Source : Baromètre IRSN 2012

L'origine de ces risques qui implique une action de l'homme et donc souvent des intérêts économiques, explique en partie l'exigence des populations concernées. Une autre composante de cette sensibilité de la population tient à la chronicité et au caractère imparable de certaines expositions. On peut, par exemple, penser aux substances chimiques qui se sont accumulées dans l'environne-

² Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

ment à des doses très faibles et peuvent être la cause de maladies graves après des décennies d'exposition.

Cette idée que le danger est partout et qu'il est lié à une exposition insidieuse dont il est difficile de comprendre la probabilité explique probablement que les citoyens deviennent de plus en plus sensibles aux risques anthropiques chroniques. Il faut aussi reconnaître que nous continuons à payer les conséquences de certaines erreurs du passé comme le cas de l'exposition à l'amiante en milieu professionnel. Cela et quelques nouvelles inquiétudes comme la situation de la pollution particulaire en ville, pour laquelle la France risque une condamnation au niveau européen, ajoutent des causes au stress ressenti par les personnes qui s'estiment potentiellement victimes de ces nuisances.

Une grande inconnue actuelle est celle des risques que les activités anthropiques font courir aux écosystèmes et à la biodiversité. Ce domaine est encore largement mal connu et de nombreux documents ont appelé à son renforcement. Il s'agit d'un champ que le groupe aborde largement, notamment via le groupe commun AllEnvi-Aviesan (Cf. chapitre 1). Il mérite également un lien étroit avec le groupe biodiversité d'AllEnvi.

1.1 Conséquences environnementales et sanitaires des rejets ponctuels et diffus de substances chimiques, microbiologiques et de radionucléides dans l'environnement

Il convient de signaler en préambule de ce paragraphe l'existence d'un Groupe de travail mixte entre les alliances AllEnvi, Aviesan et Athéna chargé de proposer un plan d'action pour la toxicologie et l'écotoxicologie. Ce groupe s'intéresse à l'évaluation et à la prévision de l'écodynamique et de la bio-géochimie des contaminants ainsi qu'aux effets délétères des toxiques sur la santé humaine, le fonctionnement des écosystèmes et la biodiversité. Les enjeux sociaux prennent une importance majeure dans ce domaine qui fait l'objet d'une forte inquiétude sociale. Les lignes de recherches proposées ici sont complémentaires de celles relatives à la toxicologie et l'écotoxicologie prédictives, thème fédérateur du groupe de travail inter-alliances.

1.1.1 Enjeux sociaux des risques d'origine anthropique

La perception du risque sanitaire par le public et son interrogation sur la gestion de ce risque ont fortement évolué dans notre société en raison de diverses crises réelles ou perçues. Parallèlement, la sensibilité du public au maintien et à la restauration de la qualité de l'environnement s'est profondément accrue. La préservation des ressources, des habitats et des diversités génétique et biologique est devenue un enjeu social majeur et un défi pour la réglementation. Les interrogations du public, relevant de sa curiosité ou de ses inquiétudes, sont désormais de plus en plus grandes. La perception du risque n'est pas forcément reliée directement avec son niveau objectif, quand il est objectivable. Le risque est une construction sociale qui tient compte d'un grand nombre de facteurs que la recherche en sciences sociales peut aider à expliciter. Parmi ces facteurs, le bénéfice perçu pour la société peut tenir une place importante, montrant ainsi qu'une rationalité sociale existe qui n'est pas

toujours prise en compte par les décideurs. L'histoire récente des crises sanitaires montre que les populations soumises à un risque d'origine anthropique peuvent être, au même titre que les personnes plus "informées" (chercheurs, décideurs, journalistes), à l'origine d'alertes au risque pertinentes et justifiées.

Face à la multitude des rejets ponctuels et diffus de substances chimiques, de micro-organismes et de radionucléides dans l'environnement, notamment aux doses infinitésimales, et au nombre croissant de multi-contaminations chroniques des écosystèmes, l'enjeu est de disposer du corpus de connaissances qui permettra une compréhension et une évaluation complètes des risques, leur gestion efficace et une réglementation raisonnée. Cet enjeu et les objectifs qu'il sous-tend sont très loin d'être atteints. Il est trivial d'affirmer que le « risque zéro n'existe pas » mais cela ne peut constituer la seule explication pour le public face aux enjeux du rapport des bénéfices aux risques.

Les inquiétudes reposent en partie à la fois sur des lacunes de connaissance et sur un déficit de prise en compte des aspirations sociales par les gestionnaires des risques. L'accompagnement pédagogique, le dialogue et la prise en compte des demandes des parties prenantes tant au niveau de l'évaluation des risques que de la recherche semblent être les conditions *sine qua non* du retour de la confiance sociale dans le domaine des risques.

1.1.2 Le cas particulier des perturbateurs endocriniens

Concernant les perturbateurs endocriniens (PE), plusieurs raisons majeures conduisent à faire un effort particulier. Leur toxicité doit absolument être établie afin de diminuer les risques sanitaires et environnementaux. Ils posent, par leur mode d'action très spécifique, un grand nombre de questions qui se situent dans le contexte des effets des faibles doses et des mélanges de substances. Ils sont actuellement au centre de propositions de révision des outils d'évaluation des relations dose-réponse dont les conséquences pourraient être étendues à bien d'autres substances. Enfin, ils illustrent bien les enjeux couplés en matière de santé publique et de préservation de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes.

Le récent rapport du Programme des Nations Unies pour l'environnement et de l'Organisation mondiale de la Santé³ actualise l'état de l'art dans le domaine. Il constate que des troubles endocriniens sont fréquents et s'accroissent chez l'Homme, que des effets endocriniens sont constatés dans la faune sauvage, et que des substances à effet endocrinien sont identifiées au laboratoire. La baisse de la qualité du sperme des hommes jeunes (jusqu'à 40 %), l'accroissement des anomalies génitales, des cancers reliés au système endocrinien et les troubles neurologiques liés à la thyroïde seraient liés à près de 800 substances chimiques suspectes dont seule une petite partie est connue sur le plan toxicologique.

³ State of the science of endocrine disrupting chemicals 2012 / édité by Åke Bergman, Jerrold J. Heindel, Susan Jobling, Karen A. Kidd and R. Thomas Zoeller. United Nations Environment Programme and the World Health Organization, 2013

L'exposition des humains et de la faune sauvage revêt une dimension planétaire du fait du transport à longue distance des molécules via diverses voies. Si au départ quelques substances organiques particulièrement persistantes dans l'environnement (POP) avaient été identifiées comme les causes probables de ces désordres biologiques, on sait aujourd'hui qu'un bien plus grand nombre de molécules sont concernées, que l'exposition tend à s'accroître et qu'elle n'est pas seulement liée à la voie alimentaire.

La causalité exacte de l'accélération de l'incidence des maladies ces dernières décennies n'est pas formellement établie mais ne saurait être d'origine génétique. Parmi les associations maintenant prouvées on sait que les anomalies de descente testiculaire sont liées à l'exposition maternelle au diéthylsilbestrol, aux éthers de polybromodiphényles et à certains pesticides. Les polychlorobiphényles (PCB) sont eux liés aux cancers du sein et de la prostate, dans ce dernier cas via l'exposition des travailleurs. Les liens avec les estrogènes présents dans l'environnement ne sont en revanche pas établis. Les PCB et les pesticides organophosphorés sont liés aux anomalies de développement neuronal.

Au-delà de ces constatations, le dossier des PE présente encore de nombreuses lacunes de la connaissance épidémiologique. Les évaluateurs de risques manquent de méthodes reconnues et validées internationalement pour établir les effets de certaines classes de PE, bien que certaines de ces méthodes existent au sein des laboratoires de recherche. On ne dispose cependant pas de modèle de laboratoire des effets cancérigènes ou des maladies hormonales chez l'homme.

Il convient donc de renforcer sérieusement les recherches françaises dans le domaine des perturbateurs endocriniens⁴. Un des moyens efficaces est de solliciter régulièrement la communauté scientifique via des appels à projets de recherche, par exemple via le programme national de recherche sur les perturbateurs endocriniens (PNRPE). Un levier complémentaire consiste à demander aux organismes de recherche de donner un niveau de priorité accru aux thèmes qui concernent les PE et d'en rendre compte régulièrement. Une troisième approche (top-down) serait de proposer un programme ambitieux sur un aspect particulier de la recherche sur les PE et de mobiliser les laboratoires concernés.

1.2 Risques environnementaux d'origine biologique.

Depuis un siècle, les activités humaines ont fortement contribué aux changements environnementaux à l'échelle planétaire : réchauffement climatique, déforestation massive et urbanisation, changements des pratiques agricoles, disséminations d'agents pathogènes, proliférations de microorganismes toxiques (microalgues, cyanobactéries)... Parmi celles-ci, l'intensification et la globalisation de l'agriculture ainsi que l'augmentation du commerce international et des migrations humaines ont brisé des barrières naturelles à la dispersion causant une redistribution sans précédent de nombreux organismes (Kolar & Lodge 2001). Dans le même temps, il est de plus en plus évident que ces

⁴ Ce point fait l'objet du travail en cours pour définir une stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens dans le cadre de la feuille de route de la transition environnementale.

changements globaux jouent un rôle clés dans l'émergence des maladies chez l'Homme (Tatem et al. 2006), la faune sauvage (Daszak et al. 2000), les animaux domestiques (Cleaveland et al. 2001), et les plantes (Anderson et al. 2004).

1.2.1 Maladies infectieuses émergentes (MIE)

Les évolutions actuelles peuvent favoriser l'émergence, ou la ré-émergence, de maladies des plantes et des animaux comme de l'Homme. Chez l'Homme, les maladies à transmission vectorielle sont emblématiques, mais elles ne sont pas uniques, d'autres déterminants environnementaux comme les perturbateurs endocriniens sont responsables aujourd'hui d'épidémies, de malformations ou de maladies dégénératives. Le processus d'émergence de maladies semble associé à une combinaison multiple de facteurs environnementaux, socio-démographiques, économiques ou comportementaux.

Les changements rapides associés à la mondialisation, en particulier le développement des services de transport, mêlent aujourd'hui les populations humaines, les animaux domestiques, la faune et la flore sauvages à leurs agents infectieux à une fréquence et selon des combinaisons sans précédent interrogeant sur des notions fondamentales comme la barrière d'espèce. Les développements de l'agriculture et de l'agronomie, ainsi que les diverses perturbations et pollutions engendrées par l'industrialisation, l'urbanisation et les nouveaux modes de vie et de comportements engendrent des pathologies non-infectieuses sans commune mesure (maladies auto-immunes, malformations congénitales, maladies dégénératives, cancers...) au Nord qui tendent aussi à se développer dans les sociétés du Sud. Les maladies émergentes, en particulier dans les régions tropicales en développement, sont aujourd'hui considérées comme des défis majeurs pour la science, la santé et le développement humain.

Pour un très grand nombre de pathologies émergentes ou ré-émergentes, leur nature multifactorielle, hétérogène, intervenant à différents niveaux d'échelles spatio-temporelles, rend leur compréhension d'autant plus difficile. Les liens entre la santé des populations, leur bien-être et la santé des écosystèmes rendent aujourd'hui nécessaire de mieux prendre en considération les conditions initiales pour la compréhension des événements sanitaires subséquents. Plus généralement, la notion même d'émergence exige de reconsidérer les points de vue sur les notions de causalités et de déterminants de santé, en prenant mieux en considération des paramètres ou des facteurs de risques distaux, considérés dans un premier temps sans importance, ou n'étant pas en liens directs avec des problématiques et des préoccupations de santé et de santé publique. Ici donc, les questions rejoignent la qualité de l'environnement mais doivent être complétées par l'analyse des systèmes de soins, eux-mêmes révélateurs du niveau de développement.

Nos sociétés, eu égard à l'empreinte écologique de plus en plus pesante sur les écosystèmes, connaîtront probablement des occurrences de plus en plus nombreuses de nouvelles maladies infectieuses et chroniques pour l'homme mais aussi pour les animaux d'élevage et les plantes cultivées. Dans le contexte de changement global, la connaissance des déterminants de ces émergences est indispensable à l'évaluation de la résilience des systèmes affectés. A ce titre on peut noter l'initiative

de certains organismes comme le Centre national d'études spatiales (Cnes) qui soutiennent depuis plusieurs années le développement d'outils spatiaux originaux répondant à des problématiques sociales, en particulier dans les domaines environnement-climat-santé et surveillance épidémiologique de maladies infectieuses transmissibles. Ces recherches pluridisciplinaires sont connus sous le terme de « télé-épidémiologie ». La télé-épidémiologie consiste à analyser les relations "climat-environnement-santé" pour mettre en évidence les liens entre l'émergence et la propagation de maladies infectieuses et les changements environnementaux ou climatiques en s'appuyant sur la technologie spatiale. L'objectif final est de fournir aux acteurs de la santé publique des outils et des services adaptés permettant de surveiller et prévoir l'émergence des vecteurs de ces épidémies et de les aider ainsi à bâtir et à adapter leurs stratégies d'adaptation face au risque prédit.

Par ailleurs, comme on l'a vu lors de récentes épidémies ou pandémies, le risque de diffusion de ces maladies transmissibles originaires du Sud vers le Nord est, auprès des décideurs, un puissant moteur pour mobiliser des ressources destinées à la recherche et à la prévention. En regard, le développement de nouvelles maladies chroniques liées au développement des sociétés du sud et à l'évolution de leurs habitudes et comportements nous rend solidaire et parfois responsable de leur devenir.

L'émergence de nouveaux agents infectieux et de nouvelles MIE est indissociable des multiples crises actuelles, et en particulier de la crise écologique, ainsi que des instabilités sociales et des déplacements et échanges mondialisés. Les dynamiques et interrelations entre les MIE, les comportements humains et les perturbations environnementales sont complexes mais peuvent toutefois être le signe de dysfonctionnements plus larges des systèmes socio-écologiques. Ces syndromes sont généralement encore très mal compris en raison d'une origine complexe, le plus souvent multifactorielle.

Un des défis majeurs de la recherche sur les MIE est une meilleure pluridisciplinarité entre épidémiologistes, cliniciens infectiologues, microbiologistes, écologues et spécialistes des sciences humaines et sociales. Le sujet de l'émergence favorise le développement d'une approche écosystémique tissant des liens entre le secteur de la santé humaine avec d'autres secteurs comme la santé animale, l'environnement, le commerce, l'agriculture et les services sociaux. Les MIE demandent également que soient examinées de plus près les interactions entre sécurité sanitaire, sécurité alimentaire et sécurité nationale.

La question des MIE soulève de multiples interrogations sur les connaissances actuelles, lance de nouveaux défis et demande une gestion raisonnée des crises sanitaires impliquant une veille, y compris prospective, réactive adossée aux dispositifs de recherche et de formation. Ce développement d'un nouveau paradigme invite à déconstruire les savoirs pour reconstruire autrement et de façon innovante nos modalités d'approche et nos modes de pensée. Il a permis par ailleurs de constater la complexité et le cloisonnement de nos organisations, sources et facteurs d'une moindre efficacité des réponses aux problèmes associés à l'émergence des MIE. Il attire enfin l'attention sur la nécessité de promouvoir une simplification et des interactions plus constructives entre institutions et dis-

positifs de financement de la recherche et de l'enseignement, en liaison avec la veille et la surveillance épidémiologique.

1.2.2 Invasions biologiques

L'augmentation de l'intensité des échanges et leur globalisation ont contribué à une très forte augmentation des invasions biologiques au cours des dernières décennies. Ces invasions ont des conséquences principalement sur les écosystèmes naturels (remplacements d'espèces) mais peuvent aussi avoir des répercussions sur la santé humaine (invasion de plantes allergènes par exemple) ou sur la sécurité alimentaires (modification des écosystèmes marins ayant des conséquences sur la pêche, invasion d'adventices en agriculture...). Le problème de ces invasions est que, comme pour les émergences de maladies, elles résultent d'une chaîne complexe de circonstances peu probables et de probabilité difficilement estimable qui rendent la recherche de caractéristiques générales et de « lois des invasions » très coûteuses. Les invasions biologiques se produisent quand il y a adéquation entre l'organisme invasif et l'habitat dans lequel il est introduit. Cette adéquation peut passer par la préadaptation à ces nouvelles conditions mais aussi par des évolutions de l'habitat ou des changements évolutifs qui améliorent l'adéquation entre l'envahisseur potentiel et le nouvel environnement. Ce cadre conceptuel général reste toutefois à valider en testant des hypothèses théoriques qui en découlent et par l'analyse d'invasion biologiques passées ou en cours. Comme pour les maladies émergentes des approches pluridisciplinaires sont à promouvoir.

1.2.3 Organismes génétiquement modifiés (OGM)

En dehors de considérations de nature religieuse ou idéologique, qui sont hors du champ de cette réflexion, il convient de constater que les controverses actuelles sur les risques environnementaux liés à l'utilisation d'organismes génétiquement modifiés (OGMs) sont toujours très vives et que celles concernant la biologie synthétique sont en émergence forte. Le groupe n'a évidemment pas pour mission de se prononcer pour ou contre les OGM ou la biologie synthétique. Il s'agit d'identifier, sur la base d'une analyse objective des connaissances disponibles et des pratiques actuelles, des pistes de recherche susceptibles de répondre à certaines questions encore ouvertes. Ces recherches s'intéressent à un spectre assez large qui inclut, au-delà du strict domaine des OGM, les génotypes obtenus à partir des méthodes classiques d'amélioration, en particulier les modifications génétiques et épigénétiques ou la production de métabolites secondaires. Les réflexions conduites par les groupes de travail d'AllEnvi « Aliments et alimentation », « Biodiversité » et « Biologie des plantes » devront également être pris en compte pour définir les propositions d'orientation de la recherche sur les OGM. Enfin, les invasions biologiques dont l'impact sur le fonctionnement et la structure des écosystèmes reste encore mal connu, méritent d'être étudiés avec les méthodes de la recherche sur les risques, en lien avec la recherche sur la biodiversité.

Les résultats de ces recherches alimenteront les processus de décisions face à ces risques. Il faut toutefois toujours garder présent à l'esprit que les controverses et les questions posées dépassent le

champ des 'sciences dures' et que leur traitement devra aussi impliquer une dimension socio-économique.

Pour les OGM, au-delà des aspects économiques relatifs à l'évolution des pratiques agricoles, la controverse provient principalement d'un sentiment d'inadéquation entre risques et procédures en vigueur. Certains considèrent que le système réglementaire actuel est suffisamment strict pour protéger la santé et l'environnement, tandis que d'autres sont convaincus qu'il est insuffisant. Les OGM n'ont qu'une vingtaine d'années et les données manquent sur les risques à long terme. On dispose néanmoins de données relativement importantes sur les plantes agricoles génétiquement modifiées. Une analyse détaillée des dossiers d'homologation soumis au niveau européen par l'office allemand de conservation de la Nature (Dolezel et al., 2009⁵) fait apparaître plusieurs points critiques qui justifieraient donc des recherches complémentaires :

- prendre en compte l'OGM ou la variété sélectionnée dans son intégralité et non pas seulement en tant que transgène (prendre notamment en compte les modifications du métabolisme et les conséquences du transgène sur sa régulation) ;
- ne pas restreindre les tests d'activités aux propriétés caractérisées sur la forme recombinante en bactéries, notamment pour les pesticides ;
- tenir compte des effets épigénétiques et pléiotropiques ;
- conduire les essais d'impact dans des environnements réalistes incluant les interactions écologiques, mieux intégrer les données acquises sur plusieurs sites ;
- renforcer les analyses d'exposition, en augmentant la gamme de doses ;
- collecter des données sur plusieurs saisons ;
- collecter des données sur les plantes protégées ;
- renforcer les études toxicologiques (métabolites secondaires, etc.) ;
- tenir compte des changements de pratiques agricoles induits (e.g. utilisation d'herbicides pour la culture de plantes résistantes).

Cette liste non exhaustive montre combien l'analyse des risques liés aux biotechnologies a besoin de s'ancrer dans une écologie forte et ouverte en termes de modèles expérimentaux. Si les risques majeurs d'instabilité génétique et de dissémination de gènes sont bien gérés dans le contexte confiné du laboratoire ou de la serre, les garanties doivent être renforcées lorsque l'on envisage la culture en milieu ouvert et que le transgène est soumis à l'interaction avec l'environnement biotique et abiotique.

Les progrès dans la connaissance des génomes, des métabolismes et des processus de régulation biochimique ont permis l'émergence d'une nouvelle approche dans l'ingénierie du vivant : la biolo-

⁵ Dolezel M, Miklau M, Eckerstorfer M, Hilbeck A, Heissenberger A, and Gaugitsch H. Standardising the Environmental Risk Assessment of Genetically Modified Plants in the EU. Final Report for the Federal Agency for Nature Conservation (BfN) Germany. April 2009

gie synthétique. Des organismes capables de produire des molécules nouvelles ou rares, utiles à l'homme ou à l'environnement, peuvent ainsi être conçus rationnellement et synthétisés « sur plan ». Avec ces développements technologiques rapides, la recherche sur les risques se trouve confrontée au mythe prométhéen de création par l'homme d'une force qu'il ne maîtriserait pas, avec les enjeux supplémentaires spécifiques du vivant que sont les capacités auto-répliquative et évolutive. Malgré le caractère fragile et instable de ces micro-organismes, et le progrès dans les méthodes de confinement, le spectre d'une perte de contrôle crée forcément un sentiment d'insécurité. Les quelques expériences de synthèse de virus grippaux à la fois virulents et transmissibles dans le but de prévenir les pandémies via la fabrication ex-ante de vaccins pose la redoutable question d'un éventuel usage militaire ou tout simplement d'éventuelles lacunes dans le confinement. La réflexion éthique est bien présente dans cette phase de démarrage de la biologie synthétique mais elle devra vite être relayée par de réglementations plus contraignantes qui prendront en compte les risques scientifiquement documentés.

1.3 Risques sanitaires et pour les écosystèmes liés aux agents physiques non ionisants (sonores, électromagnétiques, nanomatériaux, autres substances...)

Ces risques sont très divers et liés à des nuisances hétérogènes. Le bruit constitue une pression environnementale bien connue encore bien mal maîtrisée. Les champs électromagnétiques, maintenant classés 2B (peut-être cancérogène pour l'homme) par le centre international de recherche sur le cancer⁶ du fait notamment d'un possible excès de risque de gliome chez les utilisateurs fréquents (30-min par jour pendant 10 ans), inquiètent du fait de l'exposition généralisée de la population liée à l'explosion de la téléphonie mobile et des technologies sans fil. Les nanomatériaux qui devraient permettre le développement de nombreuses technologies prometteuses ouvrent un champ peu exploré en termes de risques car leurs propriétés physiques et chimiques sont complètement nouvelles. Enfin, de nombreux déchets solides liés à l'activité humaine encombrant les océans provoquant des atteintes aux écosystèmes qu'il convient de mieux connaître et de prévenir.

1.3.1 Bruit

L'excès de bruit dans l'environnement a des effets sur les organes de l'audition, mais peut aussi perturber l'organisme en général. La soumission au bruit de l'appareil auditif se traduit par la fatigue et la perte auditive, mais peu de données épidémiologiques existent sur le sommeil, sur la sphère végétative, sur le système endocrinien, sur le système immunitaire et sur la santé mentale. Les effets subjectifs concernent la gêne due au bruit, les effets sur les attitudes et les comportements. Les phénomènes reliant bruit et troubles du comportement ne sont pas encore élucidés. Les effets liés aux multi-expositions au bruit (expositions cumulées) et aux expositions combinées au bruit et à d'autres sources de nuisances demeurent mal connus. Les indicateurs pertinents présentant une corrélation significative avec les effets sanitaires restent à définir.

⁶ *The Lancet Oncology*, Volume 12, Issue 7, Pages 624 - 626, July 2011 doi:10.1016/S1470-2045(11)70147-4

1.3.2 Risques liés aux rayonnements non ionisants

Dans le domaine des champs électromagnétiques de basses fréquences (ELF), les questions de recherche portent sur la compréhension des mécanismes biophysiques qui pourraient expliquer les effets des champs environnementaux de faibles puissances à l'appui d'un rapport causal possible entre le cancer (en l'occurrence la leucémie chez l'enfant) et l'exposition. Il sera également pertinent de développer des méthodes et des modèles améliorés *in vitro* et *in vivo* pour étudier les effets de ces champs électromagnétiques basses fréquences.

En ce qui concerne les radiofréquences les questions concernent la détermination des seuils d'exposition pour différentes pathologies, les effets sur la reproduction ou sur les pathologies neurodégénératives.

Les micro-ondes de forte puissance (MFP) connaissent un fort développement dans des applications militaires et civiles sécuritaires (anti-terrorisme, anti-manifestation, radars aéronautiques). Il est important de réaliser des travaux de recherche sur les effets biologiques et sanitaires potentiels de ce type d'ondes, ainsi que sur leurs mécanismes d'interaction avec les organismes biologiques.

Un autre champ de réflexion concerne l'étude de la co-exposition à long terme avec d'autres facteurs de stress: (différentes sources de champs électromagnétiques ou nanoparticules contenues dans les produits cosmétiques par exemple).

Il est très important d'étudier la co-exposition, car elle devient de plus en plus fréquente dans notre quotidien : le WiFi et les communications des téléphones mobiles sont seulement un aspect des expositions, qui se rajoutent à la TV numérique, aux outils de communication : WLAN, DECT et d'autres radiocommunications (RFID, péage de route, billets de transport,...)

1.3.3 Risques liés aux particules fines

Dans le domaine des risques liés aux particules fines, le constat réalisé est qu'à l'heure actuelle le plus gros effort de recherche doit certainement être porté sur la caractérisation, la compréhension et la modélisation des émissions ou des processus de formation de particules atmosphériques, ainsi que leurs comportements physico-chimiques dans l'atmosphère. De fait, les aérosols représentent aujourd'hui la classe de polluants atmosphériques la plus préoccupante en matière de santé publique et d'impact environnemental. De par la multiplicité de leurs sources d'émissions et de leurs processus de formation, elles ont une composition chimique complexe et insuffisamment documentée. Outre de très larges incertitudes sur les émissions anthropiques et naturelles de particules, la formation d'aérosols organiques secondaires est notamment peu documentée faute de moyens et méthodes disponibles permettant de décrire les processus de formation (nucléation, condensation, agglomération...) et des espèces chimiques y contribuant, mais également leur évolution spatiale et temporelle.

Les transports contribuent largement aux émissions de ce type de particules, les gaz d'échappement des moteurs diesel ont par ailleurs été classés récemment « cancérogènes certains » par l'OMS. De

plus, les pots catalytiques, qui équipent les véhicules depuis le début des années 90 en France, mettent en œuvre des composés à base de cérium, de platine, de palladium et de rhodium (près de 80% de la consommation de platine et de palladium en Europe est utilisée pour la construction des pots catalytiques). L'abrasion des surfaces de ces pots catalytiques se traduit par des émissions de particules fines et de nanoparticules contenant principalement du platine et du palladium sous forme métallique ou d'oxydes. Bien que ces émissions soient faibles (quelques dizaines de ng/véhicule/km), le devenir et l'impact de ces substances sur l'environnement sont encore mal connus, ainsi que les effets sur l'homme (allergies notamment) (Ravindra et al., 2004⁷).

Les besoins de recherche visent donc en premier lieu la caractérisation, la compréhension et la modélisation de la chimie et de la physique des particules atmosphériques mais également la quantification de leur impacts sanitaires.

1.3.4 Risques liés aux nanomatériaux

Les nanotechnologies mettent en œuvre une grande diversité de matériaux particuliers naturels ou synthétiques à base d'ions métalliques (TiO₂, CeO₂, FeO, etc.), de molécules organiques (simples type C₆₀ ou nanotubes de carbone, ou très complexes type dendrimères), ou molécules hybrides organiques/inorganiques (type oligoalkylthiophènes). Ils peuvent aussi s'appuyer sur des assemblages bio-macromoléculaires (e.g. systèmes enzymes/co-enzymes pour la bio-catalyse ou fonctionnalisation de surfaces par des ligands de récepteurs pour la vectorisation ou la délivrance de médicaments).

De très nombreux paramètres sont invoqués dans les mécanismes de toxicité des nanomatériaux, l'identification du ou des facteurs prépondérants dans divers modèles biologiques est un enjeu majeur des recherches en toxicologie. La classification peut s'envisager soit par composition chimique/biochimique soit par mode d'action ou d'utilisation, et ce en fonction des propriétés physico-chimiques et biologiques : dimensions, composition, morphologie, structure, propriétés de surface, propriétés oxydantes, dégradations et produits de dégradation, réactivité, bio-transformation, affinité pour les récepteurs biologiques, perturbations des cycles endogènes (organismes) ou biogéochimiques (écosystèmes). Il est nécessaire de développer des appareils et des méthodes de mesure spécifiques à chaque type de nanoparticule afin d'obtenir une caractérisation précise, d'abaisser les limites de détection et développer des systèmes normatifs de concentrations ou d'indicateurs d'activités biologiques limites.

Les études de toxicité ne devront pas se limiter à la détection des effets aigus ou à concentrations élevées; il s'agira d'aborder les effets à long terme, avec des modèles d'exposition chronique à faibles doses. Dans un premier temps, les tests réglementaires pourront être conduits dans l'esprit du règlement REACH⁸ mais une réflexion devra être amorcée pour l'étude des effets écotoxiques. Plus

⁷ Ravindra K., Bencs L., Van Grieken R. (2004). Platinum group elements in the environment and their health risk. *The Science of the Total Environment*, 318, 1-43.

⁸ Registration, evaluation and authorization of chemicals : Règlement européen des substances chimiques.

généralement, les études de cycle de vie des nanomatériaux manufacturés devront être systématiquement entreprises (étapes de fabrication, d'utilisation, de recyclage, d'élimination et gestion d'accidents). Comme pour de nombreuses autres substances chimiques, il conviendra d'inclure les nanoparticules dans les études sur les risques multiples (combinaison entre risque nano et risque électromagnétique, entre nano et risque chimique...).

1.3.5 Risques liés à la dissémination de déchets macroscopiques dans le milieu marin

Après leur érosion par le substrat sableux ou rocheux sur le fond des océans, une partie des macrodéchets plastiques est réduite à l'état de particules de formes arrondies ou de fibres, dont la taille varie entre micrométrique et centimétrique. Ces particules sont constituées majoritairement de polymères chimiquement stables (nylon, PVC, polyéthylène, polyesters etc.) qui peuvent adsorber des contaminants hydrophobes du milieu, tels que les polychlorobiphényles (PCB), les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et les pesticides organochlorés. Ces plastiques se disséminent jusqu'aux écosystèmes benthiques (sédiment) et pélagiques, mais ils se retrouvent particulièrement dans la micro-couche de surface occupée aussi par le plancton et le neuston (organismes dépendant de l'interface air-eau).

Les risques attendus pour les écosystèmes marins sont liés à l'ingestion possible de ces microplastiques par les organismes planctoniques, benthiques et pélagiques, formant ainsi une voie d'entrée dans la chaîne trophique pour les particules et les contaminants adsorbés. En fonction de leur lieu d'introduction et des courants marins, les plastiques flottants s'accumulent dans certaines zones où leur concentration (numération) augmente. Leur ingestion en fait des vecteurs des contaminants adsorbés dans la chaîne trophique ou perturbe physiquement la macrofaune emblématique. Les particules s'accumulent sur les fonds marins dans certaines zones en fonction de la bathymétrie et des courants profonds. Ces aspects de la contamination des eaux océaniques sont très mal documentés en termes temporeux et géographiques.

1.4 Risques liés à l'exploitation des ressources naturelles

1.4.1 Exploitation des gaz et huile de roche-mère (GHRM)

Par la loi du 13 juillet 2011, les autorités françaises ont interdit « l'exploration et l'exploitation des mines d'hydrocarbures liquides et gazeux par fracturation hydraulique ». Cette loi a été promulguée alors que la pertinence ou non d'envisager l'exploitation de gaz et huiles de schiste en France était (et continue d'être) au cœur d'une vive polémique qui anime l'opinion publique. Si le sujet s'avère aussi sensible, c'est qu'il résulte de l'affrontement de deux intérêts légitimes mais qui paraissent aujourd'hui opposés : une perspective énergétique et économique prometteuse mais de possibles risques et impacts environnementaux résultant notamment de la technique utilisée pour l'exploitation, la fracturation hydraulique des terrains. Il s'ajoute à ces considérations le questionnement de

l'intérêt de développer l'exploitation des ressources carbonées fossiles alors que l'impératif de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre impose de leur substituer des ressources renouvelables.

1.4.1.1 Une terminologie peu précise

Dans l'exploitation des hydrocarbures, on distingue souvent les hydrocarbures dits « conventionnels » et ceux « non conventionnels ». Ces derniers comprennent les gaz de houille (coalbed methane), les huiles de sables bitumineux et les gaz et huiles de roche-mère (GHRM). Cette distinction peut prêter à confusion dans la mesure où la différence tient plutôt à la roche contenant les hydrocarbures qu'aux hydrocarbures eux-mêmes. En fait, l'exploitation conventionnelle est réalisée dans les roches poreuses et perméables⁹ alors que les GHRM se trouvent dans les formations à faibles porosité et perméabilité : argilites, schistes argileux (shale en anglais, à ne pas confondre avec les schistes métamorphiques), formations dans lesquelles les hydrocarbures ont été déposés avant de migrer, dans certaines conditions, vers des terrains poreux et perméables.

1.4.1.2 Une méfiance vis-à-vis de la fracturation hydraulique

Alors que la fracturation hydraulique apparaît aux yeux du grand public comme une nouvelle technologie suscitant la méfiance, deux types d'arguments sont avancés par les professionnels ou les experts scientifiques sans qu'ils soient de nature à converger vers une conclusion suffisamment convaincante :

- Des exemples de fracturation hydraulique existent même dans la nature ; le plus connu est la formation des dykes dans les roches volcaniques. Par ailleurs, on a recours depuis longtemps à la fracturation hydraulique « artificielle » dans de nombreux projets industriels. Généralement si la perméabilité de la roche est supérieure à 50 milli Darcy, on considère que la fracturation hydraulique n'est pas nécessaire. En revanche, dans les formations ayant une perméabilité plus faible, pour obtenir une production suffisante, le recours à la récupération assistée ou de stimulation de la roche, dont la fracturation hydraulique, est indispensable.
- Si le recours à la fracturation hydraulique n'est pas nouveau, sa mise en œuvre d'une manière intense et répétée est sans précédent en dehors de l'exploitation d'hydrocarbures de roche-mère. En effet, les progrès récents (depuis les années 1980) des forages dirigés et horizontaux permettent aujourd'hui de mettre en place une plate-forme d'exploitation d'hydrocarbures de roche-mère comportant 10 à 20 forages horizontaux¹⁰ de un à plusieurs km de longueur, avec plus de dix fracturations hydrauliques dans chacun des forages. L'extension d'une fracture peut atteindre quelques dizaines de mètres à 100 m, L'impact de cette fracturation intense sur l'environnement est donc une question ouverte.

⁹ Sans que cela corresponde à une définition unanime, on distingue parfois :

- les roches des gisements conventionnels qui ont une perméabilité comprise entre 1 et 1000 milli Darcy
- les roches des gisements non conventionnels ont une perméabilité inférieure à 10-3 milli Darcy.
- les réservoirs compacts de gaz (tight gas) qui ont une perméabilité intermédiaire.

¹⁰ Le coût d'un forage complet avec fracturation hydraulique peut être de 8-10 millions de dollars dont 30 à 40% pour la fracturation hydraulique.

1.4.1.3 Des controverses sur les risques et impacts

Le nombre et la fréquence des rapports d'expertise commandités et publiés ces dernières années par des gouvernements ou des instances réglementaires ou de contrôle dans les différents pays concernés (États-Unis, Canada, Grande Bretagne et France)¹¹ s'expliquent en particulier par la crainte de l'opinion publique vis-à-vis de l'exploitation de « gaz de schiste ». Cette crainte a trouvé un écho extraordinaire avec le film « Gasland ».

Les plus vives critiques concernent les points suivants :

- Impacts environnementaux et sanitaires des substances injectées : Les rapports publiés font état d'un nombre étonnamment élevé de substances et produits chimiques plus ou moins nocifs (jusqu'à 700 substances différentes avant que les autorités américaines n'imposent des restrictions réglementaires, en 2009). D'autres fluides d'injection comme le propane ont fait l'objet d'essais au Canada (en tant que méthode alternative à la fracturation à l'eau). Étant donné le faible taux actuel de récupération de fluides injectés (20 à 40 %) pour la réalisation des forages et la fracturation hydraulique, on peut s'interroger sur le risque d'une contamination des aquifères dans l'hypothèse d'une mauvaise étanchéité de forages (très fréquente, d'après le retour d'expérience sur les puits pétroliers et de stockages), d'une communication avec des discontinuités naturelles (failles pouvant être réactivées) ou encore d'une propagation étendue¹² et non maîtrisée des fractures.
- Remobilisation des métaux lourds et des éléments radioactifs : Les schistes riches en matières organiques sont connues pour contenir des sulfures bio-géniques piégeant de nombreux métaux lourds (Pb, Cu, Zn, Co, Ni, Cd, Hg, U...). L'équilibre géochimique de la roche étant rompu au contact de fluides, une remobilisation des métaux lourds et des éléments radioactifs semble plausible. Ce phénomène a été confirmé par les résultats d'analyse d'eau rapportés par l'Agence de protection de l'environnement des États-Unis (US-EPA).
- Sismicité induite : La sismicité induite par la fracturation hydraulique (ou par l'injection d'eau récupérée) paraît peu contestable mais reste rare et généralement d'un niveau modéré (magnitude inférieure à 3 sur l'échelle de Richter). Cependant, le mardi 21 juin 2011, la commission du pétrole et du gaz de l'Arkansas (USA) fait passer un moratoire, interdisant temporairement l'exploitation par fracturation hydraulique, en raison de 1220 tremblements de terres recensés dont un de magnitude 4,2, provoqués par cette technique depuis le début de l'année. L'injection d'eau récupérée dans 200 puits (sur les 12000 forés) a été considérée comme le principal responsable¹³. La sismicité induite peut devenir critique dans certains

¹¹ Voir Références : États-Unis : EPA en 2011 et EIA en 2011, Canada : BAPE Québec, en 2011, Grande Bretagne : University of Manchester en 2011, France : CGIET-CGDD en 2011 et 2012, Mission Parlementaire en 2011, Mission OPECST en cours.

¹² L'extension typique d'une fracture est plusieurs dizaines de mètres.

¹³ Un autre cas de sismicité induite a été constaté dans l'Ohio, en janvier 2012. Plusieurs séismes ont été enregistrés dont un avec une magnitude de 4 à quelques km des puits d'injection d'eau d'un champ d'exploitation de gaz de schiste.

sites (barrages hydrauliques, par exemple). On peut citer un séisme induit de magnitude élevée de 7,2 à Cerro Prieto, Baja California (Mexique).

- Autres problèmes et impacts : Les autres problèmes environnementaux ont trait aux importantes consommations d'eau¹⁴ et à leur retraitement, à la fuite de gaz ou d'hydrocarbures au travers des forages, à la nuisance liée au transport¹⁵, aux bruits et à l'impact sur le paysage¹⁶ et aux émissions des gaz à effet de serre (GES, notamment la fuite du méthane estimée entre 2 et 8% du gaz produit). D'après l'Ifpen¹⁷, le gaz de roche-mère induirait une augmentation de GES de 2 à 14 % sur l'ensemble du cycle de vie.

1.4.1.4 Des enjeux économiques et géopolitiques

Selon le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (World Energy Outlook - WEO, 2009), les ressources mondiales récupérables de gaz non conventionnels seraient du même ordre de grandeur que les ressources conventionnelles (370 Tm³ contre 440 ; 1 Tm³ étant mille milliards de m³). Avec la Pologne, la France apparaît être, selon l'étude de l'EIA (US Energy Information Administration, 2011), le pays le plus richement doté de ressources en gaz de roche-mère (5,1 Tm³ de réserve techniquement récupérable). Il s'agit d'estimations sommaires, tout gisement techniquement récupérable n'étant pas effectivement exploitable, pour des raisons d'accessibilité et de rentabilité.

Les États-Unis d'Amérique sont le premier pays avec exploitation industrielle des hydrocarbures non conventionnels et notamment les hydrocarbures des roches-mère. Aujourd'hui la production de gaz non conventionnelle dépasse l'exploitation conventionnelle. En 2010, le gaz de roche-mère a contribué pour 15 % à la production nationale aux États-Unis¹⁸ avec une croissance de 15 %. Environ 20 000 puits (2/3 pour le gaz, 1/3 pour l'huile) y sont forés (contre moins d'une dizaine en France). Les États-Unis sont devenus exportateurs de gaz avec une forte baisse du prix du gaz sur le marché américain substituant le GNL (Gaz naturel liquéfié). Cet intérêt croissant pour les hydrocarbures non conventionnels s'étend progressivement au Canada (British Columbia, Alberta, Saskatchewan, Québec) qui investit fortement dans l'exploration et l'exploitation de GHRM tout en développant l'exploitation des grandes réserves en pétrole lourd dans les sables bitumineux.

Si la tendance observée en Amérique du Nord se poursuivait dans les années à venir¹⁹, cela conduirait indéniablement à un bouleversement important de la situation économique et géopolitique à l'échelle mondiale.

¹⁴ Selon l'Ifpen, la quantité d'eau nécessaire varie entre 10 000 et 20 000 m³ par puits (équivalent de la consommation journalière d'une ville de 2000 habitants).

¹⁵ L'exploitation d'un puits nécessite 900 à 1300 circulations de camions dont 500 à 600 circulations de camions citernes (capacité de l'ordre de 30 m³).

¹⁶ Selon l'Ifpen, un maximum de 25 plateformes serait nécessaire pour produire 1 Gm³/an de gaz de roche-mère (équivalent de la production nationale actuelle).

¹⁷ Institut français du pétrole et des énergies nouvelles

¹⁸ 130 Gm³ en 2010 (1 Gm³ = 1 milliard m³), la production était de 10 Gm³ dix ans auparavant.

¹⁹ L'Ifpen estime un potentiel récupérable mondial de gaz de schiste voisin de 200 000 Gm³ soit l'équivalent des ressources prouvées de gaz conventionnel et cela représente plus de 55 ans de la consommation actuelle.

La situation est différente pour l'Europe : les ressources récupérables de gaz non conventionnel sont estimées (par l'AIE) à 14 Tm³ (contre 36 Tm³ pour le gaz conventionnel). On notera cependant que les chiffres émis par les américains et l'AIE pour l'Europe diffèrent quelque peu, ce qui est lié en grande partie aux nombreuses incertitudes sur les données existantes relatives aux ressources. Par ailleurs, le contexte est très différent en Europe comparée à l'Amérique du Nord (densité de population, droit de sous-sol²⁰, contraintes environnementales plus fortes en Europe, coûts plus élevés en Europe, bassins sédimentaires plus petits en Europe...). Ces éléments laissent à penser que l'Europe ne sera pas un « nouvel Eldorado ».

1.4.1.5 Un déficit de transparence et de communication sur un projet sensible

Un autre élément d'insatisfaction majeur réside dans l'absence de transparence des procédures d'attribution des permis exclusifs de recherche et d'autorisation d'ouverture des travaux miniers d'exploration. En effet, ces deux procédures ne requièrent pas l'avis formel des maires des communes concernées. Un simple affichage en mairie de la commune concernée par la plateforme pétrolière (et non les communes limitrophes) est prévu. Ainsi les élus ont été contactés tardivement par les opérateurs pétroliers dont le message se voulait trop rassurant ; l'idée qu'on « nous cache quelque chose » a donc prévalu. Cette insatisfaction était d'autant plus grande que les collectivités territoriales se sentaient peu concernées par les retombées économiques directes, en termes de taxes et redevances, d'une exploitation pétrolière ou gazière sur leur territoire.

Cette absence de transparence et de communication tient largement au fait que le Code Minier est peu adapté au développement de nouvelles formes d'exploitation non conventionnelle. Une refonte du code minier et du RGIE (Règlement général des industries extractives) est en cours pour y renforcer les exigences environnementales et de transparence.

Tout en interdisant le recours à la fracturation hydraulique, la loi du 13 juillet 2011 prévoit « la possibilité d'expérimentations réalisées à seules fins de recherche scientifique sous contrôle public²¹ ». Cette possibilité devra être saisie pour bâtir des projets de recherche autour des questions essentielles liées aux impacts environnementaux de l'exploitation d'hydrocarbures de roches-mère.

1.4.2 Exploitation des ressources minérales marines profondes

Toutes les analyses montrent que les états européens sont confrontés à une mutation des marchés mondiaux de matières premières. Avec l'envolée du cours des métaux ces dernières années, les états dépendent déjà fortement d'importations de minéraux métalliques et de métaux dits de haute tech-

²⁰ Aux États-Unis, le propriétaire du sol est le propriétaire des ressources du sous-sol (d'où l'importance de bonus / royalties). Ce n'est pas le cas en France pour les substances minières (hydrocarbures, métaux, charbon, sel, uranium...); l'exploitation du gisement est concédée par l'état à l'exploitant, pour une durée limitée prévue par le code minier.

²¹ La loi du 13 juillet 2011 prévoit « la constitution d'une commission nationale d'orientation, de suivi et d'évaluation des techniques d'exploration et d'exploitation des hydrocarbures liquides et gazeux ». Cette commission n'a pas été constituée jusqu'à présent.

nologie (Indium, Germanium, Cadmium, Antimoine, Mercure, Sélénium, Molybdène, Bismuth, terres rares...).

Les explorations en géologie marine ont conduit à l'identification de plusieurs processus géologiques et géochimiques amenant à la concentration des métaux (encroûtements cobaltifères, nodules polymétalliques, et sulfures hydrothermaux) dans les grands fonds océaniques, ouvrant ainsi de nouvelles frontières pour la recherche scientifique en milieu océanique profond.

Dans l'hypothèse d'une exploitation minière dans ces environnements profonds, jusque-là préservés de l'activité humaine directe, la question des risques environnementaux va se poser fortement. Les enjeux de durabilité écologique afin de réunir les conditions optimales d'une exploitation durable seront déterminants. Les processus géologiques à l'origine de la mise en place des ressources énergétiques et minérales sont en permanence en interaction avec le milieu biologique dans les cycles biogéochimiques. Les écosystèmes extrêmes et chimiosynthétiques sont eux-mêmes liés aux processus tectoniques, magmatiques, hydrothermaux et sédimentaires impliqués dans la circulation de fluides dans la lithosphère et dans la formation des dépôts métallifères.

La France dispose d'une capacité importante d'exploration et d'accès à de nouvelles ressources minérales à grande profondeur en mer, dont l'éventuelle exploitation future nécessite le développement de recherches pluridisciplinaires axées sur la connaissance géologique des mécanismes qui modèlent les fonds marins à différentes échelles spatio-temporelles, les processus en interactions géobiologiques et leur dynamique temporelle, la protection de la biodiversité et la résilience des sites.

Le suivi temporel des processus naturels et la surveillance des sites sera, à ce sujet comme pour d'autres, l'un des grands enjeux des années à venir. Il sera, en effet, indispensable d'évaluer la variabilité naturelle des processus géologiques et biologiques pour avancer dans la compréhension des processus et pour prévoir leur évolution, voire leur surveillance en cas d'activité extractive. Il s'agit aussi ici d'analyser et comprendre les processus qui sont le fondement d'une partie de la productivité des ressources marines vivantes et qui déterminent leur variabilité spatio-temporelle (dont leur dispersion et leur connectivité) et leur prédictibilité.

1.4.3 Exploitation des hydrates de méthane

1.4.3.1 *Un phénomène géologique particulier*

Les hydrates de méthane se forment quand du méthane, d'origine biogénique ou thermogénique, sature un volume d'eau dans des conditions de température basse et de pression élevée. Leur existence ou leur déstabilisation est totalement conditionnée par la stabilité de ce domaine de pression et température. Ils apparaissent sous forme de solides issus du piégeage de molécules de gaz dans un réseau de molécules d'eau sous forme de glace. Ils pourraient représenter des ressources énergétiques considérables puisque la dissociation d'1 m³ d'hydrate libère 164 m³ de méthane et d'eau. Outre l'enjeu énergétique, d'autres enjeux importants sont liés au comportement de ces hydrates pour les risques d'instabilité, liés ou non à leur exploitation, dans la genèse de grands glissements et la for-

mation des pockmarks (sortie de fluides), mais aussi en lien avec le réchauffement climatique et les interactions avec les écosystèmes marins.

1.4.3.2 Une répartition planétaire

De nombreuses campagnes de reconnaissance ont permis de collecter des données (géophysiques ou prélèvements) à terre en zone arctique, dans des zones où la température moyenne annuelle est de -10°C , où les hydrates se développent entre 200 et 1600 m de profondeur sous le pergélisol et en mer (marges océaniques) où la zone de stabilité des hydrates peut s'étendre sur une épaisseur d'environ 800 m (max) à partir du fond de l'océan, vers 400-500 m de profondeur d'eau (pour une pression suffisante), donc sur la pente continentale. Les données sismiques permettent en effet de caractériser les zones potentiellement riches en hydrates par la réponse caractéristique de la limite inférieure de la zone de stabilité du fait du piégeage de gaz libre sous-jacent.

Les évaluations sur les volumes disponibles sont encore très incertaines. Elles ont d'ailleurs tendance à baisser au fur et à mesure que les connaissances progressent. Mais la quantité de carbone ainsi piégé varierait de 2 500 à 10 000 milliards de tonnes. Cette évaluation vers le haut correspond à deux fois la quantité du carbone prisonnier de l'ensemble des gisements mondiaux – exploités ou non – de pétrole, de gaz naturel et de charbon et à treize fois la masse du carbone contenu dans l'atmosphère sous forme de gaz carbonique...

1.4.3.3 Vers une exploitation des hydrates de gaz

Plusieurs essais d'exploitation réalisés depuis les années 70, notamment en Sibérie ou en Alaska sur des sites terrestres ont conduit à privilégier la méthode de dépressurisation pour déstabiliser les hydrates et récupérer ainsi le méthane (dépressurisation par pompage du méthane libre piégé sous la couche d'hydrates ou dépressurisation accompagnée par une substitution du méthane par du CO_2).

Au premier trimestre 2013, les japonais annonçaient qu'un test de production de méthane avait commencé avec succès par 1 000 m de profondeur d'eau, dans le cadre d'un programme international, conduit par japonais et américains, pour produire du méthane en grands fonds dans la fosse de Nankai (SE Japon).

L'essor des gaz non conventionnels en Amérique du Nord (gaz de schiste) et l'existence de ressources de gaz conventionnel non développées peuvent remettre en question une valorisation rapide de ces hydrates de gaz. Mais dans certains pays à la recherche d'autonomie énergétique comme le Japon et dans certaines zones arctiques industrialisées, des projets industriels peuvent voir le jour à moyen terme.

1.4.3.4 Des risques d'instabilité et de dégazage massif

Les hydrates sont des solides qui peuvent être dissous, avec une forte augmentation de volume, et entraîner ainsi une instabilité des pentes sous-marines dans les lesquelles ils existent. Cette déstabilisation des pentes sous-marines peut endommager des installations de production, voire, si le phé-

nomène est important, être à l'origine de tsunamis sur les côtes voisines. C'est le domaine des géohazards, pour lequel nombre de questions se posent pour comprendre la dynamique des hydrates de gaz et leur comportement hydromécanique à l'origine du risque important de grands glissements sous-marins. Leur caractérisation géophysique est aussi un sujet majeur pour préciser le volume des ressources disponibles. D'autre part, la dynamique temporelle doit être mieux connue, car tous les processus fond de mer liés aux hydrates et aux circulations des fluides, comme les pockmarks et les suintements froids, ne sont pas forcément catastrophiques et peuvent être étalés le temps comme le montrent des résultats récents. La modélisation des processus liés aux hydrates de méthane nécessitera donc l'observation de sites et la mesure in situ par des observatoires fond de mer afin d'acquérir des séries temporelles sur leur dynamique spatio-temporelle.

2 Risques Naturels

Cette catégorie de risques est connue par ses manifestations souvent spectaculaires et malheureusement très destructrices. La recherche sur les aléas naturels vise à comprendre les processus à l'origine des événements dangereux, car cette compréhension est la première étape nécessaire pour anticiper la réalisation de tels événements et en prévenir le plus possible les effets. L'aléa n'étant pas maîtrisable par définition, c'est en limitant le danger et en organisant l'alerte à temps qu'il devient éventuellement possible de maîtriser les risques. De ce point de vue, la connaissance de la vulnérabilité des systèmes humains et naturels exposés est capitale. Le terme 'risque' est utilisé pour traduire cette convolution entre aléa et vulnérabilité des systèmes exposés.

Un enjeu fort se situe sur le domaine de l'influence de l'action de l'homme sur la vulnérabilité. Celui-ci a modelé l'environnement à son profit sans toujours être en capacité d'anticiper les conséquences de ses aménagements. Il en résulte une augmentation de la vulnérabilité d'origine anthropique qui se traduit par des coûts des dommages en croissance dans tous les pays, même si la probabilité d'être victime d'une catastrophe diminue.

2.1 Les différents aléas et risques naturels et les enjeux sociaux et environnementaux

Les principaux aléas naturels considérés par le GT 9 d'AllEnvi se distinguent selon que leur origine.

2.1.1 Aléas d'origine tellurique

Les aléas d'origine tellurique sont l'aléa sismique, l'aléa volcanique, l'aléa gravitaire, et l'aléa tsunamigénique.

L'aléa sismique est lié à l'occurrence des séismes, Alors que des séismes de toute magnitude se produisent quotidiennement dans le monde entier, seuls ceux de magnitude modérée à forte (magnitude de moment supérieure à environ 5) ont généralement le potentiel d'être dangereux pour nos sociétés et nos environnements. Alors qu'un séisme se produit en un temps très court (quelques secondes à minutes), il est généralement suivi d'une cohorte de nombreux séismes (répliques) sur des temps qui peuvent être longs (plusieurs jours à plusieurs années), ces séismes étant alors susceptibles d'augmenter l'aléa.

L'aléa volcanique est lié à l'activité ou l'éruption de volcans ou systèmes volcaniques généralement avec participation de magma. L'aléa volcanique inclut une grande variété de phénomènes dont la magnitude et l'intensité sont également variables. L'aléa volcanique peut être bref mais aussi durer pendant de nombreuses années ce qui peut nécessiter une gestion particulière.

L'aléa gravitaire est plus composite, et inclut les glissements et affaissements de terrain aériens et sous-marins, les effondrements de falaise, les effondrements de cavités et les chutes de blocs. Il n'est ainsi pas exclusivement tellurique mais peut être déclenché par des phénomènes naturels (précipitations, séismes, etc.) ou anthropiques (chantier, tir de carrière, pompage, etc.)

Enfin, l'aléa tsunamigénique est lié à l'occurrence d'un tsunami, en réponse à un mouvement brutal d'un grand volume d'eau, provoqué par un fort séisme, un effondrement gravitaire, ou une éruption volcanique de grande ampleur. L'aléa volcanique peut aussi se développer suite à un forçage endogène (e.g. séisme) ou exogène (e.g. cyclone, effondrement gravitaire).

Contrairement aux aléas anthropiques, les aléas telluriques sont limités aux seules régions du monde au sein desquelles ou proches desquelles les processus telluriques qui les génèrent sont actifs (cette proximité pouvant toutefois être de plusieurs milliers de km, ex : tsunamis et émissions de gaz et téphra volcaniques). Leur distribution à l'échelle du globe et sur le territoire national en particulier, n'est donc pas homogène. Les risques liés à ces aléas sont sociétaux, économiques et environnementaux. Leur ampleur est multi-factorielle, dépendant à la fois du processus tellurique lui-même, des propriétés du milieu (géologiques et anthropiques) dans lequel il se produit, et des populations et infrastructures qui le subissent.

2.1.2 Aléas d'origine extra-terrestre

Les astéroïdes qui croisent la trajectoire de la Terre, appelés géocroiseurs, représentent un aléa naturel et donc un risque pour nos sociétés et environnements. Au cours de l'histoire de la Terre, les impacts de tels objets ont manifestement altéré le cours de l'évolution de la vie. Or ces objets continuent à frapper la Terre à des intervalles irréguliers et imprévisibles. Des dizaines de milliers de géocroiseurs ont été découverts ces 20 dernières années, plus de 900 ont un diamètre supérieur à 1 km, qui représente le seuil d'une catastrophe mondiale. Par ailleurs, 60% d'entre eux ont une taille entre 1 km et 300 mètres, qui représente le seuil d'une catastrophe 'régionale', c'est-à-dire à l'échelle d'un pays ou d'un continent. Enfin, une multitude de géocroiseurs plus petits existent également, qui représentent aussi une menace significative: l'explosion d'un objet d'une cinquantaine de mètres de diamètre à 5-10 km au-dessus de la Tunguska en Sibérie en 1908 a dévasté 2000 km² de forêt et détruit plus de 80 millions d'arbres. Le météore qui a explosé au-dessus de la Russie en Février 2013, provoquant plus de 1000 blessés, n'avait un diamètre que de 10-20 mètres. Moins de 10% des dizaines de milliers de « petits » géocroiseurs existants sont aujourd'hui détectés. L'aléa et le risque liés à ces objets « extra-terrestres », petits et gros, sont donc élevés. Or peu d'études leur ont été dédiées jusqu'à présent. Des groupes de travail se mettent en place à l'Onu, à l'IAU, les grandes agences spatiales (Nasa, ESA, JAXA), et la commission Européenne, pour initier et soutenir des actions de recherche ayant pour but de découvrir, suivre, caractériser physiquement et mieux comprendre le comportement dynamique des géocroiseurs, afin de définir des stratégies de protection (ex : missions spatiales de déviation).

2.1.3 Aléas naturels d'origine météorologiques

Les autres aléas naturels considérés sont les avalanches, mouvements des glaciers, coulées boueuses, etc. Les phénomènes de retraits-gonflements des argiles, les phénomènes de gel et de neige (verglas, permafrost...), les inondations (crue rapide, crue lente, ruissellement intense, remontée de la nappe, submersion marine, surcote), les cyclones, tempêtes et tornades, les canicules et les sécheresses, les feux de forêt.

2.1.4 Enjeux sociétaux et environnementaux des aléas naturels

Les enjeux des aléas naturels sont d'ordre sociétal, environnemental, économique et politique. Face à ces aléas, la préoccupation majeure est la préservation des vies et réseaux de vie, des infrastructures, de la fonctionnalité des systèmes (e.g. transports, eau potable, assainissement, énergie, agriculture et alimentation, santé publique, éducation, juridique, gouvernance, etc.), des ressources naturelles (service écosystémique), de l'environnement, du patrimoine culturel et industriel.

L'enjeu est ainsi la limitation des impacts des aléas naturels sur tous ces domaines, c'est-à-dire l'augmentation de la résilience de nos sociétés et de nos environnements face à ces aléas. Le succès de cet enjeu passe à la fois par une bonne connaissance scientifique des aléas (compréhension des processus), le développement de réseaux d'observations et de surveillance denses et pérennes, la mise en place de systèmes de détection précoce et d'alerte performants, une bonne connaissance de la résilience des sociétés face à ces aléas, et une gestion raisonnée et durable des risques.

L'impact des aléas naturels est particulièrement élevé sur le littoral car celui-ci est le site à la fois de divers aléas (sismique/tsunami, sédimentaire, océanologique) et d'une vulnérabilité forte due à une dense présence humaine. De ce point de vue, la France est un pays où l'aléa sismique est modéré, mais la vulnérabilité forte. L'élévation du niveau moyen de la mer se traduit généralement par des modifications des conditions d'érosion et de sédimentation qui influencent la morphologie du trait de côte, le plus souvent en recul.

Le changement des régimes de tempêtes impacte également directement cette zone d'interface. Les aléas liés au contexte sismique et sédimentaire des zones côtières (séismes, déstabilisations sédimentaires, glissements sous-marins, tsunamis), ainsi que l'évaluation de la vulnérabilité des sites exigent à côté d'une estimation de l'aléa, une compréhension et une modélisation des impacts possibles, et une connaissance du contexte économique et social.

Les aléas climatiques ont également un impact fort sur la société. Qu'il s'agisse des canicules ou au contraire des périodes de grand froid, ces risques ont des effets particulièrement délétères sur les personnes les plus vulnérables, les plus pauvres ou celles qui vivent isolées.

2.2 De l'aléa au risque ; liens entre événements extrêmes et grandes catastrophes

La prévision des événements extrêmes et des grandes catastrophes est évidemment importante dans une démarche visant à augmenter la résilience de la société face aux aléas naturels susceptibles d'engendrer des désordres notables. Elle est également importante du point de vue assurantiel en France comme souligné par la déclaration de catastrophe naturelle (CatNat).

Il faut cependant différencier les événements extrêmes des grandes catastrophes. En effet, alors qu'une catastrophe peut clairement résulter d'un événement extrême, elle peut tout autant résulter d'un événement modéré ou d'une combinaison de tels événements ayant la capacité d'affecter fortement le système exposé. La grande catastrophe est par conséquent non seulement dépendante de l'aléa mais également de la vulnérabilité des éléments exposés.

La prévision des événements modérés à extrêmes capables d'engendrer un risque élevé, passe par la compréhension de leur origine, nature, fonctionnement, période de retour etc. Nous touchons là au domaine scientifique académique qui vise précisément à étudier ces phénomènes pour en comprendre le déroulement complet, depuis les processus à l'origine de ces événements jusqu'au déroulement précis de ces événements incluant l'estimation de leur 'taille' et de leur lieu et moment d'occurrence. Ces études amont des aléas sont donc la première étape, incontournable, de toute étude de risque et de vulnérabilité.

La prévision des grandes catastrophes passe par l'évaluation des maillons faibles d'un système par rapport à une agression externe : l'événement, ou une dégradation interne liée à l'occurrence de l'événement. Les méthodes d'évaluation des risques étant pour la plupart communes aux risques anthropiques et naturels, nous les présentons dans la section « Méthodologie de l'évaluation des risques » page 41.

La catastrophe exceptionnelle d'origine tellurique et anthropique de Fukushima démontre qu'il est nécessaire et urgent, non seulement d'étudier chaque aléa individuellement et ses impacts sur nos systèmes, mais également de se préparer à « l'impensable » en développant des modèles physiques simulant les interactions possibles entre différents aléas naturels et entre aléas naturels et aléas anthropiques. Une super-éruption volcanique en Méditerranée (eg; Champs Phlégréens, Naples; Santorin), un séisme de magnitude 9 aux Antilles, un tsunami de 10 m sur les côtes de la riviéra franco-italienne, l'éruption simultanée de plusieurs volcans en Islande, sont autant de scénarios possibles auxquels nous devons nous préparer afin de protéger nos sociétés et nos infrastructures.

2.3 Évaluer les paramètres déterminants de l'aléa pour mieux contraindre le risque

L'estimation du risque dépend d'une multitude de paramètres (voir section Méthodologie de l'évaluation des risques page 41), mais le tout premier est une bonne connaissance de l'aléa responsable de ce risque. Cette connaissance comprend deux aspects : 1) la connaissance et la compréhension de

l'ensemble des processus contribuant à l'aléa et de leur fonctionnement ; 2) l'identification et la quantification des paramètres de l'aléa ayant le plus fort impact sur le risque.

La connaissance et la compréhension de l'ensemble des processus contribuant à un aléa et de son fonctionnement, passe par de multiples étapes de travail 'amont' qui sont menées par la communauté scientifique, et qu'il est indispensable de poursuivre de façon continue et soutenue (toute interruption génère des discontinuités d'observation, et donc des lacunes de connaissance).

L'identification et la quantification des paramètres de l'aléa ayant le plus fort impact sur le risque s'appuient nécessairement sur les étapes de travail décrites précédemment, mais elles requièrent des efforts accrus pour la recherche et la quantification de quelques paramètres clés tels que : la localisation des sources de l'aléa (ex : la destruction de la ville de Christchurch en février 2011 résulte de la rupture d'une faille jusqu'alors inconnue et qui s'est révélée située juste sous la ville) ; la taille des événements susceptibles d'être produits par ces sources (ex : volumes volcaniques éruptifs, magnitude des séismes, hauteur de vagues des tsunamis, etc.) ; la fréquence d'occurrence des événements attendus ; la connectivité des sources entre elles (ex : interactions séisme-éruption volcanique). La quantification de ces paramètres requiert la connaissance solide des sources déjà identifiées (voir supra), le développement de nouvelles techniques et approches pour identifier les sources non-encore connues, la quantification de ces mêmes paramètres pour le plus grand nombre d'événements similaires passés, le développement de modèles dans lesquels les incertitudes aléatoires et épistémiques sont clairement décrites et quantifiées. Il est à noter qu'une partie des sources non-encore connues, ou mal connues, se situe à la jonction terre-mer, qui reste une zone encore peu explorée²². L'exploration des plateaux continentaux où des sources d'aléa sont suspectées est donc une priorité.

2.4 Amélioration des méthodes d'observation intégrées pour une meilleure connaissance des aléas et risques d'origine naturelle

Que ce soit parce que leur évolution vers des moments d'activité intense est lente ou bien parce que ce sont des phénomènes rares, les processus responsables des aléas ne peuvent être capturés, et donc compris, qu'à travers de longues séries temporelles continues d'observations de haute qualité. L'obtention de ces mesures continues qui, à terme, se révéleront précéder, accompagner ou suivre un événement donné, nécessite l'existence et le fonctionnement pérenne d'observatoires dédiés, de réseaux de surveillance, et de système de transmission de l'alerte dont les ressources ne peuvent pas uniquement dépendre de crédits de recherche qui peuvent fluctuer en fonction de priorités nationales et de contingences économiques. Ces dernières années, la densification de tels observatoires et de leurs réseaux instrumentaux associés a permis l'acquisition d'une grande quantité de données de haute qualité documentant les phénomènes naturels susceptibles de générer des catastrophes. Cependant, l'intégration de ces données dans un système global et concerté est encore dans un état embryonnaire sauf pour le suivi de l'état de l'atmosphère et, dans une moindre mesure pour celui de

²² À l'exception notable du programme Litto3D mené par l'IGN et le Shom

l'océan qui reposent déjà sur des systèmes de prévision assimilant les observations disponibles. Les diverses observations restent ainsi cloisonnées et sectorielles.

Par ailleurs, à l'exception du domaine de la météorologie, peu d'effort a été consacré à une mise en place coordonnée, intégrée, et multi-intervenants, des moyens d'observation pour les différentes phases de l'estimation à la gestion du risque (estimation anticipative, prévention, systèmes d'alerte, gestion de crise, etc.). Or, l'analyse de la majorité des risques d'origine naturelle fait appel à des informations communes qu'il s'agisse des données scientifiques (physique, chimique, mécanique...) ou territoriales (éléments exposés, génie civil, fonctionnalités systémiques).

La prise en compte de l'information historique des derniers siècles (ex : absence ou présence d'événements ayant dépassé un certain seuil d'intensité, etc.) apporte un gain important pour l'évaluation des aléas naturels. Une difficulté existe cependant qui tient essentiellement 1) aux moyens à mettre en œuvre pour retrouver l'information historique pertinente parmi l'ensemble des archives ; 2) aux difficultés d'interprétation des documents historiques (ex : coupures de presse ayant tendance, selon l'époque, à sur- ou sous-estimer les dégâts provoqués par un aléa).

Pour de nombreux phénomènes naturels, une approche combinant observation et modélisation (déterministe et probabiliste), via l'assimilation de données, permet d'enrichir considérablement la compréhension des processus qui gouvernent leur dynamique. Par exemple, suite au retour d'expérience de la tempête Xynthia, Météo-France a mis en place une vigilance « Vagues-Submersions » intégrée au dispositif de la Vigilance sur les phénomènes météorologiques dangereux. Pour faire progresser ses connaissances en matière de tempêtes génératrices de submersions marines, l'établissement a lancé en 2012 le programme d'études « VIMERS²³ » sur le littoral breton. Il s'agit de dresser un inventaire des tempêtes ayant menacé le littoral breton depuis le XIX^e siècle, ainsi qu'une description précise mobilisant tous les champs de l'expertise météorologique (données d'archives, simulations numériques de réanalyses, expertise humaine), puis d'établir une typologie de ces tempêtes permettant d'en caractériser l'aléa et de déterminer des tempêtes de référence pour la gestion des risques, éventuellement plus fortes que les plus fortes tempêtes historiques.

Permettant un suivi global, à distance et de long terme, l'information apportée par la télédétection (spatiale, aéroportée ou ballons) est utilisée depuis de nombreuses années dans l'étude de ces aléas et risques naturels. L'enjeu réside alors dans la capacité à extraire de la grande quantité de données ainsi collectée l'information pertinente, souvent indirectement obtenue par traitement aval. Dans ce cadre, on peut citer l'existence des pôles thématiques en Observation de la Terre. La mission de ces pôles est de produire et diffuser vers une large communauté d'utilisateurs des données, produits et services à valeur ajoutée liés à l'Observation de la Terre en particulier depuis l'espace. Les pôles de données s'adressent en priorité à la communauté scientifique française, mais n'excluent pas la possibilité de servir d'autres communautés d'utilisateurs (communautés scientifiques internationales,

²³ VIMERS associe les efforts de Météo-France avec ceux du Cetmef et du Shom, avec le soutien financier de la DREAL Bretagne, de la Région Bretagne et du FEDER.

acteurs de politiques publiques, secteur privé, éducation et formation, etc.). Ainsi ces structures scientifiques et techniques ont pour vocation :

1. d'accroître l'utilisation par la communauté scientifique de la donnée satellitaire en complémentarité avec d'autres types de données (acquises in situ, par avions, ballons ou autres vecteurs aériens) en favorisant le développement de méthodes et leur capitalisation au sein de la communauté ;
2. de mettre à disposition de la communauté scientifique des bases de données composées notamment de données satellitaires qualifiées, de données de référence, d'outils et méthodes de traitement adaptés aux différents champs thématiques traités ;
3. de fédérer les acteurs scientifiques et techniques afin d'accroître les collaborations et synergie ;
4. de contribuer au positionnement et au rayonnement des compétences françaises au niveau européen et international.

Il existe à l'heure actuelle des structures dédiées à la mise à disposition de données spatiales pour l'atmosphère (pôles ETHER et ICARE), pour l'océan (AVISO, Globwave, GIS COOC), pour les surfaces continentales (Pôle Thématique Surfaces Continentales avec notamment les produits issus de l'Equipex GEOSUD, les programmes Kalidéos, KalHaïti et ISIS), et pour la terre solide (Form@ter).

L'objectif de ces pôles doit être de maximiser l'utilisation des données et produits d'observation. Ce qui implique que le service rendu par les pôles de données doit répondre aux besoins de ses utilisateurs, tout en apportant une valeur ajoutée par rapport aux produits délivrés par les structures extérieures aux pôles. Parmi les services rendus aujourd'hui par ces pôles, on peut citer entre autres :

1. l'accès à des jeux de données et produits d'observation multi-variables et multi-sources (données qualifiées, validées, standardisées, documentées et répertoriées dans un catalogue) ;
2. la diffusion d'outils logiciels (e.g. visualisation ou intégration des données, changement de format, etc.) et de documents associés aux jeux de données ou au champ d'observations couvert par le pôle ;
3. un support d'expert sur les données et outils diffusés, afin de mieux les comprendre (performances, limitations, etc.) ;
4. la fourniture de ressources pour, e.g. l'hébergement et l'exécution de codes de calcul, l'archivage de données, la publication de références, etc. ;
5. l'hébergement d'une communauté éditoriale basée sur des informations à portée générale ou plus spécifiques.

Enfin, il faut signaler que ces dispositifs nationaux de diffusion et distribution d'informations sont intégrés aux contextes inter-organismes, européens ou internationaux. Ainsi il faut replacer l'activité de ces pôles dans un contexte plus large : européen avec l'arrivée prochaine des services thématiques (« core services ») du programme Copernicus²⁴ (ex GMES, Global Monitoring for Environment and Security), et international avec le programme du GEO (Group on Earth Observations).

D'une manière plus générale, une attention particulière devra être portée sur les attentes des utilisateurs en données et produits d'observation parmi lesquels on trouve :

1. l'accès à des gammes très larges de données et produits d'observation, multi-variables et multi-sources (acquises depuis l'espace, *in situ*...), et la nécessité, pour être utilisables, que ces données soient bien qualifiées et documentées ;
2. la nécessité de couvrir une large gamme, du produit basique au produit élaboré, en fonction de la demande utilisateur, et d'y accéder facilement ;
3. la mise à disposition de longues séries temporelles de données, dont la cohérence et la qualité sont quantifiées et documentées ;
4. le parangonnage des produits des pôles nationaux par rapport aux produits comparables existant ailleurs ;
5. l'harmonisation des standards (formats de données, métadonnées), en lien avec les pratiques établies des communautés utilisatrices, et la prise en compte des standardisations éventuellement développées au niveau européen et international ;
6. la mutualisation des catalogues, avec mise à jour dynamique ou plus simplement des liens entre les différents catalogues ;
7. la traçabilité des données, en termes de production et d'expertise ;
8. le besoin d'archivage de données, amplifié par la croissance des volumes et la diversité des variables et des sources à prendre en compte.

Il est à noter aussi l'existence de la CIEST (Cellule d'intervention et d'expertise scientifique et technique) créée, dans le cadre de la Charte « Espace et catastrophes majeures²⁵ », par le Cnes, le

²⁴ Le projet Copernicus (nommé précédemment GMES pour Global Monitoring for Environment and Security), programme de surveillance de la Terre est une initiative conjointe de l'Agence spatiale européenne et de l'Union européenne. Il vise ainsi à fédérer et rationaliser les activités européennes d'observation de la Terre. Il consiste en un ensemble de services thématiques, dont les premiers éléments devraient être mis en place progressivement d'ici à 2013. Ils permettront d'optimiser l'utilisation des infrastructures existantes et futures, mais également de développer les moyens de collecte et de diffusion de données, et d'intégrer ces données dans des systèmes de suivi et de prévision de l'état de l'environnement. Il prévoit également d'assurer la pérennité et l'évolution des infrastructures spatiales nécessaires à l'acquisition de ces données. Il comprend trois composantes 1) la composante « services » assurant un accès aux informations dans six domaines (la surveillance de l'atmosphère et du changement climatique, la gestion des urgences, la surveillance des terres, la surveillance du milieu marin, la sécurité, 2) la composante spatiale fournissant des observations spatiales dans les six domaines précédents et 3) la composante *in situ* assurant des observations à partir d'installations aériennes, maritimes et terrestres dans les six domaines précédents.

²⁵ La Charte internationale « Espace et catastrophes majeures » a été créée à l'initiative de l'Agence spatiale européenne (Esa) et du Centre national d'études spatiales (Cnes) après la conférence UNISPACE III de 1999. La Charte est une collaboration internationale donnant accès à des données satellitaires pour la gestion de catastrophes. En ef-

BRGM, le CEA, l'ENS Lyon, l'INSU, l'IPGP, l'IRD, et l'Université Claude Bernard de Lyon. La Ciest a pour mission d'apporter un support scientifique et technique dans le cadre d'un déclenchement de la Charte en cas de catastrophe géologique (séismes, glissements de terrain, éruptions volcaniques et tsunamis). Ce support consiste notamment à collecter, traiter et communiquer des informations sur ces catastrophes naturelles au bénéfice des acteurs de la sécurité civile qui interviennent rapidement après l'évènement. Pendant la phase d'activation de la Charte, il est demandé à la Ciest de contribuer par la connaissance de ses membres à l'élaboration de produits adaptés pour l'utilisateur final. Pour ce faire, les données spatiales (en archive ou acquises pour l'évènement) sont mises à disposition de la Ciest gratuitement. Au-delà de la période d'activation de la Charte (3 mois), les membres de la Ciest peuvent mener des activités de recherche et de valorisation afin d'améliorer la compréhension de ces types de phénomènes.

2.5 Impact des changements globaux (climat, occupation des sols, vulnérabilité...) sur les risques d'origine naturelle

Alors que le changement climatique fait désormais l'objet d'un consensus presque général dans la communauté scientifique et qu'un effort important est consenti, essentiellement au travers du GIEC, pour élaborer des scénarios d'évolution, l'analyse de l'impact des changements climatiques sur les risques d'origine naturelle est encore dans ses débuts. Deux difficultés majeures rendent ces analyses complexes : le passage des échelles spatio-temporelles des scénarios climatiques actuels à celles nécessaires pour l'analyse des aléas naturels ; les incertitudes relatives aux couplages entre l'évolution de l'aléa (par exemple lorsqu'il est modifié par des actions anthropiques, tels les ouvrages de protection, les constructions, etc.) et l'évolution de l'exposition (par exemple par des schémas d'aménagement).

Les projets s'attaquant à cette partie de la problématique doivent donc intégrer des méthodes de changement d'échelles (downscaling), mais aussi prendre en compte les non-stationnarités spatiales et temporelles dues aux rétroactions de l'activité humaine sur certains aléas (effets anthropiques sur l'aléa), et enfin proposer des méthodes d'évaluation de l'impact de ces changements globaux en termes de modification des risques.

Impact du changement climatique sur les hydrates de gaz (méthane à 99 %)

Compte tenu des conditions de stabilité des hydrates de méthane dépendantes de la pression et de la température (à terre sous le pergélisol ou en mer sur les marges), le risque de dégazage de méthane,

fet, les nombreux satellites qui surveillent la Terre et livrent des données fiables en temps quasi réel sont un outil précieux pour la gestion des catastrophes. Grâce aux données acquises par les satellites d'Observation de la Terre, la Charte fournit les informations nécessaires à une intervention d'urgence efficace. Elle combine et coordonne les ressources et l'expertise de diverses agences spatiales en matière d'observation de la Terre et permet ainsi aux organismes de protection civile et d'aide humanitaire d'intervenir rapidement en cas de catastrophe majeure. Cette initiative unique dans son genre mobilise des agences spatiales du monde entier et permet aux utilisateurs de bénéficier gratuitement de leurs savoir-faire et de leurs satellites grâce à un point d'accès unique 24 heures sur 24, sept jours sur sept.

puissant gaz à effet de serre, est important en cas de dissociation des hydrates dans les processus de changement climatique.

En Arctique, la communauté scientifique a tiré l'alarme suite à des observations récentes qui ont montré des panaches de bulles par moins de 400 m, pouvant atteindre 100 m sous la surface sans toutefois atteindre la surface (le méthane est oxydé dans la colonne d'eau), mais qui ont également montré des bullages souvent par 80 m de fond, dans ce cas la dégradation est impossible par oxydation ou action des bactéries.

D'autre part, si l'accident de Deep Water Horizon a permis de montrer de façon spectaculaire le rôle des bactéries dans l'oxydation aérobie du méthane, il n'en est pas moins vrai que ce processus d'oxydation génère du CO₂ qui vient augmenter le risque d'acidification de l'océan, avec un fort risque pour les squelettes des organismes vivants près de la surface.

Il est généralement admis que l'accroissement du méthane constaté dans l'atmosphère de la planète provient pour beaucoup des zones humides. Mais les récents travaux montrent que le risque lié à la déstabilisation des hydrates est particulièrement sensible dans les zones arctiques avec les hydrates de méthane présents sous le pergélisol (à terre et en mer car le pergélisol fossile de la dernière période glaciaire est conservé sur la plateau continental depuis la dernière remontée du niveau marin) et sur toutes marges océaniques en mer en haut de pente à la limite supérieure de la zone de stabilité de hydrates (généralement vers 400-500 m de profondeur d'eau). Une fraction importante de ce méthane peut rejoindre l'atmosphère, si le phénomène de dégazage est suffisamment rapide, sans avoir été préalablement oxydé. Il y a donc une réelle inquiétude sur le devenir de ce phénomène amplifié par le réchauffement supplémentaire généré par les activités humaines. C'est ce qu'on appelle l'emballement climatique.

La question de la connaissance de la dynamique temporelle de ces processus est donc fondamentale pour les modéliser afin de prévoir le devenir de ce phénomène à l'échelle des très grandes surfaces concernées sur la planète (haut de pente sur beaucoup de marges océaniques et zones polaires).

2.6 Protection du patrimoine culturel face aux risques d'origine naturelle

La conservation du patrimoine culturel est un impératif mais également un moyen d'assurer des ressources financières pour le pays (ex : tourisme). La France possède un patrimoine riche et doit se doter des moyens nécessaires pour sa préservation face à toute agression, y compris les aléas naturels. Compte tenu de sa grande variété, l'analyse de vulnérabilité est complexe, qu'il s'agisse de la vulnérabilité physique, sociale ou économique.

Un des premiers enjeux est d'établir une typologie pour les monuments historiques afin de déterminer les types d'aléas les menaçant et les facteurs majeurs de leur vulnérabilité. La recherche est appelée à proposer des méthodes pour quantifier cette vulnérabilité (ex : développement de courbes de fragilité). L'efficacité des méthodes développées implique de les valider par des études de cas.

Il est à noter que certains aléas anthropiques menacent aussi notre patrimoine (ex : attaque chimique du calcaire des pierres des monuments).

2.7 Protection des installations industrielles face aux risques d'origine naturelle (Na-Tech)

Le séisme du 11 mars 2011 au Japon illustre tragiquement l'ampleur que peut avoir l'impact d'une chaîne d'événements extrêmes (1 séisme de magnitude 9, un tsunami d'amplitude extrême) sur les infrastructures stratégiques et les installations industrielles, notamment nucléaires et pétrolières. Cet impact n'avait pas été correctement anticipé, principalement du fait : 1) d'une sous-estimation de l'ampleur des ruptures sismiques possibles dans la zone, et par voie de conséquence, des hauteurs de vague tsunami ; 2) de l'insuffisance des modèles simulant les interactions possibles entre différents aléas, et entre aléas et vulnérabilité.

L'éruption du volcan Eyjafjallajökull (Avril 2010) en Islande et la paralysie du transport aérien à grande échelle qui en a résulté avec son énorme coût économique, a de la même façon montré l'insuffisance des modèles prédictifs actuels. Les déficiences principales ont porté sur la difficulté à mesurer les concentrations de cendres dans l'atmosphère, à modéliser leur dispersion, et à établir les seuils de concentration de cendres dans l'atmosphère qui soient acceptables pour autoriser le fonctionnement de l'aviation civile selon les normes de sécurité en vigueur. Ces deux exemples illustrent la nécessité de mettre en place des programmes de recherche interdisciplinaires et internationaux, menés en collaboration avec le milieu industriel et la sphère sociétale, dédiés à : la reconnaissance des sites soumis aux aléas individuels et couplés ; l'anticipation rigoureuse des caractéristiques des événements attendus (ex : magnitudes maxima, hauteur de tsunami, etc.) ; la prévision des risques et de leurs couplages éventuels ; la détection des événements.

L'estimation de cet impact constitue donc un enjeu important pour la recherche, souvent à la demande et avec le soutien du milieu industriel ou du milieu sociétal. Les besoins concernent la reconnaissance des sites soumis aux aléas ; l'anticipation rigoureuse des caractéristiques des événements attendus (ex : magnitudes maxima, hauteur de tsunami, etc.) ; la prévision des risques et de leurs couplages éventuels en s'appuyant sur la reconnaissance des sites soumis aux aléas ; l'identification des événements ; l'observation *in situ* et la modélisation des processus de ruptures (souvent en présence d'hydrates de gaz) et de transport sédimentaires.

Pour le nucléaire, des solutions intégrant des systèmes d'alertes apparaissent pertinentes, notamment pour des sites existants dont les capacités de protection peuvent être fortement contraintes, mais il convient de fiabiliser ces solutions au maximum (amélioration de la prédiction des aléas et non pas seulement de la prédétermination de niveaux extrêmes).

2.8 Évaluation de l'impact de la prévention sur la réduction du coût des risques d'origine naturelle

L'estimation du coût (direct et indirect) engendré par les catastrophes naturelles d'une part, et celle du gain à espérer d'une politique fondée sur la prévention d'autre part, ont rarement été évaluées et comparées dans le contexte français. Or, il s'agit d'un élément indispensable pour sensibiliser les décideurs et aider à la hiérarchisation des actions. L'objectif principal est donc de parvenir à une méthode d'analyse économique efficace. Pour cela, il convient d'étudier et améliorer les méthodes d'analyse existantes à travers le monde, pour évaluer les coûts directs et indirects, ainsi que l'impact économique des mesures de réduction. La recherche devra intégrer l'identification des données nécessaires et l'estimation des incertitudes associées en fonction des durées considérées.

3 Méthodologie de l'évaluation des risques

Dans ce chapitre nous visons une approche intégrée du concept de risque. L'approche risque est une posture d'analyse de phénomènes réels qui s'applique à bien des domaines. Chacun, dans sa propre spécialité, peut se poser les questions en termes de probabilité et donc, dès lors qu'il s'agit de probabiliser des effets délétères, en termes de risque. Or le cloisonnement des spécialités, s'il est nécessaire pour une approche professionnelle et rigoureuse de domaines déjà intrinsèquement très complexes, nuit à une bonne approche en matière de risque. Cela devient indispensable quand on souhaite aborder les risques liés au cumul d'expositions à divers facteurs de risque.

3.1 Vulnérabilité systémique des éléments exposés aux aléas naturels ou anthropiques

On définit la vulnérabilité comme la probabilité de voir un état initial d'un système se dégrader face à un aléa. Dans la récente acception de la vulnérabilité il faut non seulement identifier le risque global encouru par les systèmes dans un lieu et à une époque donnés, mais aussi sa capacité de réaction, c'est-à-dire l'ensemble des possibilités du système permettant de répondre aux effets de l'aléa. La capacité de réaction et d'adaptation du système présente dans cette nouvelle acception conduit à complexifier les méthodes d'analyse de la vulnérabilité.

L'analyse de la vulnérabilité est cependant une étape essentielle en gestion des risques. Elle est utilisée pour développer des recommandations de politique pertinentes pour les décideurs sur les façons de réduire la vulnérabilité et de s'adapter aux changements survenus. Elle permet d'identifier les personnes et les systèmes qui peuvent souffrir le plus des aléas présents et peut également identifier les causes.

3.1.1 Vulnérabilité face aux aléas anthropiques

Dans la grande majorité des cas, les recherches effectuées jusqu'à présent sont opératoires mais ont l'inconvénient d'être empiriques et valables pour une seule situation locale. Ce constat repose en partie sur les limites de la connaissance scientifique en particulier pour tenir compte des phénomènes d'adaptation.

Afin de pallier ces limites, des méthodes de modélisation et de simulation doivent être développées en intégrant, à plusieurs échelles de temps, la dynamique des systèmes et les capacités d'adaptation.

Ces méthodes sont multiples et concernent une grande variété d'objets et services comme la ville, les écosystèmes, la biodiversité, l'atmosphère, les systèmes de transports, la santé publique, les services écosystémiques, les ressources en eau, les infrastructures de télécommunication, l'alimentation, etc.

3.1.2 Vulnérabilité face aux aléas naturels

Dans ce domaine il importe de développer des méthodes quantitatives pour évaluer la vulnérabilité systémique des infrastructures ainsi que des réseaux et des organisations face aux aléas naturels. Il s'agit d'une part, de proposer et d'améliorer les courbes de fragilité pour les éléments constituant les systèmes en intégrant les pertes directes et indirectes, d'autre part de développer les approches de la vulnérabilité intégrant les interactions et les synergies entre les éléments des systèmes et de proposer sur cette base des méthodes efficaces de réduction de risque. L'efficacité des méthodes développées implique la mise en place d'études de cas pour les valider.

3.2 Quantification des incertitudes épistémiques et aléatoires et leur propagation dans la chaîne d'évaluation des risques

Le traitement des incertitudes dans les analyses de risque est motivé par deux soucis :

1) maîtriser la variabilité observée dans un nombre important de phénomènes physiques, i.e. le caractère aléatoire du système considéré. Cette source d'incertitude peut être considérée comme « objective », dans le sens où elle résulte d'un processus de recueil d'observations sur un grand nombre de cas (hauteur des immeubles dans une ville, revenu moyen d'une certaine population, etc.) ;

2) faire face au caractère incomplet de l'information disponible (i.e. imprécision ou incomplétude). Cette source d'incertitude est de nature « épistémique » dans le sens où la connaissance qu'un ou plusieurs experts peuvent avoir de la réalité est incomplète, partielle ou vague. Elle englobe plusieurs types d'incertitudes : nombre limité de mesures en laboratoire, densité faible des forages de caractérisation, jugement d'experts, hypothèses de modélisation, choix d'un modèle mathématique, etc. Il est à noter que la 2ème catégorie peut inclure l'incertitude scientifique au sens « d'absence de certitudes, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment » ; cet aspect étant essentiel dans l'invocation du principe décisionnel de précaution.

Cette distinction est utile en pratique, car les décisions motivées par la première catégorie peuvent être différentes de la seconde. Ainsi de par sa nature, l'incertitude aléatoire ne peut être réduite, car liée à la variabilité « naturelle » des phénomènes physiques. Les actions à mener peuvent par exemple consister en la maintenance fréquente ou le renforcement des infrastructures de protection (e.g. digues sur le littoral). Par contre, si l'incertitude résulte principalement du caractère incomplet de l'information, les actions à mener peuvent consister à cibler et hiérarchiser ces incertitudes et mener des études complémentaires ou des collectes supplémentaires de données et mesures.

Pour représenter la variabilité, la théorie des probabilités est un modèle naturel, car celle-ci s'observe en termes de distributions de fréquences. Afin de palier le caractère incomplet de l'information, le rôle de l'expert est essentiel. L'expert ou un panel d'experts fournit communément le type (Gaussienne, uniforme, triangulaire, etc.) et les caractéristiques (moyenne, quantiles, etc.) des distributions de probabilités. Cependant, dans un contexte où l'information réellement disponible est pauvre, les experts peuvent souvent ne fournir qu'une estimation de la moyenne ou d'un intervalle de confiance. Le type de la distribution de probabilités est souvent supposé introduisant ainsi une hypothèse supplémentaire que les données réellement accessibles ne justifient pas toujours, ce qui peut biaiser l'estimation finale sur l'incertitude.

C'est à ce niveau que réside actuellement le défi dans le domaine du traitement des incertitudes, qui a vu apparaître ces dernières années de nouvelles théories (probabilités imprécises, théories des évidences, théorie des possibilités, statistiques Bayésiennes, etc.). Ces théories offrent des cadres plus flexibles non seulement à la représentation de l'incertitude épistémique selon la nature de cette information réellement disponible, mais également à la représentation de l'information de dires d'experts. Cependant, un travail important de recherche reste à mener afin de : 1/ d'utiliser ces nouvelles méthodes dans les pratiques actuelles d'analyse de risques ; 2/ d'aider efficacement à la décision en matière de gestion du risque ; et 3/ communiquer sur le risque et sur le nécessaire rôle de l'expertise.

De manière plus large, la définition d'un tel cadre rigoureux pour le traitement de l'incertitude aléatoire et épistémique (regroupant les différentes formes susnommées) dans les analyses de risques est un pas supplémentaire vers la définition d'une métrique unique du risque, vue de manière général comme le triplet (événement ; conséquence ; incertitude). i.e. vers une inter-comparabilité des différents risques dans une démarche multirisque.

3.3 Changements d'échelles, intégration et déconvolution de la vision globale. Construction d'une vision intégrée entre épidémiologie toxicologie et écotoxicologie.

L'étude des relations entre l'environnement et la santé se pose principalement lorsque les effets sanitaires d'une modification de l'environnement sont mal connus ou suspectés (effets à faibles doses de substances chimiques ou physiques). Les maladies concernées (cancers, troubles reprotoxiques, maladies neurologiques, endocriniennes ou troubles immunitaires) sont souvent complexes, multifactorielles et chroniques et rendent difficile la recherche d'un lien environnement-santé. Cette difficulté augmente lorsque divers facteurs environnementaux peuvent avoir, in fine, les mêmes conséquences sur la santé. Ces problèmes complexes de nature différente rendent nécessaire une approche pluridisciplinaire qui intègre le plus souvent l'épidémiologie et la toxicologie pour estimer

l'impact sur la santé d'une population d'une modification de l'environnement ou rechercher les facteurs environnementaux à l'origine d'une modification de l'état de santé d'une population.

3.3.1 L'évaluation de l'impact sur la santé d'une modification de l'environnement

La caractérisation d'une relation entre un agent donné et la santé est tout d'abord fournie par la toxicologie. Cette discipline permet, par l'utilisation de modèles animal ou tissulaire, de déterminer les mécanismes et une relation causale entre un agent et des effets biologiques ou sanitaires. Des démarches systématiques et prospectives sont utilisées pour identifier et quantifier les risques associés à l'exposition d'un individu ou d'une population cible, à des contaminants présents dans différents milieux. La transposition de ces résultats à des conditions non expérimentales apparaît souvent compliquée. Outre les problèmes de transposition des données d'une espèce à une autre ou d'une espèce animale à l'homme, les conditions d'exposition au sein des laboratoires sont difficilement comparables à celles rencontrées par des organismes exposés à plusieurs pathogènes dans leur milieu. Il se pose alors le problème de l'extrapolation de résultats obtenus sur un petit nombre d'individus à l'ensemble de la population, y compris les plus vulnérables.

Il faut alors étudier l'action de l'environnement sur les organismes dans les conditions réelles, ce qui est l'objet de l'épidémiologie. Cette science cherche à déterminer les conséquences d'une exposition sur une population à l'aide de l'observation et d'outils statistiques pour pouvoir en déduire les actions de prévention à mener.

3.3.2 La recherche des facteurs environnementaux à l'origine d'une modification de l'état de santé

Les études analytiques qui cherchent à identifier les facteurs environnementaux susceptibles d'être à l'origine d'une modification de l'état de santé peuvent être regroupées dans deux méthodes complémentaires :

- les méthodes épidémiologiques qui cherchent à identifier des déterminants environnementaux et des facteurs comportementaux ou de mode de vie associés à l'augmentation d'une pathologie dans une population ;
- les méthodes dosimétriques couplées à des approches toxicologiques qui cherchent à mettre en évidence des indicateurs d'exposition élevée au sein d'une population et à calculer le risque attribuable à une exposition.

3.3.3 Besoins de recherche

Les modifications de l'environnement constituent des expositions le plus souvent faibles, ne concernant pour chacune d'entre elles qu'une faible fraction de la population, ce qui rend donc la mesure de l'exposition primordiale. Or sur ce point, l'épidémiologie et la toxicologie possèdent chacune des limites. L'exposition d'une population dépend de deux composantes : la concentration dans les différents milieux (aliments, air, eau, etc.), et l'importance des contacts des individus avec

ces différents milieux (comportement, temps passé, consommation, etc.). Il est important pour permettre une interprétation causale sur les risques attribuables à une exposition de considérer ces deux composantes, ce que ne permettent de faire ni les études épidémiologiques effectuées jusqu'à présent, ni les études se basant sur des mesures d'une exposition dans l'environnement et au sein d'une population.

Les méthodes ou les outils de recherche des facteurs environnementaux actuellement disponibles ne sont donc que partiellement adaptés à la mise en évidence d'une relation causale entre des modifications de l'environnement de faible voire de très faible ampleur et la survenue d'une pathologie dans une population donnée.

Pour pallier ces limites, la mise en œuvre de méthodes et d'outils de recherche adaptés au changement d'échelle et possédant une vision intégrée de l'(éco)épidémiologie et l'(éco)toxicologie est nécessaire pour améliorer l'appréciation des expositions, la connaissance des risques liés aux expositions faibles, aux expositions anciennes et chroniques, et la prise en compte des variabilités spatio-temporelles des expositions.

3.4 Analyse multirisques des effets simultanés ou en cascade, intégrant les probabilités conjointes

Une approche multirisque ne se résume pas à une addition simple des aléas ou de leurs conséquences. Elle doit intégrer l'interaction éventuelle entre les aléas et la prise en compte de la probabilité conjointe des événements. Par ailleurs, l'effet de cascade peut transformer un événement initial de faible ampleur en un événement catastrophique, et par conséquent influera la stratégie de réduction des risques.

Les approches multirisques visent à répondre aux attentes des politiques et des décideurs publics qui cherchent à optimiser l'effort de réduction de risque des systèmes exposés. L'approche multirisque permettra de réaliser des économies substantielles dans la phase d'acquisition des données (données physiques, inventaire des éléments exposés, etc), dans la mise en place des politiques (ex :aménagement du territoire), et enfin dans la réduction des risques par la diminution de la vulnérabilité (physique, fonctionnelle, organisationnelle, etc.).

Dès lors que plusieurs aléas concernent un même système se pose la question des probabilités conjointes. La stricte indépendance des événements est souvent mise en défaut par la réalité. Les phénomènes dit d'effet domino sont évoqués par les évaluateurs de risque notamment en milieu industriel. Ils traduisent le fait que la réalisation d'un événement aléatoire peut considérablement modifier la probabilité d'autres événements considérés comme rares. Le cas récent de la centrale de Fukushima, rendue vulnérable faute de systèmes de refroidissement suite à leur endommagement consécutif à un tsunami déclenché par l'occurrence d'un séisme de magnitude 9 est assez exemplaire pour être signalé. Les évaluateurs de risque doivent donc prendre en compte dans leurs scénar-

rios non seulement l'hypothèse de concomitance de plusieurs aléas mais également la dépendance en probabilité de ces différents événements.

Les recherches doivent éclairer ces efforts d'une part en mettant au point des outils de modélisation des systèmes complexes, d'autre part en montrant dans quelles conditions l'évaluation appuyée sur la concertation avec les parties prenantes permet de construire un catastrophisme éclairé, c'est-à-dire d'envisager ce qui est trop souvent considéré comme impossible par les décideurs et par les experts scientifiques. En dehors du domaine des catastrophes et événements ponctuels, les effets de substances toxiques aux faibles doses en mélange pour une exposition chronique ou récurrente sont considérées comme un des sujets de recherche trop souvent négligé. Une des raisons est la taille des expérimentations qu'il faudrait envisager pour exposer des organismes biologiques à une gigantesque combinatoire des différentes substances chimiques. De fait, au delà de quelques variables explicatives et de quelques modalités de ces variables la mission semble impossible.

Les recherches doivent maintenant s'orienter vers le couplage entre l'utilisation des outils de criblage à haut débit qui permettent d'acquérir très rapidement un très grand nombre de paramètres biologiques, la compréhension des mécanismes biologiques de l'intoxication et la modélisation des systèmes complexes. Ainsi semble-t-il possible d'envisager une classification des molécules par grande famille d'effet et en conséquence de calculer les effets conjoints possibles dès lors par exemple que des mécanismes sont liés entre eux.

Un des problèmes rencontrés en toxicologie et en écotoxicologie tient à l'analyse des données en terme d'effet de seuil. Il est clair que ce modèle encore dominant devra évoluer afin d'expliquer les effets attendus de cocktails de substances dont la dose de chacune est inférieure à son supposé seuil d'effet. Cette fois encore des progrès de la modélisation sont attendus pour combler cette lacune de la connaissance et surtout de son appropriation. Enfin, la connaissance des expositions multiples, de l'homme ou des écosystèmes doit être développée afin de caractériser le terme d'exposition les risques liés à ces expositions. L'utilisation de toutes les informations disponibles sur la présence de substances chimiques dans l'environnement, la modélisation de leur devenir dans les milieux et l'utilisation de systèmes d'information spatiale sont à encourager vivement. Le couplage avec les modèles dose réponse pourrait à terme permettre une véritable cartographie des risques toxiques environnementaux.

Dans le cadre d'une méthodologie multirisque, il faut aborder la notion des bases de données interoperables, les moyens adaptés pour la cartographie, le réexamen de la notion de la probabilité d'occurrence, l'analyse des séries de données temporelles et la notion des échelles spatiales pertinentes, le choix des outils de modélisation et de visualisation, et enfin les méthodes d'analyse des incertitudes et de leur propagation.

En France, le suivi d'un site pilote connu pour être soumis à un ou plusieurs forts aléas (ex : ville et périphérie de Nice, soumises au triple aléa sismique, tsunami et gravitaire), pourrait être une stratégie efficace pour acquérir les données nécessaires à l'évaluation des multi-risques.

3.5 Les grandes actions et infrastructures liées au domaine des risques

La collecte des longues séries de données nécessaires à l'étude des aléas et des risques : collections biologiques, échantillons environnementaux, outils cartographiques, données physiques, construction et partage des informations, bases de données etc, ainsi que leur stockage et leur mise en accessibilité sont actuellement pris en compte au sein des appels à projet des investissements d'avenir.

Le fait de prévoir à l'avance quelles variables doivent être enregistrées au niveau pertinent d'échelle et quels données/échantillons doivent être analysés ou entreposés pour des analyses ultérieures est une condition nécessaire à la rentabilité scientifique des investissements dans ces lourdes bases de données appelées cohortes. Les organismes d'AllEnvi sont susceptibles d'apporter les éclairages indispensables en matière d'exposition aux agents dangereux dont les épidémiologistes auront besoin pour caractériser la causalité des observations sanitaires au sein des cohortes.

4 Gestion des risques

Dans la littérature anglo-saxonne sur le risque on sépare en général rigoureusement la gestion des risques (risk management) et l'évaluation des risques (risk assessment), cette séparation a pour but de garantir l'absence de lien d'intérêt, de pensée de mode commun ou encore le manque d'imagination qui pourrait venir d'un lien étroit entre le fait de gérer un risque et les assertions sur sa réalité. Cependant cette distinction, si elle est trop rigoureusement appliquée, pourrait conduire à exclure la gestion des risques de la démarche scientifique sur le risque. La gestion des risques implique la mise en œuvre de mesures de surveillance, l'adoption d'une vision globale des risques multiples, des choix contraints par des enjeux économiques et politiques et des enjeux sociaux qui sont autant de sujets de recherches de sciences humaines et sociales. Il est donc plus juste de séparer décision et expertise que gestion et évaluation. Dans cette acception nous pouvons envisager une stratégie de recherche sur la gestion des risques, recherches dont la finalité est l'éclairage du décideur, éclairage qui ne se substitue en rien à sa responsabilité.

4.1 Enjeux économiques de la gestion des risques

Dès lors qu'une catastrophe sanitaire ou écologique se produit, que l'aléa soit d'origine naturelle ou anthropique, accidentel ou chronique, le coût des réparations et l'ampleur du préjudice sont aisément mesurables. Il nous faut cependant atténuer cette assertion du fait des problèmes éthiques liés au coût de la vie humaine ou du handicap, difficilement commensurables, même si des valeurs repère sont utilisées pour les analyses économiques. En revanche, en situation d'évaluation des risques les choix sont beaucoup plus difficiles. Les moyens consentis à la prévention des risques sont forcément limités et font l'objet d'un consensus social plus ou moins explicite. De ce fait surévaluer ou sous évaluer certains risques induit une situation non optimale en matière de répartition des efforts de prévention. Comprendre les déterminants du coût de la prévention et les enjeux sociaux des populations confrontées aux risques est indispensable à la mise en œuvre d'une politique éclairée de prévention des risques.

L'analyse coût-bénéfices permet d'analyser objectivement les risques en comparant l'ensemble des coûts d'une action de prévention des risques avec ceux liés aux risques évités. Elle est surtout comparative ce qui permet de comparer le coût de plusieurs options possibles d'efficacité équivalente, ou de comparer les bénéfices de composantes différentes d'un budget de prévention donné. Elle permet par comparaison avec l'inaction de mesurer le coût lié à l'absence de mesure (exemple du rapport Stern sur le coût du changement climatique). Ainsi constitue-t-elle un outil intéressant d'aide à la décision, décision à laquelle elle ne se substitue pas.

Les grandes difficultés sont liées à la mesure du coût et aux incertitudes. Les analyses de préférences révélées qui utilisent le coût des mesures de prévention des citoyens ou des préférences annoncées qui passent par des enquêtes déclaratives présentent bien entendu de nombreux biais. Il est en particulier très difficile de prendre en compte les inégalités ou les biais liés à la proximité d'événements importants. Tout aussi incertain est le calcul du coût des dommages dans le temps, notamment pour les générations futures, aucun instrument de calcul économique n'étant dimensionné pour des durées au-delà de quelques décennies.

Pourtant l'analyse coût-bénéfice²⁶ pourrait être un support important à la décision publique en rationalisant le choix de politiques de prévention, en montrant l'intérêt de mesures précoces pour des risques à long terme ou en permettant de mettre en évidence les actions publiques dont les bénéfices attendus sont contrebalancés par des risques importants. La recherche en économie, en lien avec la connaissance des aspirations citoyennes face aux risques doit aider à développer les outils pour développer en France ces analyses qui restent encore trop confinées dans les pays du nord de l'Europe et de l'Amérique. Un des intérêts qui n'est pas le moindre serait d'utiliser ces informations pour construire les instruments économiques de la gestion des risques. La fiscalité ou d'autres instruments économiques peuvent en effet renchérir le coût du risque, donc inciter à la prévention, au nom de l'intérêt collectif ou de la protection de l'environnement. Assoir des taxes ou redevances sur le risque permet à la fois d'inciter à la diminution de ces risques tout en allégeant une partie de la fiscalité qui porte sur des activités comme le travail. Cela ouvre également à l'idée que ces taxes sont de fait des paiements en compensation d'aménités environnementales.

4.2 Les enjeux sociaux

Si tout le monde s'accorde sur la montée des préoccupations environnementales et si la gestion des risques est désormais inscrite à l'agenda politique, les arbitrages, les stratégies et les conceptions que les acteurs ont des risques encourus restent mal connues. Par exemple, la mise en œuvre de politiques publiques suscitant des démarches participatives rencontre encore des difficultés en ce qui concerne l'information des populations, la mobilisation des acteurs dans les dispositifs - ou simplement sur cette thématique - et le déroulement de débats publics permettant à tous les points de vue d'être entendus.

Il apparaît particulièrement important de développer une recherche en sciences humaines et sociales, au-delà de l'économie, dans le domaine des risques. Cette recherche doit s'attacher à com-

²⁶ IL convient de noter que l'analyse coût-bénéfice est en cours d'abandon par le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie au profit de l'analyse multi-critères (AMC). L'AMC sera ainsi rendue obligatoire pour justifier certains projets soumis à labellisation comme les Programmes d'action de prévention des inondations (PAPI) et les Projets de restauration d'endiguements (PSR). Un nouveau guide méthodologique sera diffusé pour expliciter cette méthode en janvier 2014. Cette décision ne change pas l'intérêt des recherches dans le domaine, l'analyse multi-critères n'étant qu'une méthode particulière d'analyse coût-bénéfices qui dans le cas présent ajoute des critères environnementaux non monétarisés à l'analyse coût-bénéfices *stricto sensu*.

<http://www.consultations-publiques.developpement-durable.gouv.fr/amc-inondations>

prendre les jeux d'acteurs et les perceptions des personnes face aux risques. Elle devrait également s'intéresser aux enjeux de gouvernance des risques notamment dans leur dimension participative.

Les conceptions des acteurs sur les phénomènes en jeu, parfois ignorées et jugées peu légitimes, sont pourtant le moteur de leur action. La connaissance de leurs comportements - des éléments qui les guident et des compétences qu'ils vont devoir mettre en œuvre pour se faire entendre, en fonction de leurs rapports à ces risques - est à approfondir.

De la même manière, les éléments susceptibles de susciter ou d'exclure la prise en compte de données environnementales par les acteurs, notamment celles qui supposent des changements dans leurs manières de penser ou d'agir, ont été peu étudiés. De plus, ces éléments sont à considérer dans la dynamique d'un contexte en mutation.

Enfin, les travaux sur les inégalités environnementales - en fonction des territoires ou des groupes sociaux - soulignent, là aussi, la nécessité de décloisonner ces problématiques environnementales pour les réinscrire dans les champs politiques, économiques, sociaux et culturels.

Un certain nombre d'aléas menacent des populations sans qu'on n'agisse sur la cause de l'aléa, soit parce qu'on la considère naturelle soit parce que la lutte serait techniquement ou économiquement inabordable. Par exemple, des contaminants sont « déjà » dans l'environnement, les sédiments, le sol ou l'eau et continuent de s'accumuler dans les organismes vivants sans que l'on entreprenne de remédiation véritable. Des statistiques menées sur de larges populations ou des prédictions inférées à partir de données toxicologiques permettent d'établir des relations dose-effet, le plus souvent en population générale, sur la base desquelles les pouvoirs publics définissent des normes-seuils et interdisent des pratiques qui menacent la sécurité ou la santé des personnes. Mais cette réponse pose plusieurs problèmes :

1. ces normes-seuils ignorent les effets d'accumulation et de synergie des faibles doses dont les effets ont pu être repérés par certains segments de la population ;
2. le seuil induit une politique dichotomique : en dessous de la norme, le problème est quasiment nié, au-dessus on interdit. Le débat se focalise sur la définition d'une quantité, son unité de mesure, ses instruments, etc. Ceci conduit à exclure peu à peu toutes les personnes concernées par le problème mais qui n'utilisent pas le langage retenu ni sa technologie. Le problème est traité dans des arènes de spécialistes de manière très confinée (ce qui à terme produit des situations explosives). Quels enseignements tirer des expériences réussies de collecte de données par le public (sciences citoyennes), pour les transposer aux risques ?
3. L'accent mis sur le seuil conduit à une approche strictement normative qui fait qu'en cas de variation de la norme induite par des stimulus extérieurs, des situations auparavant jugées non problématiques le deviennent (sans grand accompagnement le plus souvent). Il est donc intéressant d'aller au-delà de cette approche par les seuils et de caractériser des exposi-

tions/vulnérabilités variables pour aller vers une gestion concertée des risques qui prenne en compte ce que les gens vivent localement.

4. On va interdire certaines pratiques en laissant l'aléa (le contaminant, la crue, etc.) dans l'environnement. Comment les riverains vont-ils vivre et agir avec cette présence ? Certains riverains eux vont être des doubles victimes de la pollution et du marché (de l'immobilier, de la pêche, etc.) qui va s'écrouler dans les zones reconnues comme polluées. D'autres, anticipant ce phénomène, vont s'opposer à ce qu'on mesure leur exposition, pour éviter un zonage dépréciant leurs biens ou pour vendre leur bien avant la dépréciation. Le problème du risque n'étant jamais posé dans des conditions « normales » mais seulement en situation de crise, les victimes éventuelles qui pourraient figurer parmi les principaux informateurs, s'y refusent sous peine de tout perdre. Comment prendre en compte le caractère stratégique de l'information sur ce thème ?

Il est indispensable d'apprendre à penser plusieurs risques à la fois. Or, l'évaluation et la gestion des risques conduisent à des arbitrages qui hiérarchisent les risques de façon non explicite. Une histoire et une sociologie de ces approches dont le travail est de produire à la fois des représentations du risque et l'espace de calcul permettant de les gérer, est nécessaire. Penser plusieurs risques à la fois permet aussi de mieux prendre en compte les risques induits par la remédiation.

4.3 Bases scientifiques des règlements et normes

Les politiques nationales, européennes ou internationales concernant les substances chimiques (Règlement REACH), les biocides, les médicaments (Plan national sur les résidus de médicaments dans l'eau), la qualité des eaux (Directive cadre sur l'eau) ou les déchets, pour ne citer que quelques exemples, s'appuient sur des méthodes de caractérisation des propriétés toxicologiques et écotoxicologiques de ces composés ou matrices devant faire l'objet d'une reconnaissance la plus large possible en terme de reproductibilité et de répétabilité. Pour ce faire des programmes de normalisation ou de standardisation de ces méthodes ont été mis en place dans diverses instances comme l'Afnor²⁷, l'ISO²⁸, le Cen²⁹ ou l'OCDE³⁰.

Ces travaux de normalisation s'appuient sur des actions de recherche menées dans des structures académiques visant : d'une part à acquérir les connaissances de bases sur les mécanismes de toxicité ou sur la physiologie des organismes tests ; d'autre part à développer les protocoles soumis à standardisation. Il y a donc une proximité et un échange fort entre normalisation et recherche.

Dans le domaine de l'écotoxicologie par exemple, après une période de développement de méthodes de caractérisation de la toxicité létale les travaux s'orientent de plus en plus vers la caractérisation de l'écotoxicité sublétales et en particulier sur la caractérisation d'altérations biochimiques et

²⁷ Association française de normalisation

²⁸ International standards organization

²⁹ Comité européen de normalisation

³⁰ Organisation de coopération et de développement économique

tout particulièrement dans le domaine de la fonction endocrinienne. Dans le domaine de la toxicologie, les besoins de recherche pré-normative se placent dans le contexte de la limitation ou de l'amélioration des essais sur vertébrés et tout particulièrement sur mammifères. Deux grands axes de recherche méritent actuellement un effort particulier, la substitution avec le développement de méthodes *in vivo* et l'amélioration avec un focus sur les approches statistiques et la planification expérimentale.

Les recherches pré-normatives sont ainsi nécessaires dans un grand nombre de domaines des risques afin d'améliorer la caractérisation des aléas et des vulnérabilités dans une optique d'aide à la décision.

4.4 Développer et structurer l'expertise pour la décision publique

De nombreux événements de l'actualité récente suggèrent que l'expertise et la gestion des risques vivent une crise importante dont il importe de sortir. Le groupe thématique ne peut ignorer cette crise et ne souhaite pas se retrancher dans une quelconque « Tour d'ivoire » scientifique. Au contraire, nous avons souhaité établir des propositions constructives pour améliorer significativement la situation. Afin d'illustrer notre propos nous allons analyser deux exemples récents l'un dans le domaine des risques naturels avec le séisme de L'Aquila en Italie, le deuxième dans le domaine du risque sanitaire avec la pandémie grippale de 2009.

La crise de l'Aquila³¹ constitue un des exemples d'alerte qui révèle la crise et illustre le besoin de changement. Six sismologues italiens ont été condamnés à six années de prison pour homicide par imprudence le 22 octobre 2012. La ville de L'Aquila est située au sein d'une zone à risque sismique très élevé. Au début de l'année 2009 quelques centaines de séismes de faible magnitude ont eu lieu, suivis le 30 mars par un séisme de magnitude 4, puis le 5 avril par deux nouvelles secousses également de niveau 4. La tradition dans cette ville, pratiquée par de nombreux habitants, consiste à dormir dehors, ou dans leur voiture, pendant ces périodes de tremblement de terre. La durée des phénomènes enregistrés début 2009 avait induit une tension importante dans cette ville. De plus, un ancien technicien de laboratoire, Giampaolo Giuliani, habitant de L'Aquila annonçait l'imminence d'un séisme à partir de ses propres mesures de radon et d'une théorie controversée et non publiée. C'est cette inquiétude des habitants et cette controverse qui expliquent que de façon exceptionnelle la commission des risques, qui se réunit habituellement à huis clos à Rome, se soit réunie à L'Aquila, en présence de nombreux élus locaux et parties prenantes. Après cette réunion d'une heure, les scientifiques n'ont pu que confirmer que, selon les propos de Enzo Boschi, alors Président de l'Institut national de géophysique et de vulcanologie (INGV) : « Il [était] peu vraisemblable qu'un séisme

³¹ L'analyse qui suit s'appuie sur l'article : « A fault ? » de Stephen S. Hall paru dans Nature, vol 477, 264-269, du 15 septembre 2011.

comparable au séisme de 1703 se produise à court terme, mais sa possibilité ne [pouvait] être totalement exclue. » Cependant, lors d'une conférence de presse le directeur adjoint de la protection civile, Bernardo De Bernardinis, déclarait aux journalistes que la situation était normale et qu'il n'y avait pas de danger. Il avançait même qu'au contraire les petits séismes répétés diminuaient le risque en permettant de dissiper de l'énergie, propos qu'il prête aux scientifiques, ce que ceux-ci réfutent. De fait, de telles assertions ne figurent pas dans les minutes officielles de la réunion. Malheureusement, dans la nuit du 5 au 6 avril un séisme dévastateur de magnitude 6,3 détruisait 20 000 bâtiments, tuait 305 personnes et en blessait plus de 1 500. C'est postérieurement à ce tragique événement qu'Enzo Boschi s'est rendu compte que la commission n'avait été réunie que pour calmer la population. Probablement s'agissait-il d'apporter une contradiction officielle aux mauvais augures de Giampaolo Giuliani ! Aujourd'hui, alors que la justice italienne accrédite l'idée que ce sont les conclusions rassurantes des scientifiques qui ont conduit la population à se mettre en danger, on s'aperçoit que les scientifiques ont été instrumentalisés, que les notions de vraisemblance et de possibilité ne sont pas comprises et que l'existence d'une controverse nuit à la sérénité des processus d'évaluation et de gestion. Ces faits, graves à de nombreux points de vue, sont très illustratifs des difficultés de l'évaluation des risques, de l'expertise associée, de la décision et de la communication vis-à-vis des parties prenantes. Plusieurs questions se posent : celle de la séparation de l'expertise et de la décision, celles liées à la communication sur les risques, celle du caractère unidisciplinaire du groupe d'experts, tous sismologues à l'exclusion d'autres disciplines notamment en sciences humaines, celle de la gestion des situations d'urgence, etc. Toutes ces questions méritent débat.

La grippe de 2009 est une grippe dont le virus responsable est un virus de type A(H1N1). Elle est arrivée dans un contexte de tension autour des pandémies grippales. En effet depuis une dizaine d'années l'Organisation mondiale de la santé (OMS) était fortement mobilisée sur le risque de grippe aviaire. Le virus aviaire A(H5N1), apparu en 1997 s'est répandu en Asie à partir de 2003, il se caractérise par une transmission animal-homme de faible probabilité mais cette grippe est très virulente puisqu'elle tue les humains contaminés dans un cas sur deux. Le risque anticipé par l'OMS était lié à l'éventualité, possible du fait de la plasticité génotypique des virus de la grippe, d'une modification du type A(H5N1) *via* une mutation ou une recombinaison avec un autre virus avec des conséquences catastrophiques. Chacun pense à la grippe espagnole de 1918, grippe de type A(H1N1) caractérisée par une forte virulence et une transmission très rapide qui a provoqué entre 20 et 40 millions de morts dans le monde. Cette situation conduit à penser que « la pandémie annoncée est sensiblement devenue une pandémie attendue », selon les termes du rapport de la commission d'enquête du sénat³² d'où nous avons tiré les informations sur ce sujet. De fait, la pression de l'OMS sur les états membres a été forte. Un expert américain Michael Osterholm avait suggéré que sans préparation le coût humain serait dévastateur et publié de nombreux articles suggérant une

³² Sénat, n° 685 (2010) Rapport de la commission d'enquête sur le rôle des firmes pharmaceutiques dans la gestion par le Gouvernement de la grippe A (H1N1)v

impréparation des autorités américaines. En France, l'Institut de veille sanitaire (InVS) estimait qu'en cas de pandémie grippale, la France pourrait compter entre 91 000 et 212 000 décès³³. La commission d'enquête du sénat a estimé en 2010 que, dans ce contexte le plan français, à l'instar du plan de l'OMS, avait été calibré pour une menace pandémique grave sur la base des scénarios de la grippe aviaire et qu'en conséquence, il comportait des mesures très lourdes à mettre en œuvre. C'est dans ce cadre qu'à l'initiation de la pandémie la France avait stocké 33 millions de doses d'antiviraux, un milliard de masques chirurgicaux et 700 millions de masques de protection individuelle. Le coût total de l'opération s'est élevé à près d'un milliard d'euros en France.

Le monde de la recherche semble avoir joué un rôle dans ce qui apparaît aujourd'hui comme une exagération des mesures de prévention. L'effervescence autour de la notion de pandémie a poussé nombre de chercheurs à s'y intéresser et, en conséquence d'un mode de fonctionnement basé sur la compétition, à s'engager dans une course à la publication totalement indépendante d'une quelconque visée sanitaire préventive. Le graphe présenté sur l'illustration 2 témoigne de ce pic d'activité scientifique et du caractère amplificateur du couplage entre l'alerte de santé publique et la compétition scientifique.

Cette crise, dont on peut avant tout se féliciter du nombre relativement faible des victimes, a également mobilisé l'expertise en France. Les sénateurs de la commission d'enquête ont souligné la qualité de l'expertise scientifique dont ont pu disposer les pouvoirs publics. Ils ont cependant souligné quelques défauts. Cette expertise est, dans l'ensemble, peu adaptée à la gestion des urgences, il semble, d'après la commission d'enquête, que les instances les plus compétentes, notamment le Haut conseil de santé publique (HCSP), instance indépendante, n'ont pas été mobilisées au profit d'une instance plus légère : le Comité de lutte contre la grippe (CLCG) nommée partiellement par le ministre de la santé. Par ailleurs, l'utilisation de modèles mathématiques simulant la propagation de la pandémie a conduit à une grossière surestimation de celle-ci. De fait, il apparaît que des modèles purement théoriques, non calés sur des données, ont été utilisés sans précaution. Peu d'équipes semblent capables d'en proposer et ils ne sont pas prédictifs mais permettent seulement d'explorer le domaine du possible. Il a également été souligné la confusion, au sein du CLCG, des considérations éthiques, issues du Comité consultatif national d'éthique et apparemment mal comprises, et des considérations scientifiques.

Ces deux crises montrent combien la place de l'expertise est difficile dans un contexte de risque. La notion de probabilité est en général très mal comprise, de même que la notion de possibilité. C'est un cas général pour tous les risques. Dès lors que les experts considèrent comme peu probable une situation qui reste possible ils seront systématiquement critiqués, que l'événement tragique se produise, cas de L'Aquila, ou ne se produise pas, cas de la pandémie de grippe. Les précautions de langage sur le caractère possible ou sur l'absence de certitudes ne dédouanent pas les scientifiques

³³ InVS, « Estimation de l'impact d'une pandémie grippale et analyse de stratégies », rapport d'activité 2005. et M. Michael Osterholm, « Préparation pour la prochaine pandémie », *New England Journal of Medicine*, 2005, n° 352. cités dans le rapport (op cit.) du sénat.

d'une attente vis-à-vis d'eux qui reste celle de l'expression d'une vérité, voire de la vérité scientifique dont eux seuls semblent savoir qu'elle est illusoire. Le recul de la formation scientifique dans une société où pourtant la science et la technologie sont omniprésentes augurent mal d'un avenir serein dans ce domaine. Force est de constater que si parfois, notamment en situation d'urgence, les scientifiques devraient s'abstenir de communiquer puisqu'ils ne disposent pas du temps nécessaire pour expliciter des notions complexes, ils doivent fournir un effort important de pédagogie du risque afin d'acculturer le public et les décideurs à ces notions. On bute alors forcément sur le phénomène de mode, dont nous avons montré qu'il touchait également la communauté scientifique, hors période de crise l'intérêt pour les risques retombe très vite, et souvent également les financements associés.

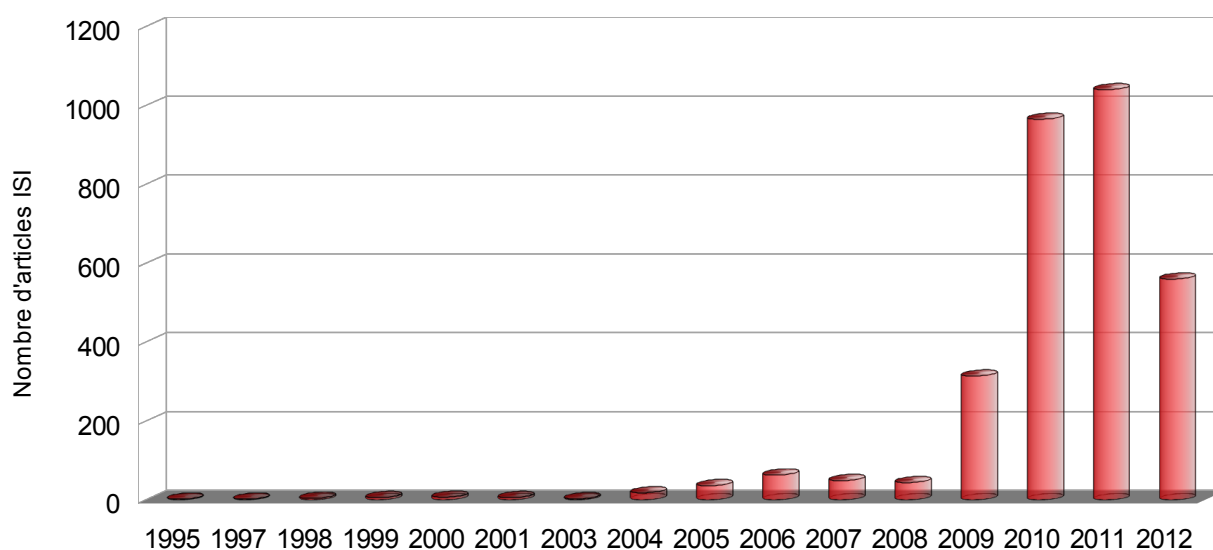


Illustration 2: Évolution du nombre de publications recensées sur le web of science dont le titre répond à l'équation logique suivante : (H5N1 OU H1N1 OU flu) ET pandém. Ces données ne peuvent être considérées comme des valeurs absolues mais en revanche leur évolution relative est vraisemblable.*

La charte nationale de l'expertise, adoptée le 2 mars 2010 par le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche s'impose à tous les opérateurs de recherche. Conçue comme telle, elle se lit comme un dénominateur commun qui ne contredit aucune des cultures des organismes. Elle prévoit d'ailleurs que ceux-ci peuvent adopter des dispositions qui leur sont propres, voire s'affranchir, temporairement le cas échéant, de certaines dispositions de la charte. Il s'agit donc d'un document a minima peu contraignant destiné avant tout à rappeler aux opérateurs leur rôle en matière d'expertise et à communiquer sur l'importance du rôle de la recherche pour l'expertise notamment dans le contexte du Grenelle de l'environnement. Cette charte engage les organismes à reconnaître les activités d'expertise dans l'évaluation de leurs agents, mais ne contraint pas l'Agence d'évaluation de la recherche à être en phase avec cela pour l'évaluation des unités. Elle adopte un principe de transparence sur les données qui fondent l'expertise qu'elle doit rendre accessible sans préciser si cette accessibilité est réservée au commanditaire ou bien s'il s'agit de rendre publics ces éléments. On peut penser qu'il s'agit de la première hypothèse car rien ne précise quel sort est réservé au document d'expertise qui

ne semble pas avoir de vocation publique. La charte n'aborde d'ailleurs pas les enjeux, dont nous avons vu la complexité, de la communication des résultats et avis des scientifiques. Il n'est pas non plus précisé qui, de l'organisme ou des experts, s'engage et prend la responsabilité des conclusions de l'expertise. La charte prévoit que l'opérateur se saisisse d'un risque environnemental ou sanitaire en son sein et mobilise son expertise. En revanche rien n'est dit pour le cas où l'expertise révélerait un tel problème chez le commanditaire, une entité extérieure à l'opérateur ou le domaine public. La charte ne prévoit pas de dispositions en matière d'éthique et de déontologie au sein de l'opérateur. Elle ne mentionne pas de procédure de gestion des conflits, se contentant de demander que les controverses soient mentionnées, sans pour autant exiger l'explicitation des positions minoritaires. Elle ne traite pas des questions de relation entre l'expertise et la décision. Elle n'aborde pas les enjeux liés aux crises et situations d'urgence. Elle ne s'inquiète pas des questions de pluridisciplinarité et du caractère collectif des expertises. Enfin, elle ne prévoit pas d'association des parties prenantes aux expertises.

La charte a eu une conséquence très positive car les organismes spécialisés dans le domaine des risques ont également rédigé et mis en œuvre des chartes d'expertise ou de déontologie qui explicitent un certain nombre de principes. L'Ineris³⁴, par exemple, a construit sa charte sur sept principes : l'indépendance de jugement, la compétence, l'adaptation des moyens, la transparence, la qualité scientifique et technique, le devoir d'information et la responsabilité. On notera que le devoir d'information est réservé au commanditaire de l'expertise, l'institut n'allant pas jusqu'à s'obliger à informer les pouvoirs publics d'un risque éventuel lié à une activité privée. L'organisme organise des réunions mensuelles avec les associations de consommateurs et de protection de l'environnement pour aborder avec eux des enjeux scientifiques qui les intéressent. L'IRSN s'est doté d'une commission d'éthique et de déontologie présidée par le philosophe Jean-Pierre Dupuy, spécialiste mondialement reconnu des catastrophes. La commission élabore conjointement avec l'IRSN sa charte de déontologie et émet des avis sur les enjeux éthiques et les considérations déontologiques qui s'appliquent à l'institut pour son activité d'expertise des risques nucléaires. Les membres du conseil d'administration, les principaux cadres dirigeants et les personnes les plus concernées remplissent une déclaration d'intérêt qui est accessible au public sur le site internet de l'IRSN. Un comité de la recherche, largement ouvert aux parties prenantes, conseille l'IRSN sur les orientations de sa recherche. L'Inserm s'est doté d'une mission expertise qui établit des propositions d'action pour les décideurs en matière de santé publique et identifie les besoins de recherche. La mission s'appuie notamment sur les expertises collectives dont l'établissement est un des premiers promoteurs en France. L'Inserm a construit sa charte de l'expertise comme une déclinaison de la charte nationale avec un chapitre sur la déontologie de l'expertise qui insiste sur la compétence et la fiabilité, l'impartialité, l'absence de conflits d'intérêts et la neutralité et sur la confidentialité. À noter encore une fois le souci de protéger le commanditaire, via la garantie de confidentialité, qui l'emporte sur l'information du grand public. La charte de l'expertise du CNRS, elle aussi présentée comme une déclinaison

³⁴ Institut national de l'environnement industriel et des risques

raison de la charte nationale restreint la confidentialité aux affaires relevant de la défense nationale, cependant « Aucune clause de confidentialité ne peut s'appliquer lorsque l'expertise réalisée décèle la possibilité d'un risque, notamment à caractère environnemental ou sanitaire. » Cette clause, il faut le souligner, fait du CNRS un organisme plus avancé en matière de transparence que la plupart des organismes de recherche en appui aux politiques publiques, y compris ceux du domaine du risque ! Le CNRS ne s'oblige pas à faire des recommandations, ce que l'on peut analyser comme une application stricte du principe de séparation entre l'expertise et la décision³⁵, il s'engage également à rendre compte des avis minoritaires et à prendre en compte les activités d'expertise dans l'évaluation des chercheurs. Il reste que cette charte reste encore un peu confidentielle, le site du CNRS ne la mentionne pas explicitement, le mot expertise est absent de la liste des mots clé du CNRS, il faut utiliser les outils de recherche pour accéder au communiqué de presse qui permet de la télécharger ! La charte de l'Inra comporte également des éléments pour prévenir l'ingérence de l'expert dans la décision en excluant avis et recommandations. L'Inra considère également que les résultats sont publics et que l'ensemble du processus est transparent jusqu'à la publication des résultats.

Il apparaît donc au groupe thématique qu'il est opportun de reprendre les travaux sur l'expertise, de façon pluraliste, afin de compléter les dispositions de la charte de l'expertise de façon à proposer des solutions face aux nombreux problèmes rencontrés, notamment dans le domaine des risques. Cette proposition peut paraître surprenante dans le cadre d'un document de stratégie scientifique. Cependant, d'une part elle induit de nombreux enjeux de recherche³⁶, sur la science des risques et la complexité, d'autre part l'expertise s'inscrit dans une relation étroite avec la recherche qui justifie également qu'on s'en saisisse dans le cadre d'une vision prospective.

Le Sénat a adopté en première lecture le 21 novembre 2012, la proposition de loi relative à l'indépendance de l'expertise en matière de santé et d'environnement et à la protection des lanceurs d'alerte, déposée par la sénatrice Marie-Christine Blandin³⁷. Cette loi intéresse l'expertise scientifique et devrait, si elle est adoptée par l'assemblée nationale, relancer les débats au sein des organismes sur l'expertise. Elle prévoit en effet la création d'une Commission nationale de la déontologie et des alertes en matière de santé et d'environnement. Cette commission émettra des principes déontologiques applicables à l'expertise scientifique et au dialogue entre les organismes scientifiques et la société civile. Elle sera destinataire des alertes scientifiques et en suivra les effets. Elle prévoit la protection de toute personne qui alerte son employeur ou les autorités publiques d'un risque sanitaire ou environnemental avec quelques restrictions applicables si la dénonciation est diffamatoire, si la personne est de mauvaise foi ou si elle a connaissance d'une inexactitude dans les

³⁵ De fait la norme NF X 50-110 relative à l'expertise définit une recommandation comme un avis émis par l'organisme d'expertise sur ce qu'il convient de faire ou de ne pas faire. Cette formulation est ambiguë car même s'il ne s'agit que d'un avis les termes de la définition semblent assez contraignants pour le décideur qui pourrait être contraint de décider alors que l'expert affirme qu'il convient de ne pas faire.

³⁶ Notons au passage que science et recherche ne sont pas synonymes, à cet égard l'expertise, sans être de la recherche, relève à l'évidence de la science.

³⁷ Proposition de loi relative à l'indépendance de l'expertise en matière de santé et d'environnement et à la protection des lanceurs d'alerte. <http://www.senat.fr/leg/tas12-034.html>

faits dénoncés. Ce point est particulièrement important car il annule de fait les clauses de confidentialité vis-à-vis des commanditaires. Un scientifique qui alerterait la Commission nationale sur un risque chez un « client » ne pourrait probablement pas être sanctionné pour non-respect du contrat puisqu'il aurait lancé une légitime alerte. De fait ce serait l'acceptation du CNRS qui considère que tout risque sanitaire ou environnemental à vocation à être rendu public qui deviendrait la seule disposition compatible avec la loi. Il reste que malgré les clauses que la restreignent il sera difficile de mettre en œuvre le volet protection du lanceur d'alerte dès lors que des individus pourraient être encouragés à jouer un jeu personnel dans des controverses scientifiques. Comment éviter par exemple qu'un scientifique dont les travaux ne sont pas reconnus par ses pairs, à l'instar de ceux que nous avons cités dans chacun de nos deux exemples, lance des alertes dont le principal bénéfice serait de lui éviter tout ralentissement de carrière qui peut en général être la conséquence d'une évaluation défavorable ?

Les éléments qui précèdent montre que l'expertise dans le domaine des risques et plus généralement dans le domaine de l'environnement, les liens entre science et société, les enjeux éthiques et la déontologie du métier de scientifique sont autant de sujets qui méritent une réflexion collective et approfondie devant déboucher sur des propositions opérationnelles. Les alliances, notamment AllEnvi, Aviesan et Athena sont parmi les institutions les mieux placées pour organiser ce débat et favoriser son appropriation par les organismes de recherche et établissements d'enseignement supérieur. Ces débats doivent bien entendu se dérouler en étroite collaboration avec les parties prenantes de ces enjeux (industriels, associations, syndicats, décideurs publics). Il conviendra évidemment de s'appuyer sur les travaux passés et notamment la charte de l'expertise de 2010 mais ils doivent être largement complétés.

5 Enjeux des risques pour le Sud

L'impact des risques naturels et anthropiques est potentiellement plus fort dans les pays en développement. La faiblesse structurelle de ces pays et leurs bases de ressources étroites limitent leur réactivité devant les aléas naturels et anthropiques. De plus, leur vulnérabilité ne tient pas uniquement à des facteurs socio-économiques, mais également aux contextes physiques, écologiques et climatiques dans lesquels se développent ces pays.

Aujourd'hui, le rattrapage économique des pays du Sud et la forte croissance démographique qu'ils connaissent contribuent à la dégradation de l'environnement local mais aussi planétaire. Le mode de développement des pays du Nord, s'il devait être pris comme modèle, ne pourrait conduire qu'à une crise environnementale majeure.

Dans ce contexte globalisé, il n'y a pas de problème spécifique aux pays en voie de développement, car nous sommes tous concernés par les grands enjeux liés au réchauffement climatique, à l'érosion de la biodiversité, aux polluants persistants, à la crise énergétique, etc. Nous pouvons cependant identifier certaines voies de recherche qui abordent des thèmes prioritaires pour ces pays. De plus, certains sujets de recherche trouvent au Sud des terrains spécifiques permettant des approches originales, les réponses à des problèmes du Nord pouvant être trouvées au Sud.

Au moment où les pays industrialisés prennent conscience de l'importance de l'environnement global, le Sud revendique plus clairement sa place dans le développement. Il faut en faire une opportunité pour trouver le nouvel équilibre planétaire en s'appuyant sur une démarche de prise de décision basée sur des données scientifiques échangées et partagées.

5.1 Risques naturels telluriques et météorologiques

De nombreux pays du Sud, et avec eux la plupart des mégaloïles du Sud, sont situés dans des régions du monde soumises à un fort aléa tellurique. Ceci est en partie lié au fait que le développement des grandes villes est conditionné par l'existence de ressources importantes, en particulier des ressources en eau. Or la présence de telles ressources est souvent conditionnée par l'existence de reliefs, et ces reliefs sont généralement la manifestation de phénomènes telluriques majeurs (mouvements des failles sismogènes sur le long-terme, activité volcanique, grands effondrements gravitaires). La plupart des mégaloïles du Sud se sont ainsi développées à proximité de grandes failles sismogènes, en particulier des zones de subduction, ou de volcans actifs (exemple : Alger, Istanbul, Téhéran, Jakarta, Yogyakarta, Mexico City, Lima, Quito, Goma, Santiago...). Les risques encourus

sont ainsi considérables, car ils résultent de la combinaison d'un aléa particulièrement élevé (sources de l'aléa de grandes dimensions) et d'une vulnérabilité des populations et environnements particulièrement forte (densité de population, infrastructures sans normes spécifiques, faiblesse des moyens, manque d'éducation/information, etc.). Une attention particulière devra donc être portée aux aléas et risques telluriques dans les pays du Sud, afin de contribuer au développement d'une prévention plus efficace. Il est à noter que les processus telluriques se produisant dans les pays du Sud étant généralement rapides et de grande échelle, leur étude apporte un éclairage unique sur leur fonctionnement, transposable ensuite aux régions du monde à risque plus modéré.

De nombreuses population des pays du Sud sont également soumises à des risques météorologiques, soit que les zones concernées soient particulièrement exposées aux tempêtes, cyclones, sécheresses, etc, soit du fait des modifications du climat et de leur influence sur les phénomènes extrêmes. Ces aléas se couplent le plus souvent, comme pour les risques telluriques, à une vulnérabilité accrue faute de réglementation approprié, de sensibilisation aux risques ou du fait de la densité de population et de la pauvreté. Ces enjeux particuliers doivent faire l'objet de recherches spécifiques, y compris, et surtout en dehors des périodes de grandes catastrophes.

5.2 Agriculture, sols, forêts, eau

Dans de nombreux pays en développement, l'agriculture est essentielle à la subsistance et participe significativement aux exportations. L'amélioration des capacités pour la santé animale et des plantes détermine l'adaptation des populations locales aux nouveaux contextes et participe au développement. L'extension de l'agriculture, surtout dans les pays du Sud et souvent au-delà des besoins des populations locales, engendre des pressions fortes, et parfois des conflits, en lien avec les questions environnementales et sanitaires et la reconnaissance des biens publics environnementaux. Les discussions actuelles concernent les relations entre écosystèmes naturels et agriculture, le maintien de zones protégées à forte biodiversité et le développement agricole auquel peuvent aspirer les sociétés des Suds et les risques sanitaires associés tant pour les plantes cultivées, les animaux d'élevage que pour l'humain. L'une des questions centrales qui y est attachée concerne celle du développement durable des sociétés des Suds, du développement d'une agriculture raisonnée prenant mieux en compte ces multi-facettes allant de la sécurité sanitaire et alimentaire au bien-être des populations et au développement de leurs sociétés.

La déforestation, la dégradation des sols et la désertification sont des problèmes majeurs des pays en voie de développement comme des pays émergents. L'expansion démographique, l'industrialisation de l'agriculture, le besoin en agro-carburants participent à ces phénomènes. Ce problème est particulièrement important dans les pays du Sud qui abritent les grandes forêts tropicales dont l'intérêt planétaire est évident.

Les risques environnementaux liés à la disponibilité et à la qualité de l'eau pour l'agriculture comme pour les populations sont des enjeux de premier plan. L'amélioration de la gestion de la ressource, la connaissance et la prise en compte des aléas naturels, l'identification des risques sanitaires sont des facteurs essentiels pour la sécurité des populations.

5.3 La ville et l'industrie

L'étude des risques associés au développement des méga-cités doit nous aider à anticiper les crises environnementales liées à des aléas naturels ou anthropiques. A côté de ces aléas, ces villes génèrent des « menaces » au travers d'expositions chroniques de millions de personnes à des agents physiques, chimiques ou biologiques. Ces menaces s'ajoutent souvent à des problèmes économiques et sociaux qu'elles viennent renforcer.

L'exploitation des matières premières est historiquement une source importante de revenus pour les pays du Sud. Ces pays sont souvent économiquement dépendants de ces activités et parfois structurellement faibles pour gérer leurs conséquences environnementales. Ces activités très polluantes sont associées à des risques environnementaux et sanitaires trop peu étudiés dans les pays du Sud, et la mise en place de solutions adaptées donc coûteuses n'est bien souvent envisagée que dans les pays à hauts revenus.

5.4 Maladies infectieuses émergentes (MIE)

Ce point a été abordé dans le chapitre sur les risques biologiques page 14, nous ne répéterons donc pas l'argumentaire. Il va de soi que les régions du Sud étant fortement exposées et vulnérables aux maladies infectieuses et parasitaires les risques de maladies infectieuses émergentes y sont particulièrement importants.

6 Pour un agenda stratégique de recherche sur les risques

Un des intérêts du domaine des risques réside dans sa transversalité qui permet d'aborder un grand nombre des effets anthropiques sur l'environnement et la santé. Dès lors qu'on prend en compte des risques accidentels ou chroniques, d'origine naturelle ou anthropique, ce champ recouvre en partie beaucoup de domaines d'autres groupes thématiques d'AllEnvi. Citons sans exhaustivité : le climat pour les interactions du changement climatique avec les risques naturels, la biodiversité pour les effets anthropiques sur la biodiversité, l'eau pour tous les risques qui menacent la qualité de l'eau, l'abondance de la ressource et pour les risques hydrologiques, les sols soumis à de nombreuses pressions souvent insidieuses et bien d'autres.

Comme nous l'évoquons dans le présent document, les risques constituent également un enjeu social majeur source de nombreuses craintes au sein des populations exposées. Une bonne gestion des risques et surtout une capacité d'évaluation et d'anticipation sont des clés trop souvent méprisées d'un développement économique rationnel et solide. Beaucoup d'innovations technologiques échouent faute d'une bonne évaluation des risques et ce pour deux raisons, soit parce qu'un risque non anticipé apparaît qui oblige à retirer la technologie du marché, soit du fait d'une méfiance sociale liée à la légèreté du dossier d'évaluation des risques.

La construction détaillée de l'ensemble de questionnements scientifiques qui fonde le grand domaine scientifique des risques est le produit du travail collectif du groupe thématique. Il se présente sous la forme de questions de recherche en lien avec les différents chapitres du présent document. Cette partie se termine par une série de recommandations concernant l'expertise et l'appui scientifique à la gestion des risques, ces éléments ne sont pas à proprement parler des questions de recherche même si elles peuvent faire l'objet de recherches en sciences sociales. En tout état de cause, elles concernent la plupart des organismes membres d'AllEnvi, du fait notamment de leur caractère finalisé et de leur lien avec les politiques publiques.

Les risques spécifiques aux pays du sud font l'objet d'un chapitre spécifique (Cf chapitre 5 page 59), la plupart des questions de recherche ne sont pas intrinsèquement spécifiques aussi n'avons-nous pas répété les éléments de ce chapitre. Il n'en reste pas moins que pour diverses raisons le groupe thématique recommande de systématiquement considérer les enjeux au sud dans la construction des agendas et programmes de recherche.

6.1 Recherches prioritaires pour les risques anthropiques

6.1.1 Risques liés aux substances toxiques

- Établir des liens entre ce qui est observable au niveau macroscopique et les mécanismes sous-jacents en intégrant des approches biogéochimique, épidémiologique et écologique. Par une démarche « bottom-up », traiter le problème du niveau pertinent d'organisation moléculaire, biologique et écologique à prendre en compte, tant pour la compréhension que pour la prédiction de la réponse intégrée de la cellule à l'écosystème.
- Proposer des méthodes de type « top-down » basées sur l'éco-épidémiologie et l'épidémiologie afin de mettre en évidence des relations de causalité entre les forçages environnementaux, dont les contaminants aux faibles doses, et l'évolution spatiale et temporelle des populations humaines, les perturbations de la structure et du fonctionnement des communautés et des écosystèmes et la diversité génétique et fonctionnelle des communautés.
- Dans le domaine de l'éco-épidémiologie, et de l'épidémiologie identifier des indicateurs d'effet à long terme observables en population et communauté réelle ou modèle. Définir des cohortes et travailler les méthodologies pour suivre des populations de référence. Proposer la création de bio-banques pérennes pour la collecte et la conservation d'échantillons environnementaux afin d'archiver un témoin de référence des conditions environnementales passées pour y revenir lorsque de nouvelles techniques d'analyse seront développées. Favoriser les inter-comparaisons entre populations distinctes par la participation à des réseaux internationaux de cohortes.
- Promouvoir l'étude des relations de causalité entre facteurs de stress chimique, biologique et physique) et conséquences de l'exposition à ces facteurs. Favoriser les approches intégrées pour comprendre et modéliser les interactions entre substances chimiques et organismes vivants.
- Promouvoir l'étude de la physiologie d'organismes clés des écosystèmes autres que les espèces modèles classiquement étudiées.
- Progresser dans la compréhension du mécanisme d'action des perturbateurs endocriniens. Les PE ont un mécanisme d'action original, même s'il ne leur est pas spécifique, puisqu'ils interfèrent avec les mécanismes physiologiques et entraînent ainsi une toxicité. C'est sans doute ce qui explique des profils de dose-effet inhabituels. Dans ce sens, ils inaugurent un nouveau type de mécanisme par perturbation et sont des modèles pour certaines classes de toxiques.
- Coupler la spéciation des substances avec leurs réactivités chimique et biologique incluant les réactions biotiques agissant sur la spéciation, la production et la dégradation de substances et les transferts directs et indirects au sein des réseaux trophiques.

- Développer une méthodologie pour prioriser les substances à considérer selon des critères issus de l'expologie en y intégrant la variabilité spatiale et temporelle des niveaux de concentration, la spéciation physique (de dissous à nano-matériaux) et chimiques (état rédox, isotopie, complexes minéraux, organiques...), le comportement biogéochimique (flux, rémanence), l'importance environnementale et la biodisponibilité des substances.
- Développer des méthodes d'analyse élargissant la gamme des molécules quantifiables parmi celles susceptibles d'être présentes dans diverses matrices (composés macromoléculaires, métabolites et produits de dégradation, polluants émergents, colloïdes, nano-matériaux...). Ces méthodes d'analyse d'impact sur le vivant de ces substances et de leurs métabolites devront permettre de quantifier les substances à des teneurs susceptibles d'effets dans l'environnement. Elles incluront les pollutions multiples minérales et organiques.
- Développer l'étude du stress multiple, incluant les interactions entre contaminants chimiques (métalliques et organiques), contaminants biologiques (agents pathogènes bactériens ou viraux, parasites, toxines) et facteurs du milieu (température, oxygénation des eaux par exemple, notamment en lien avec le réchauffement climatique global). Ces développements sont nécessaires à la définition des interactions entre facteurs (synergie, antagonisme ou simple effet additif) et à la caractérisation des capacités d'adaptation des organismes qui y sont soumis. La vulnérabilité des espèces peut ainsi être fortement modulée selon la nature, l'intensité et la répétition des stress subis. Ces études sont forcément très complexes, elles s'attacheront à évaluer les effets de stress multiples dans des conditions réalistes sur le plan des multiexpositions environnementales.

6.1.2 Risques biologiques et les maladies infectieuses émergentes

- Améliorer la définition des hypothèses sous-jacentes à l'évaluation des risques.
- Évaluer la stabilité des transgènes dans l'environnement, les mécanismes sous-jacents et de leur probabilité de transfert à d'autres organismes (incluant le potentiel de mobilité ou de recombinaison génétique lié notamment à la présence de transposons, de séquences d'insertion et d'autres éléments génétiques mobiles).
- Évaluer le rôle de la sélection naturelle dans le maintien et la stabilité du matériel génétique introduit et la persistance dans l'environnement.
- Étudier la compétition entre OGM ou 'organismes synthétiques' et espèces 'sauvages', en particulier avec les espèces protégées.
- Explorer les effets directs ou indirects sur la biodiversité des espèces cultivées et sauvages (pollution génétique, disparition de variétés 'traditionnelles'...).
- Évaluer les conséquences écologiques et socio-économiques (impact sur les services écosystémiques, dépendance structurelle/firmes, biopiratage...).

- Estimer l'impact des OGM sur la santé des consommateurs via une consommation directe ou la consommation d'animaux élevés avec une nourriture OGM.
- Définir les conditions d'une coexistence éventuelle des cultures OGM et non OGM (voir les conclusions du projet européen Co-Extra : grandes distances d'isolement conduisant éventuellement à la définition de zones de productions dédiées les unes aux OGM, les autres aux non-OGM, nécessité d'une réorganisation des filières).
- Explorer les limites scientifiques et psycho-sociologiques de l'ingénierie du vivant, perception sociale du risque biologique.
- Améliorer le confinement « physique » et « biologique » (incapacité à se reproduire de façon autonome dans l'environnement) pour la sûreté des recherches en biologie synthétique.
- Comprendre les processus d'acquisition de nouvelles fonctions biologiques et de stabilité génétique des organismes synthétisés.
- Assurer la réversibilité des usages d'OGM.
- Développer une approche écosystémique pluridisciplinaire des maladies infectieuses émergentes associant épidémiologistes, cliniciens infectiologues, microbiologistes, écologues et spécialistes des sciences humaines et sociales.
- Relier les approches de la santé humaine avec d'autres secteurs comme la santé animale, l'environnement, le commerce, l'agriculture et les services sociaux.
- Examiner les interactions entre sécurité sanitaire/sécurité alimentaire et sécurité nationale.

6.1.3 Risques sanitaires et pour les écosystèmes liés aux agents physiques non ionisants

6.1.3.1 *Bruit*

- Améliorer la connaissance des phénomènes reliant bruit et troubles du comportement.
- Élucider les effets liés aux multi-expositions au bruit (expositions cumulées) et aux expositions combinées au bruit et à d'autres sources de nuisances.
- Définir des indicateurs pertinents présentant une corrélation significative avec les effets sanitaires.

6.1.3.2 *Rayonnements non ionisants*

- Comprendre les mécanismes biophysiques qui pourraient expliquer les effets des champs environnementaux de faibles puissances à l'appui d'un rapport causal possible entre le cancer et l'exposition. Développer des méthodes et des modèles améliorés *in vitro* et *in vivo* pour étudier les effets de ces champs électromagnétiques basses fréquences.

- Déterminer les seuils d'exposition aux radiofréquences pour différentes pathologies, les effets sur la reproduction ou sur les pathologies neuro-dégénératives.
- Elucider les éventuels effets biologiques et sanitaires potentiels des micro-ondes de forte puissance (MFP) ainsi que sur leurs mécanismes d'interaction avec les organismes biologiques.
- Etudier la co-exposition à long terme avec d'autres facteurs de stress
- qui devient de plus en plus fréquente dans notre quotidien : WiFi, téléphones mobiles, TV numérique, WLAN, DECT, RFID...)

6.1.3.3 *Risques liés aux particules fines*

- Analyser la composante secondaire issue d'émissions de polluants précurseurs tels que les composés organiques volatils, les oxydes d'azote ou l'ammoniac, compte tenu de la contribution pouvant être forte à la masse totale des particules observées. Cela impose des développements métrologiques afin de quantifier les phases gazeuses et particulaires ainsi que les rendement de conversion et durée de vie associées comme support à des études de processus réactionnels.
- Etudier la physico-chimie des particules ultrafines et des nanoparticules ainsi que leurs évolutions dans le temps et l'espace. La caractérisation de leurs origines et leur devenir, leur effets sur la pollution gazeuse, la caractérisation et la compréhension des effets aigus et chroniques des particules ainsi que les éventuelles synergies (cf. augmentation du pouvoir allergène de particules en présence d'ozone). Cela passe notamment par une réflexion sur la métrique la plus adaptée à des études dose-effet (masse, nombre, surface spécifique, taille, solubilité, forme...).
- Quantifier la contribution d'émissions naturelles et anthropiques de particules, notamment telluriques. Plus précisément, au-delà de son intérêt du point de vue réglementaire (puisque les épisodes de poussières telluriques peuvent provoquer des dépassements de seuils réglementaires de concentrations en particules), la prévision du transport des poussières telluriques présente un intérêt du point de vue sanitaire. Les particules sont suspectées d'être des vecteurs de virus, champignons et bactéries. De nombreuses publications (Kuehn, 2006) attestent du transport de certains micro-organismes pathogènes du Sahara vers la zone Caraïbe et les États-Unis suivant le parcours des poussières désertiques.
- Quantifier les émissions de nitrates afin de mieux définir la contribution locale/régionale/globale et donc de mettre en place des mesures de limitations adaptées (plafond d'émission d'une région fortement contributrice en fonction de la dynamique atmosphérique afin de réduire son impact régional ou national).

- la quantification de l'exposition des populations passe par celle de la contribution de chaque source sur l'exposition. Pour ce faire, des travaux doivent être engagés sur le développement de nouveaux moyens de mesures portatifs miniaturisés, autorisant des prélèvements sur des personnes ou des mesures dans l'air intérieur.

6.1.3.4 Risques liés aux nanomatériaux

- Développer l'instrumentation et les méthodes de mesure spécifiques à chaque type de nanoparticule.
- Abaisser les limites de détection et développer des systèmes normatifs de concentrations ou d'indicateurs d'activités biologiques limites.
- Aborder les effets toxiques à long terme, avec des modèles d'exposition chronique à faibles doses.
- Mettre au point les outils d'étude du cycle de vie des nanomatériaux manufacturés.
- Inclure les nanoparticules dans les études sur les risques multiples (combinaison entre risque nano et risque électromagnétique, entre nano et risque chimique...).

6.1.3.5 Risques liés à la dissémination de déchets macroscopiques dans le milieu marin

- Établir un inventaire de la distribution marine et la caractérisation des macro et microplastiques dans les différents compartiments de l'écosystème marin et une identification des polymères et des contaminants associés.
- Quantifier le comportement de ces particules dans l'environnement et les réseaux trophiques avec une attention particulière à leurs compartiments benthiques et pélagiques.
- Décrire les effets des déchets plastiques dans le réseau trophique, en termes de perturbations tant physique que chimique.

6.1.4 Risques liés à l'exploitation des ressources naturelles

6.1.4.1 Exploitation des gaz et huile de roche-mère (GHRM)

- Approfondir les techniques alternatives à la fracturation hydraulique, qu'il s'agisse de changer de fluide ou de technique (par exemple : fracturation électrique, nouvelle technique de forage, tubage, scellement...)
- Évaluer les ressources d'hydrocarbures non conventionnels disponibles en France (analyse des données disponibles sur des forages déjà réalisées, nouvelles investigations géophysiques, nouveaux forages avec diagaphies et caractérisation des terrains...).
- Évaluer objectivement les risques environnementaux et sanitaires liés à l'exploitation de GHRM, fondée sur une cartographie précise des risques y compris pour les méthodes alter-

natives. Cette évaluation s'appuiera sur une rétro-analyse des données disponibles à l'étranger tout en intégrant les spécificités du contexte français.

- Évaluer l'impact en termes de GES à partir d'une analyse complète du cycle de vie quelle que soit la technique d'exploitation employée.
- Comprendre les risques de sismicité induite (Peut-on prévoir ou contrôler la sismicité induite ?).
- Prévoir (modélisation, monitoring) l'initiation et la propagation des fractures dans les roches-mères et leur impact sur l'équilibre hydrogéochimique du milieu naturel.
- Développer des collaborations internationales et analyse des retours d'expérience des pays étrangers d'un point de vue technico-scientifique, socio-économique et réglementaire.

Certaines de ces recommandations nécessiteront de passer par des études en laboratoire, des pilotes *in situ*, voire des pilotes pré-industriels, des outils de modélisation ou de simulation renforcée ou du développement de nouveaux outils de surveillance et de contrôle. Dans toutes ces recherches, il convient comme toujours de distinguer le connu, l'inconnu et l'incertain.

6.1.4.2 Exploitation des ressources minérales marines profondes

- Mieux comprendre le fonctionnement des systèmes géodynamiques actifs qui contrôlent la circulation des fluides, leur variabilité dans l'espace et le temps et les grands cycles géochimiques de mobilisation, transport et concentration des éléments à l'origine de la formation des minéralisations.
- Évaluer les services qu'assurent ces milieux et ces écosystèmes et mieux connaître l'état de ces milieux et de ces écosystèmes ainsi que leurs capacités de restauration et de résilience.
- Évaluer les éventuels risques naturels amplifiés ou suscités par l'exploitation (mouvement de terrain et autres risques telluriques).
- Évaluer les effets potentiels à court, moyen et long termes de l'exploitation sur les écosystèmes et les milieux, tant à proximité des gisements qu'à plus grande distance. et définir les différentes options pour les préserver au cours de différentes phases d'exploitation et aux différentes échelles.

6.1.4.3 Exploitation des hydrates de méthane

- Comprendre la dynamique des hydrates de gaz et leur comportement hydromécanique à l'origine du risque important de grands glissements sous-marins.
- Mieux connaître la dynamique temporelle, car tous les processus fond de mer liés aux hydrates et aux circulations des fluides, comme les pockmarks et les suintements froids, ne sont pas forcément catastrophiques et peuvent être étalés le temps comme le montrent des résultats récents.

- Modéliser les processus liés aux hydrates de méthane et observer les sites et mesurer in situ via des observatoires fond de mer afin d'acquérir des séries temporelles sur leur dynamique spatio-temporel.

6.2 Risques Naturels

La prévision des grandes catastrophes passe par l'évaluation des maillons faibles d'un système par rapport à une agression externe : l'événement, ou une dégradation interne liée à l'occurrence de l'événement.

L'estimation du risque dépend d'une multitude de paramètres (voir section Méthodologie de l'évaluation des risques page 41), mais le tout premier est une bonne connaissance de l'aléa responsable de ce risque. Cette connaissance comprend deux aspects : 1) la connaissance et la compréhension de l'ensemble des processus contribuant à l'aléa et de leur fonctionnement ; 2) l'identification et la quantification des paramètres de l'aléa ayant le plus fort impact sur le risque.

6.2.1 Connaître les différents aléas et risques naturels et les enjeux sociaux et environnementaux

- Comprendre l'origine, la nature, le fonctionnement, la période de retour, etc, des phénomènes pour en comprendre le déroulement complet, depuis les processus à l'origine de ces événements jusqu'au déroulement précis de ces événements incluant l'estimation de leur 'taille' et de leur lieu et moment d'occurrence.
- Évaluer les maillons faibles des systèmes par rapport à une agression externe : l'événement, ou une dégradation interne liée à l'occurrence de l'événement en vue de la prévision des grandes catastrophes.

6.2.2 Évaluer les paramètres déterminants de l'aléa pour mieux contraindre le risque

- Étudier les processus de grande échelle susceptibles d'être à l'origine des événements (ex : processus telluriques, collisions extraterrestres).
- Développer des modèles basés sur la physique et appuyés sur les observations, simulant le déclenchement, le fonctionnement, et l'évolution des processus. L'obtention de tels modèles physiques vise notamment à définir les amplitudes et les temps d'occurrence des aléas et devrait ainsi permettre une anticipation plus fiable des événements à venir.
- Étudier les structures responsables de l'occurrence des événements (ex : les failles sismogènes pour les séismes).
- Caractériser l'ensemble des paramètres des milieux et des contextes dans lesquels se produisent les événements. Rechercher les informations sur les événements passés 'similaires', sur les plus longues échelles de temps possibles.

- Observer de façon continue, à forte densité et haute-résolution les processus préparatoires, participant à, et suivant un événement donné (voir section 2.4 page 33).
- Améliorer la quantification de l'incertitude aléatoire sur les observations décrivant processus et systèmes. Quantifier et réduire l'incertitude épistémique sur les observations et modèles décrivant processus et systèmes (cf section 3.2 page 42).
- Développer des modèles physiques simulant la succession et l'interaction dans le temps et l'espace de différents aléas et quantifiant leurs impacts instantanés et cumulés sur les systèmes exposés (eg; séquence de séismes volcaniques dommageurs pour le bâti qui sera fragilisé avant même d'être soumis à une séquence de retombées de cendres occasionnant une charge pondérale (effet de la pression statique), avant que des écoulements pyroclastiques (ie nuées ardentes) ne viennent impacter ces bâtiments (effets de la température, pression dynamique, missiles).

6.2.3 Amélioration des méthodes d'observation intégrées pour une meilleure connaissance des aléas et risques d'origine naturelle

- Proposer des stratégies et des méthodes de collecte, d'archivage et d'intégration des multi-données documentant les aléas et les risques naturels. La définition des échelles d'observation, la complémentarité des méthodes et les outils d'interprétation des données multi-sources devront faire l'objet d'une attention particulière.
- Développer des approches combinant observation et modélisation déterministe et probabiliste, via l'assimilation de données, afin d'enrichir considérablement la compréhension des processus qui gouvernent la dynamique des risques naturels. Elle est déjà à la base des systèmes de suivi et de prévision de l'atmosphère et des océans.
- Utiliser des approches de type 'site pilote' multi-méthodes et multi-données sur un aléa particulier pour construire les bases empiriques solides nécessaires au développement et à la validation des modèles physiques et prédictifs.
- Mettre en place des approches de type 'méga site d'expérimentation', multi-aléa et multi-risque pour fédérer et donc renforcer les actions d'estimation des aléas et des risques. A titre d'exemple, la zone méditerranéenne est le site de nombreux risques naturels, et présente des enjeux sociétaux, économiques, politiques et environnementaux importants.
- Prolonger le soutien des organismes d'AllEnvi au programme pluri-organisme Mistrals, dont la partie expérimentale est déjà bien engagée avec des premiers succès, mais aussi le programme EPOS et MED-SUV financés par l'UE, tout comme les recherches en régions d'outre-mer (surtout Antilles et Réunion) très concernées par les aléas géologiques, et les projets d'infrastructure nationale pour l'étude des aléas telluriques tels Resif à terre et Emso en domaine marin.

- Renforcer les programmes permettant une réelle compréhension d'objets géologiques complexes tels qu'une zone de subduction source de sismicité et de volcanisme dans une espace donné caractérisé par une multiplicité d'enjeux vulnérables (e.g. Antilles).

6.2.4 Impact des changements globaux sur les risques d'origine naturelle

- Intégrer des méthodes de changement d'échelles (downscaling), mais aussi prendre en compte les non-stationnarités spatiales et temporelles dues aux rétroactions de l'activité humaine sur certains aléas (effets anthropiques sur l'aléa), et enfin proposer des méthodes d'évaluation de l'impact de ces changements globaux en termes de modification des risques.
- Développer la connaissance de la dynamique temporelle du phénomène de dégazage de méthane des hydrates de gaz (à terre sous le pergélisol ou en mer sur les marges) et le modéliser afin de prévoir le devenir de ce phénomène à l'échelle des très grandes surfaces concernées sur la planète (haut de pente sur beaucoup de marges océaniques et zones polaires).

6.2.5 Protection du patrimoine culturel face aux risques d'origine naturelle

- Établir une typologie pour les monuments historiques afin de déterminer les types d'aléas les menaçant et les facteurs majeurs de leur vulnérabilité.
- Proposer des méthodes pour quantifier cette vulnérabilité (ex : développement de courbes de fragilité). L'efficacité des méthodes développées implique de les valider par des études de cas.

6.2.6 Protection des installations industrielles face aux risques d'origine naturelle (Na-Tech)

- Mettre en place des programmes internationaux pluridisciplinaires avec les industriels concernés (industrie aéronautique, industrie chimique, industrie nucléaire...) afin de modéliser les aléas concernés, anticiper les événements attendus, mettre en place les systèmes d'alerte et préparer la gestion des crises.

6.2.7 Évaluation de l'impact de la prévention sur la réduction du coût des risques d'origine naturelle

- Étudier et améliorer les méthodes d'analyse coût-bénéfice et méthodes multicritères existantes à travers le monde, afin d'évaluer les coûts directs et indirects, ainsi que l'impact économique des mesures de réduction.
- Identifier des données nécessaires à l'évaluation économique des risques et l'estimation des incertitudes associées en fonction des durées considérées.

6.3 Méthodologie de l'évaluation des risques

- Développer des méthodes de modélisation et de simulation en intégrant, à plusieurs échelles de temps, la dynamique des systèmes et les capacités d'adaptation.
- Évaluer la vulnérabilité systémique des infrastructures ainsi que des réseaux et des organisations face aux aléas naturels.
- Développer les approches de la vulnérabilité intégrant les interactions et les synergies entre les éléments des systèmes et proposer sur cette base des méthodes efficaces de réduction de risque.
- Utiliser les nouvelles méthodes de traitement des incertitudes (probabilités imprécises, théories des évidences, théorie des possibilités, statistiques Bayésiennes, etc.) dans les pratiques actuelles d'analyse de risques, d'expertise, d'aide à la décision, de communication sur les risques.
- Définir un cadre rigoureux pour le traitement de l'incertitude aléatoire et épistémique dans les analyses de risques dans le but de mettre en place une métrique unique du risque, vue de manière général comme le triplet (événement ; conséquence ; incertitude).
- Mettre en œuvre des méthodes et outils de recherche adaptés au changement d'échelle et à une vision intégrée de l'(éco)épidémiologie et l'(éco)toxicologie afin d'améliorer l'appréciation des expositions, la connaissance des risques liés aux expositions faibles, aux expositions anciennes et chroniques, et la prise en compte des variabilités spatio-temporelles des expositions.
- Quantification et réduction des incertitudes par rétro-analyse d'événements passés par des modélisations déterministes afin de calibrer les paramètres des modèles et de quantifier l'incertitude épistémique. Quantification de l'incertitude aléatoire en procédant à une modélisation stochastique de l'aléa.
- Développer des méthodes de changement d'échelles (downscaling) et de prise en compte des non-stationnarités spatiales et temporelles dues aux rétroactions de l'activité humaine sur certains aléas (effets anthropiques sur l'aléa), afin d'évaluer l'impact des changements globaux (climat, occupation des sols, vulnérabilité...) en termes de modification des risques d'origine naturelle.
- Développement de modèles multi-physiques et multi-échelles (temps, espace) à caractère prédictif, permettant la simulation des interactions et interfaces entre les systèmes naturels et anthropisés, ainsi que l'évaluation des conséquences d'événements en cascade ou conjoints.
- Étudier et améliorer les méthodes d'analyse existantes à travers le monde, pour évaluer les coûts directs et indirects, ainsi que l'impact économique des mesures de prévention et de ré-

duction des risques. La recherche devra intégrer l'identification des données nécessaires et l'estimation des incertitudes associées en fonction des durées considérées.

- Développer des programmes de recherche interdisciplinaires et internationaux, pour fédérer et renforcer nos actions d'estimation des aléas et des risques.
- Développer des méthodes de modélisation et de simulation de la vulnérabilité des socio-systèmes confrontés à des aléas naturels ou anthropiques, en intégrant, à plusieurs échelles de temps, la dynamique de ces systèmes et leurs capacités d'adaptation. On visera notamment à quantifier au mieux la fragilité des systèmes considérés, en intégrant les pertes directes et indirectes, et également à développer des approches de la vulnérabilité intégrant les interactions et les synergies entre les différents éléments constitutifs des systèmes et plus globalement entre les systèmes.

6.4 Aborder résolument la dimension sociale des risques

- Comprendre le rôle des pratiques et des comportements. Cela est important pour comprendre l'influence des acteurs sur leur propre exposition. Les contraintes psychologiques, économiques et sociales qui induisent ces comportements, les dynamiques collectives et l'appréhension par les acteurs des situations méritent d'être étudiées.
- Analyser les mécanismes de la perception des risques et ses liens avec les différentes composantes comme l'aléa, la vulnérabilité, la chronicité, l'importance des facteurs anthropiques, le bénéfice collectif et individuel, la préservation du bien commun, le niveau d'information, les enjeux culturels ou religieux.
- Éclaircir les relations entre la recherche et les différentes institutions qui gèrent les questions de risque. Comprendre comment les savoirs sont produits, par qui et comment ils sont transmis. Étudier comment les attentes des citoyens sont écoutées et prises en compte. Analyser les bases des décisions, leurs motivations et leurs efficacités. Rechercher quels sont les impacts des relations avec le secteur privé et les questions de conflits d'intérêts.
- Analyser l'histoire des crises et des grandes évolutions : quelles leçons peut-on en tirer ? Inférer les changements sur la gestion des crises suivantes.
- Analyser la part éventuelle des substances toxiques dans l'accroissement des inégalités écologiques, préciser les voies d'exposition et proposer des moyens de remédier à une inégalité environnementale qui s'ajoute aux inégalités économiques et sociales.
- Comprendre les phénomènes sous-jacents et concevoir des outils de régulation environnementale qui a minima n'accroissent pas les inégalités. Proposer des stratégies intégrées de gouvernance des risques tenant compte des enjeux économiques, environnementaux et sociaux.

6.5 Développer l'expertise pour une meilleure gestion des risques

Le groupe thématique suggère les éléments suivants pour structurer les débats :

- Prendre en compte un nombre suffisant de cas divers pour construire une doctrine stable qui se garde notamment de varier en fonction de la dernière crise³⁸ de l'actualité.
- Expliciter le principe de séparation de l'expertise et de la décision en montrant comment la science peut éclairer divers scénarios et hypothèses sans entrer dans une logique de recommandation.
- Éclaircir les enjeux de transparence en précisant les limites de la confidentialité et le rôle des établissements publics en matière d'alerte environnemental et sanitaire.
- Construire des méthodologies de communication et de formation qui permettent de faire comprendre la notion de risque, de danger, de probabilité et de possibilité au plus grand nombre.
- Analyser précisément les conditions qui permettent de protéger réellement les lanceurs d'alertes et de respecter les points de vue minoritaires tout en garantissant un haut niveau scientifique à l'expertise.
- Proposer des dispositions concrètes pour élargir les groupes d'experts sur le plan de l'interdisciplinarité et de la prise en compte des enjeux sociaux.
- Organiser la présence des scientifiques pour l'appui aux pouvoirs publics dans la gestion des urgences.
- Développer une doctrine sur la manière de prendre en compte le point de vue des industriels sans que cela biaise l'évaluation des risques.
- Mettre en place des dispositions pour que le financement industriel ou la prise d'intérêt en matière de valorisation de la recherche n'obère pas l'indépendance des organismes publics.

La réponse à ces questions, si elle est certainement un produit du débat, est également un enjeu de recherche en sciences du risque, de la communication, de la décision et du droit. L'expertise est elle-même un objet de recherche pluridisciplinaire. Ces questions devraient être abordées dans les programmes de recherche des agences de financement de la recherche, des ministères concernés et des organismes.

³⁸ Les exemples montrent que l'on peut passer d'un excès de précaution à la dénonciation de celle-ci en fonction de la réalisation ou non d'un aléa dans les mois qui précèdent.

Conclusions

Les risques sont des phénomènes multiples qu'il est possible de lire avec une vision commune qui identifie l'aléa et la vulnérabilité comme deux composantes fortes et indissociables. Leur caractère aléatoire, la grande incertitude qui s'attache à leur évaluation et l'ampleur des conséquences possibles sont les causes d'une inquiétude sociale forte. Cette inquiétude est renforcée par des pratiques passées de gouvernance qui ont écarté les populations de la gestion des risques ou pire ont masqué les problèmes, alors même que des décideurs les connaissaient. Aujourd'hui l'ensemble du domaine du risque constitue un champ de recherche actif mais encore peu intégré. Le renforcement de ces recherches, rendu nécessaire par une exigence sociale accrue en matière de sécurité et de transparence gagnerait à s'accompagner d'une vision holistique qui mobilise toutes les disciplines concernées. La science des risques est étroitement liée à l'expertise sur les risques, le tout se situant en proximité, mais de façon distincte, de la décision. Les nombreuses crises récentes, la complexité des relations entre la science et la société et l'évolution de l'arsenal législatif dans le domaine militent pour une nouvelle réflexion sur l'expertise. Cette réflexion pourrait utilement être organisée par les alliances.

Cette vision intégrée des risques milite pour que la recherche soit également intégrée. Ainsi, le groupe thématique « Risques naturels et écotoxiques » d'AllEnvi, propose-t-il que l'alliance interagisse avec l'ANR pour qu'un programme risque soit mis en place afin d'aborder l'ensemble des problématiques de risque mais également l'ensemble des aspects méthodologiques communs au monde du risque.

Annexe : Liste des membres du Groupe Thématique 9 - Risques environnementaux, naturels et écotoxiques

Nom	Prénom	Orga-nisme	Spécialité	Adresse
Arimone	Yannick	Andra	Epidémiologie et santé publique	Yannick.Arimone@andra.fr
Bard	Pierre-Yves	Ifsttar	Risque sismique	Pierre-yves.bard@lcpc.fr
Baudrimont	Magalie	CPU	Ecotoxicologie des métaux et nano-particules métalliques en milieu aquatique : mécanismes de bioaccumulation, de détoxification et d'impacts toxiques au niveau cellulaire et moléculaire chez les bivalves et les poissons.	m.baudrimont@epoc.u-bordeaux1.fr
Bernard	Cécile	MNHN	Ecotoxicologie, biodiversité, écologie microbienne	cbernard@mnhn.fr
Brun	Eric	Météo-France	Risques naturels, cryosphère, avalanches, crues, prévision expertisée	eric.brun@meteo.fr
Caquet	Thierry	Inra	Ecotoxicologie aquatique Ecologie de la santé	Thierry.Caquet@rennes.inra.fr
Cattan	Philippe	Cirad		philippe.cattan@cirad.fr
Cochonat	Pierre	Ifremer	Géologie sédimentaire	pierre.cochonat@ifremer.fr
Cot	Michel	IRD et Aviesan	Médecin, Epidémiologiste	michel.cot@ird.fr
Cren	Cécile	CNRS	Chimie analytique et applications en environnement	c.cren@sca.cnrs.fr
Darmendrail	Dominique	BRGM	Géochimie, comportement des polluants dans les sols contaminés, réglementation et directives sur les sites et sols pollués	d.darmendrail@brgm.fr
Duluc	Claire-Marie	IRSN	Aléas hydrométéorologiques, inondation	claire-marie.duluc@irsn.fr
Flammarion	Patrick	Irstea	Ecotoxicologie, politiques de l'eau et de l'environnement	patrick.flammarion@irstea.fr
Foerster	Evelyne	BRGM	Risques géotechniques, sismiques ; Hydromécanique des sols/roches ; vulnérabilité des infrastructures bâties	e.foerster@brgm.fr
Gaillard	Jean-Louis	CPU		Jean-louis.gaillard@apr.aphp.fr
Gardon	Jacques	IRD	Médecin épidémiologiste	jacques.gardon@ird.fr
Garnier-Laplace	Jacqueline	IRSN	Recherche & expertise sur les risques écologiques liés aux substances radioactives. Développement de méthodes & outils en support de l'évaluation du risque radiologique sanitaire	jacqueline.garnier-laplace@irsn.fr
Ghoreychi	Mehdi	Ineris	Risques géotechnique, thermo-hydro-mécanique des roches/sols	Mehdi.ghoreychi@ineris.fr
Gillet	Germain	CPU		Germain.Gillet@univ-lyon1.fr

Nom	Prénom	Orga- nisme	Spécialité	Adresse
Guegan	Jean-François	IRD	Parasitologiste	jean-francois.guegan@ird.fr
Guilhard-Costa	Anne-Marie	CNRS	risque sanitaires, anthropologie biologique	anne-marie.guilhard-costa@evolhum.cnrs.fr
Knoery	Joël	Ifremer	Biogéochimie	joel.knoery@ifremer.fr
Komorowski	Jean-Christophe	CNRS	Volcanologie	komorow@ipgp.fr
Le Bissonnais	Yves	Inra	Qualité, érosion et dégradation des sols	lebisson@supagro.inra.fr
Legret	Michel	Ifsttar	Géochimie, pollution des eaux et des sols	Michel.legret@lcpc.fr
Manighetti	Isabelle	INSU	Sismotectonique; aléa sismique	manighetti@geoazur.unice.fr
Morand	Serge	FRB	Ecologie de la santé	Serge.morand@univ-montp2.fr
Mougin	Christian	Inra Agreenium	Ecotoxicologie des sols	Christian.Mougin@versailles.inra.fr
Quémeneur	Eric	CEA	Biochimie des protéines, toxicologie	eric.quemeneur@cea.fr
Tharreau	Didier	Cirad	Phytopathologiste	didier.tharreau@cirad.fr
Thybaud	Eric	Ineris	Ecotoxicologie et toxicologie	eric.thybaud@ineris.fr
Vignolles	Cécile	Cnes	Télé-épidémiologie (analyse des relations "climat-environnement-santé par les technologies spatiales)	cecile.vignolles@cnes.fr
Vindimian	Eric	Irstea	Toxicologie et écotoxicologie	eric.vindimian@irstea.fr

Index lexical

adaptation.....	41, 60
adaptation.....	72
aérosol.....	19
affaissement.....	30
agriculture.....	60, 61
agro-carburant.....	60
aigu.....	20, 66
aléa.....	8, 9, 29, 30, 32, 33, 37, 38, 39, 41, 42, 43, 45, 46, 48, 50, 51, 52, 59, 60, 61, 69, 70, 71, 72, 75
alerte.....	34
alimentation.....	9, 42
allergène.....	66
anthropique.....	8, 9, 10, 11, 19, 29, 30, 32, 37, 39, 41, 48, 59, 61, 66, 71
anthropique.....	8
assimilation de données.....	70
atmosphère.....	19, 33, 42, 70
avalanche.....	8
base de données.....	46
benthique.....	21
bien-être.....	60
biocide.....	51
biodiversité.....	9, 11, 42, 59, 60, 64
biologie synthétique.....	16, 17, 18
biologie synthétique.....	65
biopiratage.....	64
bruit.....	18, 65
calcin.....	39
cancer.....	18, 19, 43, 65
canicule.....	8
cartographie.....	46
catastrophe.....	29, 32, 33, 40, 46, 48, 60, 69
catastrophique.....	45
causal.....	19, 44, 45, 65
champ électromagnétique.....	18, 19, 65
changement climatique.....	37, 48
chronique.....	8, 11, 20, 43, 45, 48, 61, 66, 67, 72
citoyen.....	11, 49, 50
co-exposition.....	19, 66
concertation.....	46
confinement.....	18, 65
contaminant.....	11, 21, 44, 50, 51
coût.....	29, 40, 48, 49, 61, 71
criblage à haut débit.....	46
crise.....	11, 34, 51, 59, 61
croissance démographique.....	9, 59
crue.....	51, 60, 75
culturel.....	38, 50, 71
cyclone.....	8, 60
danger.....	11
débat.....	49, 50
déchet.....	18, 21, 51, 67
décideur.....	45, 46
décision.....	16, 41, 42, 43, 48, 49, 52, 59
déforestation.....	60
dégradation des sols.....	60
désertification.....	60
développement durable.....	60

Directive cadre sur l'eau.....	51
dose.....	8, 11, 12, 17, 20, 43, 46, 50, 66, 67
dosimétrie.....	44
échelle.....	30, 37, 41, 43, 45, 46, 60, 69, 70, 71, 72
écodynamique.....	11
économie.....	45, 49
économique.....	8, 10, 17, 30, 38, 40, 48, 49, 50, 59, 61, 64, 70, 71
écosystème.....	8, 9, 11, 18, 20, 21, 42, 46, 60
écosystème benthique.....	21
écotoxicologie.....	11, 43, 46, 51, 77
écotoxique.....	20
effet domino.....	45
effondrement.....	30, 59
ELF.....	19
émergence.....	8, 16, 17
émission.....	19, 30, 66
endocrinien.....	18, 43, 52
épidémiologie.....	43, 44, 45, 72
épistémique.....	33, 42, 43, 72
éruption.....	8, 29, 30, 33
éthique.....	18
évaluation des risques.....	12, 32, 41, 42, 48, 72
évaluation des risques.....	64
événement.....	32, 33, 39, 45, 46, 69, 70
événement extrême.....	32
expert.....	8, 42, 43, 46, 48
exposition.....	8, 10, 11, 17, 18, 19, 20, 37, 41, 44, 45, 46, 50, 51, 61, 65, 66, 67, 72
exposition aux radiofréquences.....	66
faille.....	33, 59, 69
feu.....	8
fiscalité.....	49
gaz et huile de roche-mère.....	21, 67
gestion des risques.....	9, 41, 48, 49, 51, 75
gestion des risques.....	10
glissement.....	30
gravitaire.....	8, 29, 30, 46, 59
HAP.....	21
histoire.....	9, 51
hydrate de gaz.....	39
immunitaire.....	18, 43
in vivo.....	19, 52, 65
incertitude.....	19, 33, 37, 40, 42, 43, 46, 49, 71, 72, 75
incertitude aléatoire.....	43, 72
incertitude épistémique.....	42, 43
industrie.....	9, 39, 45, 61, 71
industriel.....	9, 39, 45, 71
inégalité.....	49, 50
information des populations.....	49
information spatiale.....	46
inondation.....	8
intégré.....	33, 41, 43, 45, 70, 72, 75
ion métallique.....	20
macro-déchet.....	21
macrodéchet.....	21, 67
maladie.....	8, 11, 43
maladies infectieuses émergentes.....	8, 61, 64, 65
Maladies infectieuses émergentes.....	14, 61

mécanisme.....	19, 20, 44, 46, 51, 64, 65, 66
médicament.....	20, 51
mélange	46
MFP.....	19, 66
micro-onde.....	19, 66
microorganisme.....	12, 66
milieu marin.....	21, 67
mode de vie.....	44
modèle.....	17, 19, 20, 33, 42, 43, 44, 46, 59, 65, 67, 70
modélisation.....	19, 20, 39, 41, 42, 46, 70, 72
monument historique.....	38, 71
multiple.....	21, 33, 42, 46, 48, 67, 75
multirisque.....	43, 45, 46
nanomatériaux.....	18, 20, 21, 67
nanoparticule.....	10, 19, 20, 21, 66, 67
neurologique.....	43
neuston.....	21
nitrate.....	66
normalisation.....	51
observation.....	33, 34, 39, 42, 44, 70
océan.....	18, 21, 34, 70
OGM.....	16, 17, 64, 65
ozone.....	66
particule fine.....	19
particule ultrafine.....	66
parties prenantes.....	12, 46
pathogène.....	44, 66
pathologie.....	19, 44, 45, 66
pathologie neuro-dégénérative.....	19, 66
patrimoine.....	38, 39, 71
pays en développement.....	59, 60
PCB.....	21
pélagique.....	21
plancton.....	21
polluant persistant.....	59
pollution gazeuse.....	66
poussière.....	66
précaution.....	42
pression.....	18, 60
prévention.....	10, 34, 40, 44, 48, 49, 60, 71
probabilité.....	8, 11, 29, 41, 43, 45, 46, 64, 72
processus.....	16, 17, 19, 30, 32, 33, 39, 42, 60, 65, 66, 69, 70
qualité de l'eau.....	61
radioélément.....	8
radiofréquence.....	19
rayonnement non ionisant.....	19
réchauffement climatique.....	59
recherche pré-normative.....	52
recherches pré-normative.....	52
redevance.....	49
règlement REACH.....	20, 51
remédiation.....	50, 51
reproduction.....	19, 66
résilience.....	32
ressource en eau.....	42, 59
risque.....	34, 45, 51
risque accidentel.....	8

risque chronique.....	12, 61
risque naturel.....	8, 9, 29, 59, 69, 70
risque tellurique	8
sanitaire.....	10, 11, 18, 19, 20, 43, 44, 48, 60, 61, 65, 66
santé.....	8, 9, 11, 17, 18, 19, 42, 43, 44, 50, 60, 65
scénario.....	37, 45
sécurité.....	10, 18, 50, 60, 61, 75
séisme.....	8, 29, 30, 33, 69
série temporelle.....	33
service écosystémique.....	42
sismique.....	29, 46
Sismique.....	29, 31, 46, 52, 76, 77
social.....	8, 9, 10, 12, 38, 48, 65, 75
sociétal.....	39
sociologie.....	51
standardisation.....	51
subduction.....	59
sud.....	60, 61
Sud.....	9, 59, 60
synergie.....	42, 50, 66, 72
taxe.....	49
tellurique.....	8, 29, 30, 59, 60, 66, 69, 70
tempête.....	60
toxicologie.....	11, 20, 43, 44, 45, 46, 51, 52, 72
toxines.....	8
transgène.....	17
transposition.....	44
transposon.....	64
tsunami.....	30, 33, 39, 45, 46
tsunamig.....	29
ud.....	59
variabilité.....	42, 43, 45, 72
ville.....	9, 11, 33, 42, 46, 59, 61
volcanique.....	8, 29, 30, 33, 59
vulnérabilité.....	8, 29, 32, 37, 38, 41, 42, 45, 51, 59, 60, 71, 72, 75