

5

ENVIRONNEMENT, RISQUES, SÉCURITÉ

Michel CAMPILLO
Dominique LE QUÉAU

Pierre Carrega
Stéphane Cartier
Pascale Delecluse
Patrick Landais
Patrice Mestayer
Philippe Normand
Alain Richard
Michel Vaublin

Le milieu dans lequel évolue l'humanité est soumis à des perturbations – d'origines anthropique ou naturelle –, s'exerçant sur des échelles de temps et d'espace très variables et pouvant conduire à des déséquilibres importants de la biosphère et à des évolutions catastrophiques, létales ou incapacitantes pour les populations, ou simplement coûteuses en terme de biens matériels. Les recherches qui conduisent à l'appréciation des aléas – modifications quantitatives (physiques, chimiques ou biologiques) de l'environnement –, à l'estimation des risques encourus – conséquences en terme de dégâts humains et / ou de coûts induits, pour le présent et pour l'avenir – ainsi qu'à la mise en œuvre de dispositifs de sécurité permettant de prévoir, de prévenir ou de gérer ces catastrophes, font aujourd'hui l'objet d'une forte demande sociétale. Elles nécessitent la mise en place de programmes de recherches, associant, dans des cadres de réalisation qui doivent être rigoureux, des scientifiques issus d'horizons variés.

Au-delà de ceux qui sont liés à la nature biologique de l'espèce – vie, vieillissement, mort, reproduction, susceptibilité aux épidémies – la société adapte ses comportements, ses activités et ses représentations de la nature aux conditions naturelles de son environnement. Ainsi :

1. les contraintes environnementales placent les activités humaines en interdépendance ;

2. les risques naturels, qui appellent des transformations prométhéennes du milieu naturel, obligent à une considération du péril ou de la vulnérabilité de chaque activité ;

3. les transformations naturelles ou artificielles du milieu accentuent ou mitigent l'apparition du risque individuel et de conflits entre groupes ou entre générations ;

4. les aménagements du milieu, à côté du prélèvement direct, parfois excessif, des ressources, représentent un gain de sécurité – alimentaire, physique, sanitaire – ou une opportunité – plus value financière, avantage militaire, etc. – dans un espace commun à plusieurs groupes sociaux. L'instauration d'un partenariat ou d'une concurrence entre groupes constitue à cet égard un enjeu souvent vital.

Les activités humaines formant des systèmes sociaux en partie contraints par les facteurs physiques, seule une perspective systémique permet d'appréhender globalement les différentes transformations physiques et sociales à l'œuvre dans l'apparition d'un risque. Les évolutions physiques transforment les conditions d'aléa. Les évolutions sociales, en particulier démographiques, transforment les conditions de vulnérabilité, mais aussi d'amplification des contraintes et de susceptibilité de déclenchement des phénomènes.

Comprendre ces dynamiques de transformation, les dangers qu'elles recèlent, les possibilités de maîtrise des phénomènes ou des vulnérabilités, suppose une connaissance synchronique des interactions, une caractérisation historique des situations passées et une anticipation des évolutions. Autant que de connaissances physiques et juridiques, il est besoin de maîtriser la spatialisation des interfaces, d'explorer, par l'histoire et l'archéologie, les traces anciennes, et d'envisager les transformations possibles, leur probabilité, ainsi que les réponses collectives envisageables.

Identifier, prévoir et gérer les risques exige de comprendre les transformations physiques, le rôle amplificateur des activités humaines, l'accélération des seuils de déclenchement, les conditions de réduction de la vulnérabilité, les possibilités d'adaptation des pratiques collectives et des comportements individuels. Chaque aspect de ce programme dépend des représentations de la nature (de ses transformations, de ses dangers et de son potentiel d'adaptabilité) et des limites acceptables des activités. Les connaissances nécessaires butent sur plusieurs difficultés cognitives : dimension spatiale des aspects physiques, rythme des modifications et des changements d'échelles, interdépendances entre activités, contraintes territoriales entre projets.

Face à la complexité de ces systèmes et la diversité des situations rencontrées, une approche interdisciplinaire est nécessaire pour caractériser les différents facteurs et leurs relations. La constitution de chantiers favorise les observations communes et une « intercompréhension » plus rapide et plus précise, grâce au développement d'une ingénierie réciproque entre disciplines scientifiques. Outre une caractérisation plus exacte des objets de recherche, de leurs multiples dimensions, de leur inscription dans un univers contraignant, cet effort commun représente une opportunité scientifique par le surcroît de questions pertinentes et impertinentes qui obligent à un dépassement des connaissances, des méthodes et des protocoles de travail. Le présent document n'a pas l'ambition d'aborder toutes les facettes de cet immense chantier. Il est principalement centré sur l'analyse, la prévision et la gestion des aléas naturels. Cette réflexion mériterait à l'avenir d'être étendue à l'évaluation scientifique des autres types d'aléas, notamment industriels, en étant particulièrement attentif aux couplages de risques avec les aléas naturels.

1 – CONSTRUCTION DE L'ALÉA COMME ÉCART À LA « DYNAMIQUE » STANDARD

1.1 IDENTIFICATION DE L'ALÉA DANS LES MODÈLES DYNAMIQUES DES MILIEUX NATURELS

De grands progrès ont été faits dans la compréhension globale des phénomènes qui affectent notre environnement physique : modèles explicatifs de la tectonique des plaques, de la circulation générale atmosphérique et marine, des grands cycles comme celui de l'eau. Ces modèles, validés et affinés par une confrontation permanente avec les observations, mettent en œuvre des théories physiques qui permettent de décrire et prévoir le comportement moyen des systèmes naturels, dont la dynamique fait appel à des processus complexes d'interactions entre échelles spatiales. L'influence des petites échelles se traduit par des fluctuations aléatoires, difficilement prévisibles ou, tout au moins, hors de portée de la résolution de nos observations et de nos capacités de calcul. Ces perturbations locales peuvent conduire à des instabilités et à des événements extrêmes : séismes, explosions volcaniques, crues, tempêtes, grands glissements gravitaires, etc.

Dans le monde du vivant, les microorganismes effectuent des transformations biogéochimiques essentielles au maintien de la vie sur terre : fixation d'azote, minéralisation, etc. Ils ont établi des symbioses qui permettent la colonisation de sites pionniers par des plantes ou des champignons. D'autres microorganismes sont des pathogènes des plantes ou des animaux ou même de l'homme lui-même. La phylogénie des microorganismes pathogènes montre que ceux-ci ont émergé de voisins non pathogènes. Des pressions sélectives énormes jouent sur les microorganismes ; en l'absence de sexualité classique ceux-ci échangent des

fragments de génome au-delà des frontières de l'espèce et provoquant ainsi une évolution plus rapide. L'environnement des microorganismes change également, soit par l'évolution de ses hôtes, ou encore en liaison avec des événements catastrophiques comme le volcanisme, et, de façon plus remarquable, en raison de modifications anthropiques. Ces modifications vont de la synthèse de milliers de molécules issues de la chimie organique, à l'émergence de villes à forte densité, aux défrichages des milieux forestiers, au développement de nouvelles pratiques sexuelles, ouvrant ainsi de nouvelles niches écologiques. La population humaine continue de croître, de s'installer dans des zones déforestées, créant également de nouvelles niches qui vont favoriser l'émergence de pathogènes. Il est donc important d'étudier les facteurs qui permettent l'émergence de pathogènes – transferts génétiques ou plasticité génomique – et de développer des capacités de suivi des microorganismes en milieux naturels.

1.2 IMPRÉVISIBILITÉ ET DIVERGENCE : LE CAS DE LA MÉTÉOROLOGIE

Malgré les progrès de l'observation et de la modélisation, la prévision des phénomènes catastrophiques reste aujourd'hui un défi fondamental pour la recherche. Certains processus resteront intrinsèquement imprévisibles, ce qui n'interdit pas de se pencher sur la mitigation de leurs effets destructeurs. Du fait de la méconnaissance partielle des paramètres locaux du milieu naturel et des conditions qui lui sont imposées à un instant donné, les fluctuations du système sont *a priori* aléatoires. La prévision d'un événement doit donc être assujettie à un temps préalable d'annonce et à une précision bien définie. La prévision statistique à long terme (par exemple, la prévision des anomalies climatiques qui se fait maintenant à l'échelle de 3 à 6 mois permet une gestion plus rationnelle des réserves d'eau dans les régions tropicales frappées par El Niño) a des applications très

différentes d'une prévision déterministe à court ou moyen terme (par exemple la prévision des risques d'avalanche déclenchera des mesures de sûreté dans les stations), et la notion de « terme utile » est relative à chaque type d'aléa. L'occurrence de l'événement lui-même n'est pas nécessairement concomitante de la catastrophe : il suffit de penser au délai entre pluie et crue ou entre séisme et passage des ondes destructrices.

Depuis sa création, la météorologie est confrontée à l'exercice de la prévision. La prévision du temps et des événements météorologiques synoptiques repose sur un mélange de méthodes déterministes et statistiques. Elle a fortement progressé grâce au progrès de la connaissance du fonctionnement de l'atmosphère, au développement de la puissance de calcul, et grâce aux améliorations méthodologiques de la maîtrise des incertitudes. Cependant, les événements extrêmes, comme une forte tempête, ou des orages violents, demeurent difficiles à saisir de par leur localisation, ou leur rareté. L'approche actuelle, mêlant déterminisme et statistique, demeure empirique et de nouveaux développements sont plus que jamais nécessaires pour mieux identifier et détecter l'apparition de divergence dans les trajectoires des systèmes dynamiques, ainsi que leur origine (théorie des vecteurs singuliers, par exemple). Si les frontières de l'« imprévisibilité » ont reculé, l'exercice de prévision reste basé sur une connaissance physique et « historique » encore limitée.

La sélection des situations à risque par l'expérience humaine « historique » est une limitation importante dans la prévision. Malheureusement, le danger de certaines situations n'est souvent compris qu'après coup, notamment quand le risque provient de la nature persistante d'une situation extrême, ou d'une coïncidence de facteurs jamais rencontrée. La nature temporelle complexe des situations – persistance des blocages dynamiques, ou, au contraire, non stationnarité de l'environnement, etc. – est liée à la forte non linéarité intrinsèque des phénomènes. Elle souligne la nécessité d'avoir une approche contextuelle très large des événements à risque, et de

développer une expérimentation poussée sur la détection de celui-ci, en tenant compte de la résonance d'une telle information dans les sociétés humaines.

Outre la prévision et la détection du phénomène, il faut également en décliner les impacts dans de nombreux secteurs sensibles. La notion de gravité du risque est, là encore, très dépendante des domaines impactés. Par exemple, les seuils de vent à risque ne sont pas les mêmes pour les lignes haute tension en pleine campagne, pour les bâtiments, ou pour des ouvrages côtiers. Enfin, le risque peut provenir non pas d'un événement physique brutal, mais d'un effet cumulatif sur de plus grandes échelles (par exemple, épaisseur du manteau neigeux dans les avalanches, ou, rupture de lacs glaciaires provoquée par la fonte lente d'un glacier).

Aussi brefs soient-ils, ces délais peuvent être utilement utilisés pour alerter, protéger et adapter les comportements individuels et les activités collectives. Ceci suppose de comprendre les phénomènes, de diffuser l'information, d'éduquer les populations concernées, de maintenir des réseaux de communication, d'adopter des technologies automatiques, d'anticiper les conséquences secondaires, etc. Comprendre le fonctionnement de ces chaînes d'interdépendance lors des crises exige un retour d'expérience qui inclut l'élément le plus imprévisible : les motivations des décisions humaines.

Finalement, la mitigation des risques implique de prendre en compte d'autres niveaux de traduction et de transfert de l'information. Face à la nécessité de prévoir un niveau de sécurité suffisant pour faire face aux crises majeures, les spécialistes du bâtiment vont attendre des informations quantitatives sur des grandeurs définies par les besoins des calculs de dimensionnement. Un dialogue doit être établi avec les utilisateurs pour s'assurer de la pertinence des échelles et des paramètres critiques. La question de l'utilisation de termes d'intérêt pour les utilisateurs n'est pas anodine et doit être abordée en amont de la recherche.

1.3 MODÉLISATION DES ALÉAS

Le développement de méthodes et de logiciels de simulation de scénarios d'aléas, fondés sur la modélisation de sites et sur une analyse probabiliste, est central pour aider à la gestion prévisionnelle des aléas et risques naturels. Ces simulateurs permettent d'élaborer des mesures de prévention ou des plans d'intervention, d'évaluer le niveau de sécurité d'un site face aux risques naturels ou d'apprendre à réagir de manière pertinente en situation d'urgence. La résolution des nuisances environnementales invite cependant la recherche à aller au-delà de sa problématique interne pour traiter correctement toutes les dimensions des modèles. La dimension sociale impose de nouveaux objets et de nouvelles échelles de temps et d'espace, liés aux attentes politiques, qui échappent pour partie à ses calendriers spécifiques. À l'interface entre recherche fondamentale et ingénierie, les procédures d'échange de l'information impliquent traduction et transmission des questions, reformulation des demandes, des réponses scientifiques et des solutions adoptées.

L'action de l'homme sur les processus physiques ne peut plus être négligée même si elle conduit à des rétroactions nombreuses et difficiles à quantifier. Ainsi, les problèmes liés au changement climatique constituent un enjeu scientifique majeur où l'inclusion des pratiques et des attentes humaines est incontournable. De manière prospective, l'analyse scientifique doit intégrer l'action de l'homme moderne, qui modifie fortement ses conditions naturelles. Les exemples sont nombreux depuis l'impact du drainage et de l'endiguement sur les crues ou, plus généralement, celui du développement des zones urbaines sur les phénomènes de surface (écoulements, aménagement des pentes, propagation des ondes sismiques, etc.). De façon générale, le développement et l'extension de l'activité et de l'occupation humaine du territoire induit une pression sur l'environnement – que l'on songe aux grandes métropoles du tiers-monde – avec des modes de contrôle diversifiés voire contradictoires, relevant soit

de l'initiative privée, soit de l'action publique – souvent comme remédiation des risques induits. Pour être plus spécifique on peut considérer deux exemples.

Les « blooms algaux » ou « marées rouges » – en raison de la couleur donnée à l'eau – sont liés au développement « explosif » de populations de microorganismes photosynthétiques aquatiques, et dûs à une conjonction de facteurs partiellement anthropiques. Certaines des cyanobactéries impliquées synthétisent des toxines et se retrouvent dans des mollusques consommés par l'homme. Ces phénomènes sont donc dangereux et ont un impact économique dans les régions où conchyliculture et mytiliculture jouent un rôle important. Ces microorganismes ont des dynamiques de population qui sont fonction de multiples facteurs dont la détermination précise engendre de nombreuses controverses, pour partie liées à ces implications économiques. Au premier rang de ces facteurs se trouve, avec la température de l'eau, la concentration en nutriments (azote, phosphore, etc.), qui peut être plus ou moins directement liée aux activités humaines. Une approche multidisciplinaire s'impose pour répondre à ces questions complexes : génétique, physiologie, hydrologie, chimie, etc. doivent être mobilisées pour comprendre et prédire ces événements potentiellement catastrophiques.

Dans des territoires transformés par l'Homme, l'incendie de forêt constitue un système extrêmement complexe dans lequel les rétroactions constituent un forçage essentiel. Ce forçage est moins lié à l'occurrence d'un aléa particulièrement rare, ou à la production d'une « bifurcation », d'une « divergence », qu'à la superposition, à l'occurrence simultanée de facteurs objectivement favorables, non seulement à la propagation des flammes, mais aussi à leur non extinction, et enfin à la valeur combustible. Cela tient aux pratiques agro-forestières, aux aménagements, à l'urbanisation, au développement de réseaux. En zone méditerranéenne, l'imbrication croissante des espaces urbanisés (parfois diffus) et du couvert végétal (forestier et périurbain) complexifie encore ces rétroactions.

1.4 ANALYSE DE SÛRETÉ

- L'analyse de sûreté consiste à repérer, de façon systématique et à une échelle de temps particulière, les causes de dysfonctionnements possibles d'un système naturel ou artificiel, leurs effets potentiels, leur gravité et les moyens correspondants de prévention et/ou de protection. L'analyse s'articule autour de deux volets étroitement liés : qualitatif et quantitatif.

L'analyse qualitative identifie les événements susceptibles de perturber le système, évalue leur incidence, leur gravité et leur vraisemblance. Elle prend en compte les causes de défaillance interne (par exemple le dysfonctionnement d'un élément du système qui ne remplirait pas le rôle prévu) autant que les causes externes (agressions d'origine humaine ou naturelle qui sont répertoriées soit sur la base d'analyses systématiques soit sur la base de règles fixées par des organismes compétents). Elle met en évidence les dispositions ou les facteurs qui limitent l'apparition d'événements perturbateurs ou leurs conséquences. Sur la compréhension des modes de défaillance, elle permet de construire les scénarios de sûreté. Un scénario est un enchaînement d'événements et/ou de processus décrivant l'évolution possible du système et de son environnement.

- L'analyse quantitative évalue quant à elle les performances ou le fonctionnement du système sur la base d'indicateurs chiffrés. En s'appuyant sur les scénarios définis précédemment et en mettant en œuvre les modèles pertinents, elle permet de quantifier les différents stades d'évolution (dans le temps ou dans l'espace) du système analysé. Des indicateurs appropriés permettent de vérifier que les fonctions attribuées au système sont réalisées. On dispose alors d'une vue globale des éléments ayant un impact significatif sur la sûreté afin de hiérarchiser leur poids dans le fonctionnement du système face à différentes situations. L'analyse quantitative s'appuie sur une description phénoménologique détaillée de l'évolution du système dans le temps et dans l'espace à partir des connaissances

acquises sur le milieu naturel ou sur les dispositions de conception et de construction du système anthropique.

Des modélisations sont alors réalisées pour rendre compte des observations effectuées et/ou des évolutions envisagées. Elles sont ensuite simplifiées pour permettre de traiter avec les moyens de simulation numérique disponibles l'analyse quantitative. Celle-ci doit également prendre en compte les incertitudes, au travers d'approches déterministe ou probabiliste, en fonction des jeux de données disponibles. Il est nécessaire de s'assurer qu'au travers des études de sensibilité et grâce au traitement des scénarios d'évolution altérée, on rend compte, de la façon la plus exhaustive possible, du fonctionnement et de l'évolution du système afin d'en retenir les processus majeurs et d'orienter les dispositions de prévention et de protection.

À titre d'exemple on peut considérer les risques induits par le stockage profond des déchets radioactifs de haute activité et à vie longue pour lesquels la modélisation des propriétés de la couche géologique hôte est un élément central de l'analyse. Parmi les risques relevant de l'environnement géologique, on distingue ceux induits par la construction du stockage (endommagement mécanique et chimique), de ceux liés à l'évolution géodynamique à long terme (conséquences de changements climatiques, aléas sismiques). Les risques et incertitudes sont d'abord gérés par des dispositions conceptuelles sur les architectures du stockage (interruption des courts-circuits hydrauliques potentiels, limitation de l'endommagement, thermicité) relevant en particulier de concepts multi-barrières (naturelle et ouvrages). Les incertitudes résiduelles font l'objet de calculs de sensibilité dans le cadre du traitement d'un scénario d'évolution « normale » (valeurs de paramètres, modèles alternatifs). Les évolutions divergentes sont traitées sous forme de scénarios altérés (par exemple forage intrusif, défauts de scellement ou de conteneur). La modélisation de ces différentes situations impose des liens étroits entre acquisition des connaissances (phénoménologie, modélisation physique, simulation numérique), ingénierie et

sûreté afin de prendre en compte au mieux le dimensionnement des architectures, la représentation des interfaces ainsi que le couplage des phénomènes (thermiques, hydrauliques, mécaniques, chimiques).

Cette démarche globale peut s'appliquer à la fois aux systèmes industriels et aux systèmes naturels. Elle s'adapte à chacun d'eux par le choix des données et des modèles appropriés et permet de traiter des situations divergentes par rapport à une évolution de référence. Elle permet enfin, sur la base d'indicateurs pertinents, de définir quels sont les progrès à réaliser dans le domaine de l'acquisition des connaissances (expérimentations et observations dédiées) ou des moyens de calculs (représentation la plus réaliste possible de l'évolution du système).

2 – DÉFINITION ET MESURE DU « RISQUE »

2.1 DÉTECTION ET ANTICIPATION DES « ÉVÉNEMENTS EXTRÊMES »

Un problème fondamental est celui de la détection préventive des situations à risque et donc de la reconnaissance anticipée de la conjonction de facteurs pouvant engendrer des dommages substantiels.

Du côté de la « physique », le principe de la détection s'appuie sur la reconnaissance d'une anomalie par rapport à un comportement statistiquement normal. Apparaît tout de suite la difficulté de l'étude des événements extrêmes car leur rareté les rend peu perceptibles et il faut des méthodes statistiques très sophistiquées pour les déceler. Une difficulté supplémentaire provient de la séparation parfois physiquement non pertinente entre un fond contextuel variable et les événements extrêmes : la dynamique des milieux naturels est extrêmement

non linéaire et de fortes interactions d'échelle sous-tendent toute manifestation de variabilité. On parlera donc d'environnement de grande échelle pré-conditionnant une recrudescence de risque (comme les fréquences de tempêtes en France pendant la phase positive de l'oscillation Nord Atlantique). Ces sujets très sensibles sont à la limite de détection des capacités actuelles, compte tenu de notre faible recul sur les observations, et des limitations dans la représentation de ces phénomènes dans les simulations numériques.

En météorologie, l'anticipation passe tout d'abord par la réalisation de cartes de vigilance qui sensibilisent les usagers aux risques de grêle, d'inondation ou d'orages particulièrement violents. Pour cela, un travail préparatoire a dû être fait du côté des prévisionnistes, qui ont travaillé sur la détection de configurations des champs physiques comme précurseurs d'impacts importants, et du côté des usagers où il a fallu faire comprendre la notion de vigilance, donnée par une échelle statistique. Cette démarche est encourageante mais elle est loin de couvrir tous les phénomènes à risque pouvant se produire. Cependant, elle éclaire la nécessité d'une démarche de rencontre entre les scientifiques et les acteurs de la société qui subissent les dommages, car eux seuls peuvent aider à quantifier la gravité d'un événement et donc l'urgence de la prévention à mettre en place.

La détection sur de plus longues échelles de temps s'appuie sur la réalisation d'ensemble de simulations dont chaque élément permet d'anticiper le scénario dans une configuration spécifique de paramètres. Explorer l'ensemble des scénarios possibles est une tâche énorme, mais il est parfois possible de dégager des comportements génériques sur le long terme, ou récurrents, qui permettent une détection statistiquement fiable des situations à risque. Ainsi, pour explorer l'environnement climatique à l'échéance du siècle, un grand nombre de scénarios est produit à partir de différents modèles (ce qui permet de prendre en compte les incertitudes liées aux différences entre modèles) et des méthodes statistiques avancées

sont en développement pour détecter les changements éventuels de risques physiques, liés à des modifications climatiques (par exemple, augmentation de fréquence des tempêtes, modification des zones de vulnérabilité, érosion littorale, inondations, etc.).

2.2 SUSCEPTIBILITÉ ET VULNÉRABILITÉ

Les capacités destructrices des phénomènes naturels ne peuvent s'apprécier sans examen des conditions locales du site, des bâtiments ou des pratiques sociales et culturelles.

Dans l'amplification de l'aléa (la susceptibilité), l'hydrologie ou la sismologie identifient l'importance des conditions géomorphologiques et superficielles des terrains. L'évaluation quantitative de ces amplifications locales reste soumise à la compréhension des processus physiques à très petite échelle et des incertitudes sur la nature et la géométrie des matériaux. Des recherches sont nécessaires sur les aspects phénoménologiques et sur les techniques d'imagerie du proche sous-sol. La connaissance des processus d'amplification ou de diminution des phénomènes permet une identification de la susceptibilité locale. Celle-ci peut évoluer sous l'influence des aménagements humains, qui modifient les conditions naturelles par rétroaction. Dans ce cas, la vulnérabilité est conditionnée par la densité démographique, par l'usage de l'espace, par les activités, leur organisation (règles de contiguïté et obligations de sécurité), leur hiérarchie économique, les techniques de protection disponibles, les possibilités d'évacuation ou de confinement, les gains attendus de l'exposition au risque, les contraintes acceptables, les dispositifs de solidarité.

L'hydrométéorologie est un bon exemple de la nécessité d'une bonne compréhension préalable des processus à différentes échelles spatio-temporelles. Aux échelles locale et régionale se manifestent des pressions anthropiques fortes en éventuels conflits avec les contraintes écologiques de bon fonctionnement

et de durabilité des milieux concernés : d'une part, l'occupation, l'aménagement et la gestion des territoires et d'autre part, la maîtrise de la quantité et de la qualité des eaux (et des sols), notamment en période de tensions (sécheresses, étiages, crues, inondations), la maîtrise de l'évolution des lits des cours d'eau, la prévision et la prévention des risques associés. Les phénomènes à temps courts liés aux aléas météorologiques (i.e. crues, inondations) sont encore insuffisamment compris et donc mal modélisés. Aux temps longs les impacts du réchauffement climatique sur le cycle hydrologique et sur ses flux associés restent encore incertains. De plus cet effet ne doit pas se limiter à l'évaluation des tendances à long terme mais aussi à l'évolution des phénomènes extrêmes (précipitations intenses, sécheresses, tempêtes, etc.) et aux rétroactions sur le climat lui-même. En ce qui concerne plus spécifiquement les aléas et risques hydrométéorologiques, les éléments de contexte sont particulièrement importants car ils « pilotent » très directement la demande de recherche. À titre d'exemple, alors que la tendance générale des attentes sociétales est tournée de plus en plus vers des capacités de prévision (et pas simplement de prévention) en temps réel, celles-ci sont initiées, soutenues et portées par les Services opérationnels dédiés. Or prévoir une crue en temps réel nécessite une anticipation à plusieurs niveaux dont tous les outils sont encore loin d'être disponibles pour l'ingénierie. De plus, rien n'indique que les modèles étalonnés et « validés » en situations « normales » soient pertinents en situations « extrêmes ». Les hypothèses posées pour la hiérarchisation des processus, les changements d'échelles et la linéarisation des phénomènes peuvent être remises en question pour des problèmes où les échelles de temps peuvent être très courtes et/ou les forçages (l'intensité de la pluie) ainsi que les conditions initiales et aux limites des bassins (état hydrique du sol, couverture végétale, niveau piézométrique) peuvent être très différents.

La propagation des incendies de forêt constitue un troisième exemple d'imbrication de phénomènes d'origine extrêmement variée se mettant en phase pour produire un

aléa imprévisible, mais dont le potentiel – la susceptibilité – est évaluable. Les feux de forêt mettent en jeu deux échelles temporelles de susceptibilité :

– (i) les conditions météorologiques qui varient sur quelques heures – vent, température, sécheresse du sol, des plantes et de l'air – et sur lesquelles l'homme n'agit pas directement ;

– (ii) l'occupation du sol qui dépend de l'activité humaine, de la densité de population, du type de civilisation, et dont l'évolution se mesure en terme d'années.

La forêt méditerranéenne, qui n'a pratiquement pas de valeur marchande, présente, vis-à-vis des feux de forêts, un paradoxe majeur : alors que sa susceptibilité aux incendies diminue, sa vulnérabilité s'accroît. En effet, plus des habitations individuelles s'y construisent – provoquant un « mitage » de la forêt – et moins la propagation des flammes y est facile puisque le combustible est soumis à des « coupures » et se raréfie : la susceptibilité diminue donc. Dans le même temps, du fait de la présence humaine accrue, les risques d'éclosion d'incendie augmentent, la lutte contre celui-ci est finalement plus difficile et le coût des dégâts est beaucoup plus élevé. La baisse consécutive de potentialité du feu s'accompagne d'une diminution des moyens mis en œuvre pour arrêter sa propagation, puisqu'ils sont partiellement mobilisés pour diminuer la partie « vulnérabilité » du risque : ils protègent les maisons et les personnes. On a donc ici l'exemple simultané d'une diminution de la combustibilité d'une forêt (susceptibilité moindre), s'accompagnant d'une augmentation de la probabilité d'aléa (la mise à feu) et de la vulnérabilité (les dégâts).

3 – CONFLITS, CRISES ET « REMÉDIATION »

3.1 LÉGITIMER, NORMALISER, INFORMER : POUR UNE « POLITIQUE » DU RISQUE

L'inscription dans des systèmes physiques, économiques, juridiques, culturels très contraignants oblige constamment à reposer la question politique de la légitimité de chaque activité au regard des dangers qu'elle recèle. La constitution de systèmes de solidarité permet de compenser les nuisances collectives et les arbitrages nécessaires entre activités. Plus que de risque acceptable, il faut parler de contrainte et de solidarité politiquement acceptables. Les choix individuels sont soumis aux choix collectifs plus favorables selon les circonstances et les groupes aux gains attendus de la prise de risque ou à une adaptation par fuite du danger, restriction spatiale des activités, protection, transformation par l'aménagement, reconstruction curative.

Mesurer la vulnérabilité de l'impact de certaines pratiques – dont l'intensité et/ou les modalités sont dépendantes d'évolutions environnementales, naturelles ou anthropiques – ou de crises majeures, puis proposer des remédiations constitue une activité de recherche intrinsèquement interdisciplinaire en interface permanente avec d'autres acteurs sociaux : usagers, entrepreneurs, pouvoirs publics. Cette activité peut déboucher, selon les cas, sur l'établissement de normes, la rédaction de dispositifs législatifs, la définition, puis la mise en œuvre d'une politique d'aménagement du territoire. Elle relève d'une problématique complexe qui inclut expertise, gestion de l'information auprès du public comme auprès des instances politiques et régaliennes, et doit se polariser sur les écarts entre l'amont (aménagement) et l'aval (gestion de crise).

La diffusion de connaissances nécessite une meilleure compréhension des attentes du public et des gestionnaires, une meilleure

connaissance de leurs besoins et de leurs capacités d'apprentissage dans des calendriers contraints. Elle doit de plus être préparée à une dimension internationale complexe de la gestion de crise, donc plurilinguistique, pluriculturelle, pluriorganisationnelle. L'enjeu est de disposer de ressources cognitives non seulement pendant la crise, puisqu'il faut pouvoir évaluer les conséquences des résistances et des collapsus éventuels, mais aussi de manière préventive afin de limiter les développements funestes au profit de ressources nouvelles.

3.2 PRÉVENIR, LÉGALISER : LE CHAMP DE L'EXPERTISE

Chaque incertitude de la connaissance génère ses controverses scientifiques, ses polémiques politiques, ses opportunités de contestation ou d'autorité pour réaliser d'autres projets. Le discrédit scientifique croissant, lié à la crise de légitimité des autorités publiques, oblige à imaginer de nouvelles manières de communiquer les résultats et les incertitudes scientifiques. Cet effort relationnel est d'autant plus nécessaire, que chaque conflit environnemental, voire chaque crise, montre combien les scientifiques sont convoqués comme experts pour fournir des connaissances pragmatiques nécessaires aux décisions et à l'action.

La gestion de l'eau constitue un cas d'école – historiquement « visitable » – dans lequel l'utilisation des dispositifs légaux nécessite le recours permanent à l'expertise. Seul l'expert peut définir précisément le périmètre du bassin, l'importance relative de l'eau « visible » – ruisseau et rivière – et de l'eau « invisible » – structure et dynamique des nappes phréatiques – et mesurer « objectivement » l'utilisation qui est faite de cette ressource essentielle. Cela est nécessaire pour tenter de prévenir les conflits d'usage qui affectent depuis des millénaires le développement et l'aménagement des territoires, voire des conflits plus lourds de menaces, si les évolutions climatiques modifient sensiblement l'hydrologie des grands bassins fluviaux.

Dans cette perspective, à coté d'une approche autoritaire de la gestion de l'eau, la régulation concertée apparaît comme conduisant à un dispositif légal qui s'inscrit profondément dans les usages, au moins tant que les conditions aux limites ne varient pas significativement. La concertation entre usagers s'analyse comme une participation à la définition de la règle, et à une élaboration conjointe de la norme. Cette régulation peut être organisée par l'État comme c'est le cas en matière de planification des ressources, ou négociée et formalisée dans une convention – contrats de bassin, ou de nappes. Les procédures d'arbitrage entre usagers sont facilitées par des contraintes fortes – nécessité de l'entretien des digues – ou par la rareté de la ressource ou encore par la nature des lieux et les choix de production. Même si les intérêts des groupes en conflits diffèrent radicalement – exemple de la Camargue où s'opposent sauniers, riziculteurs, agriculteurs, manadiers, protecteurs de la nature et professionnels du tourisme – la saisonnalité des activités et leur séparation entre milieux maritimes, saumâtres et dulçaquicoles permettent d'aboutir à une régulation et à la coexistence d'intérêts antagonistes. Encore faut-il que la rationalité de ces paramétrages soit correctement étayée et légitimée par une expertise pluridisciplinaire.

Il en est de même, par exemple, pour introduire des éléments objectifs dans la régulation des pollutions diffuses par les nitrates, qui constituent un enjeu économique, avec des implications parfois transfrontalières, et un enjeu en matière d'aménagement du territoire. La régulation de ces pollutions nécessiterait de prendre en compte l'impact environnemental des mesures préconisées par la Loi. Cela implique une approche interdisciplinaire mobilisant agronomes – étude des processus de transfert sols-plantes en eau et azote, de leur implication sur le développement végétal et du rôle précis de la fertilisation chimique des cultures – hydrologues et hydrochimistes – modélisation de la lixiviation des sols et des transports à l'échelle de la parcelle puis du bassin, estimation « pédoclimatiques » de l'impact environnemental des rejets de nitrates

– et économistes – recherche d'un optimum des rapports coût – efficacité, dépendant de la structure des exploitations agricoles et intégrant le coût de l'impact environnemental et celui de la « sur fertilisation » des sols. Cette analyse multi échelle – processus, parcelle, exploitation, bassin – peut alors déboucher sur des propositions d'indicateur d'impact pouvant faire l'objet d'une taxation « objective », susceptible d'être explicitée rationnellement et potentiellement « admissible » par l'ensemble des acteurs.

3.3 SURVEILLER, ALERTER : LE RÔLE DES RÉSEAUX

Les réseaux de communication sont des outils privilégiés dans les phases de surveillance et d'alerte. Dans le cadre de la surveillance le réseau sert à acheminer les données issues de différents capteurs et doit adapter sa topologie à leur distribution. Le système de communication devra offrir les garanties de qualité de service correspondant à l'importance des informations transportées. Il faut donc prévoir une éventuelle redondance des liens et la mise en place de mécanismes déterministes d'acheminement de l'information (temporalité, spatialité, etc.). Il faut veiller à sécuriser le système de communication au regard de certaines malveillances, afin d'assurer sa disponibilité et garantir l'intégrité des informations qu'il véhicule pour éviter de fausses alertes ou le masquage d'alarmes réelles. Dans le cadre de l'alerte des autorités, des différents services de la protection civile et des citoyens deux scénarios sont envisageables. Le premier considère le cas où les infrastructures de communication ont été sauvegardées à l'issue de la catastrophe. Les procédures d'alerte, préalablement établies, utilisent ces infrastructures. Il est alors nécessaire de protéger les réseaux des risques de saturation engendrés par une situation de panique, en utilisant, par exemple, le contrôle d'admission pour privilégier les communications stratégiques. Les vecteurs de diffusion classiques à destination de la population (radio,

TV, etc.) peuvent aujourd'hui être complétés par la mise en place de systèmes automatiques d'appels téléphoniques, d'envoi de messages électroniques, SMS, etc.

Le second cas de figure est relatif aux infrastructures de communication endommagées par la catastrophe. Il s'agit alors de remettre en place, au plus vite, un système de communication opérationnel pour les services de sécurité et de secours. C'est bien sûr les technologies sans-fil qui seront les plus faciles à déployer. La réquisition de supports de communication alloués à des services non prioritaires, non affectés par la catastrophe, doit également être réalisable. En effet, si les réseaux réservés aux autorités et services de l'état (réseau Rimbaud par exemple) restent généralement opérationnels, certaines catastrophes récentes (AZF, etc.) montrent que toutes les institutions s'inscrivant dans le schéma général d'organisation des secours ne disposent pas des moyens de communication nécessaires à leur pleine efficacité.

3.4 PENSER LA CRISE : VERS UNE PHILOSOPHIE DU RISQUE

En ce qu'elle représente l'obligation de choisir, la crise confronte le groupe aux incertitudes physiques des relations entre les éléments et à ses propres incertitudes sociales sur la manière la plus optimale de se reproduire. Face à la crise, il est difficile d'envisager le pire, socialement inadmissible. Sur ce point, seule une connaissance affinée des phénomènes physiques peut éclairer la gamme des transformations potentielles. Il est aussi difficile d'imposer une vigilance constante pour mitiger les conséquences d'un événement exceptionnel. L'adaptation suppose une familiarité avec le danger pour s'organiser en conséquence, se prémunir en se protégeant des effets secondaires. Il est aussi difficile d'apprécier et de supporter les marges d'inexactitude des prévisions. La vaine poursuite d'une caractérisation exacte du phénomène éventuel peut éloigner de mesures simples de prudence. À ce

titre, connaître l'emplacement exact d'une faille sismique est souvent moins important que de préparer l'urbanisation de la région aux capacités parasismiques.

Le caractère opérationnel de la connaissance en gestion de crise suppose une connaissance préalable de l'état des phénomènes, une information en cours de transformation, la définition de scénarios envisageables, l'identification de risques secondaires, l'indication de critères de sortie de crise. Cette expertise recèle cependant des contraintes sociales violentes qui réduisent l'échange spontané de connaissances. Outre les ordinaires cloisonnements sectoriels, respects hiérarchiques abusifs, fractures disciplinaires et rivalités personnelles, la circulation des informations cruciales est progressivement entravée par l'apparition de phénomènes nouveaux :

- surcharge informationnelle qui sature les décideurs et contraint à des tris ;

- confidentialité et propriété des données qui supposent des conventions préalables pour diffuser des informations publiques stratégiques et privées concurrentielles ;

- hypothèque de la responsabilité juridique entre experts et décideurs, qui suppose une répartition préalable des rôles.

Les tentatives d'organisation restent cependant toujours limitées face à des situations catastrophiques qui, par définition, représentent une transformation systémique des conditions antérieures. Avant d'être objet de gestion, la catastrophe bouleverse l'organisation normale entre activité, les rôles collectifs et les capacités (physiques et mentales) individuelles. En somme, il ne faut pas attendre des individus impliqués dans une catastrophe qu'ils développent un comportement normal. Victimes ou héros, les conditions de leur action et leur motivation sont transformées. Dans un univers transformé, ils utilisent leurs capacités préalables dans les limites des conditions nouvelles (physiques, biologiques, organisationnelles, cognitives) pour s'adapter. L'enjeu de l'aide extérieure est de leur fournir les moyens de retour à l'autonomie (biologique, physique, énergétique, cognitive) favorables à la reconstruction, la réorganisation et la résilience.

4 – LES BESOINS DE LA RECHERCHE : PROSPECTIVE

4.1 FAIRE ÉVOLUER LA DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

En matière de connaissances des risques, il est important de rééquilibrer les recherches sur les aléas (subis) et celles relatives aux vulnérabilités (choisies).

Au cours de ces dernières années et grâce à des soutiens importants de programmes ministériels et/ou pluri-organismes, les communautés scientifiques impliquées dans les recherches sont parvenues à des avancées significatives dans la compréhension et la modélisation de la plupart des processus fondamentaux intervenant dans les dynamiques lentes et rapides. De nombreux « verrous scientifiques » ont été correctement identifiés.

En revanche, les recherches sur la vulnérabilité apparaissent moins avancées et doivent faire l'objet d'une attention particulière. La réduction de cette dernière, certainement possible, nécessite néanmoins l'implication et les efforts de politiques publiques, la prise de mesures de prévention et de précaution appropriées pour éviter, sans altérations notoires des conditions économiques et sociales préexistantes, le développement urbain et industriel dans les zones à risques (qu'il convient de clairement identifier et cartographier à partir d'analyses aussi scientifiquement fondées que possible).

Au plan de la démarche scientifique cela passe notamment :

- par la construction et la mise en œuvre d'approches **pluridisciplinaires** et **multi-organismes** de type **systémique** convoquant les Sciences de l'Univers et les Sciences Humaines et Sociales, mais aussi les SPI, SPM, STIC, etc. Replacés dans la problématique plus large des « territoires », les objets scientifiques à traiter sont complexes et ne sont pas donnés *a priori*, mais ils doivent être élaborés par les différentes communautés ;

– par l'utilisation d'outils économiques d'estimation des coûts et des bénéfices qui deviendront certainement de plus en plus sophistiqués en situation de changement climatique ;

– par l'élaboration de méthodes avancées d'évaluation des risques et par la construction d'une méthodologie de retour d'expériences avec pour objectif à terme sa systématisation ;

– par le développement d'une véritable culture « risques » au sein des populations par la formation et l'information.

4.2 DÉVELOPPER LES SYSTÈMES D'OBSERVATION, L'INSTRUMENTATION ET LA MODÉLISATION

La connaissance des aléas et des risques passe par l'impérieuse nécessité de capter les phénomènes extrêmes (donc rares), détecter les non stationnarités, identifier les seuils, les bifurcations dans les comportements impliquent **l'acquisition de longues séries chronologiques de données de qualité, leur archivage et leur sauvegarde.**

1. des développements technologiques s'avèrent nécessaire pour mettre au point de nouveaux capteurs autonomes et fiables, susceptibles d'améliorer la connaissance locale des paramètres environnementaux : concentrations de polluants, débit, température, etc. et de transmettre en temps réel ces informations à ces centres de traitements de données ;

2. des réseaux de mesures et d'observations, fondés sur ces innovations instrumentales, doivent satisfaire deux types de besoins complémentaires :

– (i) compréhension phénoménologique/acquisition de connaissances)

– (ii) surveillance d'un problème précis/diagnostic sur une situation particulière.

Les réseaux de capteurs contribuent à la surveillance de l'environnement (ou des infrastructures) Ils peuvent être constitués, de façon complémentaire, par des instruments de télédétection et des micro-capteurs déployés en grand nombre au sol. Les recherches nécessaires concernent, entre autres, les aspects technologiques liés aux développements de micro-capteurs à faible coût avec des capacités de traitement, de mémorisation et de communication, la mise au point d'algorithmes de traitements collaboratifs des signaux et des informations, ainsi que la construction en temps réel d'une topologie de réseau ad hoc (mise en communication d'un capteur avec ses plus proches voisins, repérage par GPS). Un effort de rationalisation (mise en commun des ressources, mutualisation des compétences) paraît devoir s'imposer, surtout en période de tension budgétaire forte.

3. des bases de données. La conception et la conservation de Systèmes d'Information Environnementaux multivariés et multiparamètres deviennent indispensables ;

4. des modèles (médiateurs disciplinaires, intégrateurs de connaissances, révélateurs de lacunes, outils d'aide à la décision et d'élaboration de scénarii). Il conviendra :

– (i) de promouvoir l'approche quantitative des processus physiques complexes,

– (ii) de poursuivre le développement de modélisations couplées (par exemple hydrologie/météorologie, hydrologie/hydraulique/transports solides, sismologie/génie civil, volcanologie/transport turbulent, biogéochimie/dynamique, etc.) s'appuyant, au plan technique sur l'utilisation de couches logicielles (coupleurs) qui facilitent la modularité des systèmes, ou bien l'implémentation en parallèle de différents types de modèles, globaux et distribués,

– (iii) de développer les modèles à base physique intégrant les aspects socio-économiques (modélisation des systèmes complexes),

– (iv) d'estimer les incertitudes des modèles ;

5. des expériences pilotes, multirisques. Elles permettraient de traiter du concept de vulnérabilité comme objet d'étude. Il serait possible de s'appuyer sur certaines opérations déjà lancées et/ou labellisées ou d'autres à initier notamment dans les DOM (Antilles, La Réunion). Le côtier et la ville apparaissent des domaines pertinents dans la mesure où ils sont déjà (et le seront de plus en plus) soumis à de fortes concentrations de population et pour certains d'entre eux, sous contrainte de risques naturels forts et multiples (inondations, séismes, glissements de terrain, etc.) ;

6. des structures de recherche transdisciplinaires adaptées. Sur la base d'exemples existants on pourrait penser à l'organisation de GDR, déjà largement pluridisciplinaires, interagissant au travers d'ateliers sur des objets, des zones définies – par exemple dans le cadre des expériences pilotes proposées ci-dessus –, des modèles, etc. Dans cette organisation, le retour d'expérience final, vers le juridique, constitue une incontournable nécessité. Cela permettra de combler les lacunes du cadre législatif, et de faire évoluer les règles de sûreté ainsi que les modalités de conception et de suivi des ouvrages sensibles.

ANNEXE

LISTE DES AUTEURS

Michel Campillo

Professeur à l'Université Joseph Fourier, Grenoble
Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique – LGIT (UMR5559), Maison des Géosciences, 1381 rue de la piscine BP 53 38041 Grenoble cedex 9

Pierre Carrega

Professeur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis, géographie
Responsable de l'équipe Gestion et Valorisation de l'Environnement
Études des structures, des processus d'adaptation et des changements des espaces – ESPACE (UMR6012), Université d'Avignon et des pays du Vaucluse, 74 rue Pasteur 84029 Avignon cedex 1

Stéphane Cartier

Chargé de Recherche, Sciences Politiques
Équipe « Risque Sismique »
Laboratoire de géophysique interne et tectonophysique – LGIT (UMR5559), Maison des Géosciences, 1381 rue de la piscine BP 53 38041 Grenoble cedex 9

Pascale Delecluse

Directrice de Recherche, Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement Institut Pierre Simon Laplace – IPSL
Laboratoire des Sciences du climat et l'environnement – LSCE (UMR1572) – Unité mixte de recherche CEA – CNRS, CNRS, bat. 12 av de la terrasse 91198 Gif sur Yvette cedex ; Commissariat à l'énergie atomique, Orme des Merisiers bât 701 Saclay, 91191 Gif sur Yvette cedex

Patrick Landais

Directeur Scientifique
Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs – ANDRA, 1 rue Jean Monnet 92290 Châtenay-Malabry cedex

Dominique Le Quéau

(DR CNRS) Observatoire Midi-Pyrénées, OMP/ UPS-CNRS-IRD, Président du Conseil Scientifique du Département SDU du CNRS ; physique des plasmas spatiaux
Observatoire Midi-Pyrénées (UMS831), 14 Av Édouard Belin 31400 Toulouse

Patrice G. Mestayer

Fédération de Recherche Physique et Images de la Ville (FR CNRS 2488), École centrale de Nantes, 1 rue de la Noé BP 92101 44321 Nantes cedex 3

Alain Richard

Professeur, Identification, Restauration,
Images, Signaux
Centre de recherche en automatique
de Nancy – CRAN, Faculté des sciences
et techniques BP 239 54506 Vandoeuvre cedex

Michel Vaublin

Directeur de Recherche, Hydrologie
Laboratoire d'étude des transferts en hydro-
logie et environnement – LTHE (UMR5564),
Institut national polytechnique de Grenoble,
ENSHMG – Domaine Universitaire,
1023-1025 rue de la piscine BP 53
38041 Grenoble cedex 9

