

Typologie des aléas et connaissance scientifique de la vulnérabilité.

Le point de vue de l'ingénieur

Volcans, cyclones, séismes ou inondations, mouvements de terrains ou encore tsunamis, l'avancée des connaissances est rapide. Mais aléas ou vulnérabilité, les marges de progrès restent importantes pour les scientifiques et les ingénieurs. Car s'il est vain d'imaginer échapper à toute catastrophe naturelle, en mieux connaître les mécanismes c'est mieux savoir s'en protéger. Un défi d'autant plus urgent à relever que la population de la planète s'urbanise à grands pas.

par Jean Dunglas,

Ingénieur général honoraire du Génie rural des Eaux et des Forêts

On annonce constamment des catastrophes naturelles quelque part dans le monde et celles-ci semblent même de plus en plus nombreuses. Mais nous savons bien qu'il s'agit là d'une illusion, née d'une sur-représentation médiatique jouant sur les émotions créées par l'étalage des drames. Les recherches historiques montrent qu'elles ont toujours

existé, dans le passé, avec leur cohorte de désastres dont certains ont été bien plus terribles que ceux dont nous sommes de nos jours les témoins. Nous savons aussi qu'elles se reproduiront dans l'avenir et qu'il faut s'y préparer.

La catastrophe se présente sous deux aspects-: l'aléa d'abord, qui est le phénomène destructeur en lui-même, et ensuite les pertes et dommages

qu'il entraîne, qui dépendent de la vulnérabilité du milieu. Il est intéressant de s'efforcer de classer les aléas, d'en faire une typologie, pour les comparer, en extraire les points communs, en étudier les relations et, finalement, en tirer une vision globale, nécessaire pour une maîtrise rationnelle des dangers. Il est intéressant aussi de faire le tour des vulnérabilités car toute amélioration

dans ce domaine représente un gain net pour la société.

Définition et cadrage de la notion de catastrophe naturelle

Le concept lui-même

Il s'agit d'un événement naturel désastreux et destructeur, susceptible de modifier plus ou moins profondément, et sur un territoire plus ou moins étendu, l'environnement et les conditions de vie des groupes humains, voire même de détruire à la fois leurs vies, leurs biens et leurs installations. Quand les destructions sont massives, on parle de cataclysme.

On se référera ici à des phénomènes dont la durée est comparable à celle d'actions humaines courantes ayant des impacts locaux ou globaux importants en termes de pertes de vies, dégâts matériels, effets économiques, effets environnementaux et susceptibles d'entraîner des catastrophes technologiques. On n'a donc pas pris en compte divers événements climatiques, comme les excès saisonniers locaux de fréquence relativement éle-

vée (vague de froid de 1956, ou canicule de 2003) ni, du fait de leur durée, les changements climatiques du passé historique (refroidissement de l'Europe aux XVII^e et XVIII^e siècles) ni, *a fortiori*, les grandes glaciations quaternaires.

De la même façon, on n'a pas examiné des événements biologiques comme les grandes pandémies dont les causes sont complexes et fortement liées aux divers aspects des activités humaines.

Enfin, on a laissé de côté certains événements géophysiques très localisés résultant de circonstances très particulières, comme les ruptures de poches glaciaires ou les remontées brutales de certains gaz (CO₂, CH₄) piégés en solution en profondeur dans des lacs ou zones littorales.

La durée de préavis reste un paramètre de très grande importance. Elle dépend étroitement du niveau de connaissances du phénomène et de la mise en place de réseaux de mesure efficaces.

Un essai de classement des aléas, suivant la nature de la catastrophe, l'origine et la

source de l'énergie mise en œuvre et la durée de préavis a été réalisé sous la forme d'un tableau (voir p. 93). Il présente une certaine généralité, et offre une vision synoptique. A noter que le facteur énergétique n'est pas forcément pertinent partout. Tsunamis et

inondations ont des effets d'entraînement mécanique, de submersion et de noyade assez peu liés à l'énergie-; de la même façon, avalanches et glissements de terrain ont des effets d'enfouissement très destructeurs.

Il est nécessaire de progresser dans la connaissance de l'aléa pour mieux le prévoir, et s'efforcer de le prévenir ou, au moins, de l'atténuer. Parallèlement, il faut aussi réduire la vulnérabilité. Pour ce faire, l'ingénieur doit s'appuyer sur tout le corpus des savoirs amont fondamentaux.

Accroître les connaissances conduit à mieux maîtriser le risque

Il est nécessaire de progresser dans la connaissance de l'aléa pour mieux le prévoir, et s'efforcer de le prévenir ou, au moins, de l'atténuer. Parallèlement, il faut aussi réduire la vulnérabilité.

Pour ce faire, l'ingénieur doit s'appuyer sur tout le corpus des savoirs amont fondamentaux. Il lui faut constamment

Type d'aléa	Origine	Localisation	Effets		Durée du phénomène	Durée de préavis	Energie totale Joules	Densité d'énergie J/m ²
	Source de l'énergie		Locaux	Globaux				
Impact terrestre	Cosmique gravitaire	Planétaire	Explosion thermique mécanique	Climatiques biosphère	qq. s à qq. h	qq. h à qq. années	jusqu'à 4 x 10 ²³	jusqu'à 10 ¹³
Impact océanique	Cosmique gravitaire	Planétaire	Tsunamis inondation érosion	Climatiques biosphère	qq. s à qq. h	qq. h à qq. années	jusqu'à 4 x 10 ²³	de 10 ¹³ à qq. J/m ²
Eruption volcanique	Magma géothermique	Limitée à régionale	Thermiques asphyxie enfouissement	Climatiques	qq. h à qq. jours	qq. jours	jusqu'à 10 ²⁰	de 10 ² à 10 ⁸
Séisme	Plaques tectoniques	Variable zones sismiques	Mécanique	Très faibles à nuls	qq. s à qq. h	indéterminée	jusqu'à 10 ²⁰	faible
Glissement de terrain	Géomécanique gravitaire	Zones de relief	Enfouissement mécanique	Nuls	qq. min à qq. jours	qq. min à qq. années	jusqu'à 10 ¹⁵	de 10 ² à 10 ⁴
Tsunami	Séisme glissement de terrain impacts	Littoral	Submersion mécanique érosion	Très faibles à nul	qq. h	qq. min à qq. jours	jusqu'à 10 ¹⁶ à 10 ¹⁸	de 10 à 10 ³
Cyclone ouragan tempête	Météorologie rayonnement solaire	Planétaire	Mécanique	Très faibles à nuls	qq. h à qq. jours	qq. jours	jusqu'à 10 ²⁰	de 10 ² à 10 ⁵
Inondation	Météorologie rayonnement solaire	Vallées riv. littoral	Submersion mécanique érosion	Nuls	qq. h à qq. jours	qq. jours	jusqu'à 10 ¹⁶	de 10 à 10 ³
Avalanche	Météorologie rayonnement solaire	Vallées de montagne	Enfouissement mécanique	Nuls	qq. min	qq. min à qq. jours	jusqu'à 10 ¹³	de 10 ³ à 10 ⁴
Incendie de forêt	Météorologie combustion matières végétales	Zones boisées	Thermique asphyxie modification de la flore	Climatiques biosphère	qq. h à qq. jours	qq. heures	jusqu'à 10 ¹⁸	de 10 ⁴ à 10 ⁸

Tableau synoptique – Typologie des aléas.

Nota-:

- 1)-L'institut d'évaluation de la politique publique de prévention des risques naturels a regroupé les éruptions volcaniques, séismes et mouvements de terrain en risques géologiques et les cyclones et inondations en risques atmosphériques et risques d'eau. Il ne serait pas aberrant de rattacher, d'une part, les impacts aux risques géologiques et, d'autre part, les avalanches et feux de forêts (très liés au climat) aux risques atmosphériques.
- 2)-Ce tableau mériterait d'être amélioré. Un point important est la probabilité d'occurrence d'un aléa donné en un lieu donné, habité ou non.

s'inspirer des dernières avancées des chercheurs dans ce domaine, ses propres observations pouvant, en retour, alimenter très utilement leurs travaux.

L'exemple des crues et inondations illustre ce raisonnement. Les progrès des connaissances dans le domaine de l'hydrologie et de la météorologie ont permis de mieux comprendre la genèse des crues, et donc

de trouver les méthodes de prévision de leur occurrence et de leur propagation. En même temps, les observations des ingénieurs prévisionnistes, des aménageurs et des constructeurs d'ouvrages hydrauliques

sur le terrain alimentent les bases de données des chercheurs.

Le niveau des connaissances disponibles utilisables est toujours un élément fondamental. Remarquons qu'à cet égard, le terme même d'aléa peut se révéler trompeur. Dérivant du même mot latin, signifiant « coup de dés », il suggère dans le langage courant l'idée d'un risque commandé par le hasard et sur lequel on n'a guère de prise ; il n'y a pas si longtemps, la plupart des catastrophes étaient considérées comme imprévisibles et ne relevant que de la seule volonté divine. Or, nous le savons maintenant, tous ces phénomènes obéissent à des lois purement déterministes de la physique et de la chimie. En fait, c'est la multitude des interactions à tous les niveaux qui nous oblige à recourir aux statistiques et au calcul des probabilités pour en tirer des éléments globaux de connaissance.

Que faut-il pour bien connaître l'aléa ?

- ✓-une quantité suffisante de bonnes observations et de mesures de qualité-;
- ✓-un schéma théorique efficace pour décrire le phénomène-;
- ✓-un outil mathématique et informatique suffisant pour effectuer les calculs et écrire les codes permettant de modé-

liser les phénomènes sur ordinateur.

L'état des connaissances est assez variable, suivant le type d'aléa

Les impacts de météorites et d'astéroïdes

La mécanique de leur trajectoire, très complexe quand on désire une grande précision, est bien maîtrisée. Le problème réside dans un repérage précoce et un bon suivi, d'autant plus difficiles qu'ils sont plus petits, et donc plus nombreux. D'importantes recherches restent nécessaires pour mieux préciser les effets du freinage atmosphérique et les phénomènes d'explosion au moment des impacts. Quoique particulièrement destructeurs, les impacts importants sont rares. L'expansion continue des zones habitées accroît évidemment le risque.

Les phénomènes volcaniques

Les volcans sont bien répertoriés et les mécanismes de leur formation sont assez bien connus. Malheureusement, il subsiste de grandes lacunes dans la connaissance des paramètres et de la dynamique de leur formation et de leur évolution, tant au niveau des mesures qu'en ce qui concerne

la modélisation des phénomènes. Cela étant, on arrive à prévoir un risque d'éruption quelques jours ou quelques semaines à l'avance, quand la zone est suffisamment instrumentée. On sait très bien qu'un jour, le Vésuve se remettra en activité. Saura-t-on procéder aux évacuations nécessaires en quelques jours ?

Les séismes

Comme en matière de volcans, les connaissances fondamentales ont fait récemment de grands progrès. Les zones sismiques sont bien connues et elles commencent à être relativement bien instrumentées, tout au moins sur une partie des continents. Dans les régions habitées, on arrive à reconstituer des chroniques et des statistiques des séismes passés, assez fiables pour permettre de calculer des

probabilités de séismes futurs et donc de quantifier le risque. Mais on ne sait toujours pas les prévoir précisément, tant en localisation qu'en intensité, ne serait-ce que quelques heures à l'avance.

Les mouvements de terrain

La genèse des mouvements de terrain continentaux est bien connue. Ces phénomènes trouvent leur origine dans les structures géologiques et hydrogéologiques.

On arrive à prévoir un risque d'éruption quelques jours ou quelques semaines à l'avance, quand la zone est suffisamment instrumentée.

Leur déclenchement ainsi que leur évolution dépendent des conditions physiques (et parfois chimiques) locales des couches, elles-mêmes fonction de l'histoire météorologique locale. Leur dynamique est relativement bien décrite par des modèles basés sur les lois de la mécanique des sols et des roches. Certains, au départ très lents, peuvent être suivis avec précision mais leur mouvement peut s'accélérer brutalement; ils se transforment alors en quelques heures en un phénomène catastrophique (cas du glissement de terrain dans le réservoir de Vajont, dans le Haut Adige, en Italie du Nord, en 1964). D'autres démarrent très brutalement et sont souvent le résultat de fortes pluies localisées. Beaucoup de zones potentiellement dangereuses ont été répertoriées, tout au moins dans les pays développés.

Les glissements de terrain sous-marins sont beaucoup moins bien connus et les zones où ils risquent de se produire sont très mal (voire même pas du tout) répertoriées. Pourtant, ils peuvent générer des tsunamis destructeurs. Cet important champ de recherche reste largement ouvert.

Les tsunamis

Ce sont des ondes océaniques gravitaires de surface, se propageant à grande vitesse, d'une très grande longueur d'onde

associée à une amplitude, faible ou moyenne au large, mais qui sont susceptibles d'une très forte amplification (avec réduction de la longueur d'onde) à l'approche du rivage, selon les conditions isométriques et topographiques locales. Ils sont le plus souvent générés par des séismes sous-marins, mais ils peuvent aussi être causés par des glissements de terrain, sous la mer, ou du continent vers la mer. Les impacts océaniques d'astéroïdes, quoique beaucoup plus rares, peuvent également être à l'origine de tsunamis gigantesques.

La dynamique proprement dite des tsunamis répond directement aux lois de la mécanique des fluides et elle est aujourd'hui assez bien modélisée. Le phénomène générateur, en revanche, est le plus souvent impossible à prévoir avec précision (sauf dans le cas, très exceptionnel, d'un impact océanique). La prévention dépend donc de la détection précoce de ce phénomène générateur et de la mesure de la propagation, grâce à des réseaux de capteurs, en mer ou satellitaires.

Seul l'Océan Pacifique est à l'heure actuelle assez correctement équipé en ce sens. Des modélisations préalables per-

mettent de délimiter les zones dangereuses.

Le récent tsunami du 26 décembre 2004 a été causé par un séisme sous-marin proche de la côte, au nord-ouest de Sumatra. D'une amplitude d'un ordre de 0,50 m dans l'Océan Indien, il a engendré des vagues déferlantes d'un ordre de 10 mètres de hauteur sur les rivages thaïlandais.

On sait très bien qu'un jour, le Vésuve se remettra en activité. Saura-t-on procéder aux évacuations nécessaires en quelques jours-?

Les cyclones et les tempêtes

La climatologie et la météorologie sont les sciences de la Terre qui ont sans doute le plus rapidement progressé durant ces dernières années. Ceci tient sans doute au fait qu'elles sont indispensables à une bonne conduite de la plupart des activités humaines et en particulier à celle de l'économie.

Le comportement de l'atmosphère est commandé par les lois parfaitement connues de la mécanique des fluides, de la thermodynamique et des équilibres radiatifs. On dispose aujourd'hui de réseaux de mesure précis, fiables et relativement denses. Les méthodes de modélisation ont beaucoup progressé et leur principale limite se situe actuellement au niveau de la puissance de calcul nécessaire. Mais les mécanismes en jeu sont tellement complexes, à toutes les

échelles, qu'une prévision efficace n'est disponible qu'à l'horizon d'une ou deux semaines au maximum. Très souvent, ce délai se réduit à 3 ou 5-jours. Remarquons toutefois que d'importants progrès viennent d'être réalisés dans la modélisation des effets de ces phénomènes: vent, pluie, inondations. L'exemple du récent cyclone Katrina sur la côte sud des Etats-Unis l'a mis en évidence. Dès 2002 et surtout 2003, les premiers modèles avaient déjà montré que les digues de la Nouvelle-Orléans seraient submergées par une montée des eaux corrélative au passage d'un cyclone de niveau-4.

Les inondations

C'est le type de catastrophe le plus fréquent en France et celui qui génère le plus de dégâts. Bien que disposant d'assez peu de moyens, l'hydrologie a connu récemment des avancées spectaculaires, tant au niveau de l'instrumentation qu'à celui des méthodes et de la puissance de calcul disponibles. La mise en place de réseaux de radars météorologiques capables de quantifier la quantité d'eau pouvant précipiter sur une zone donnée et de bons modèles pluies/débits ont été des éléments

décisifs de cette percée. Mais l'hydrologie reste soumise aux mêmes incertitudes de prévision que la météorologie, à moyen et à long termes.

Les avalanches

Comme dans le cas des inondations, ce phénomène est étroitement lié aux conditions topographiques et météorologiques. Son déclenchement dépend des caractéristiques du manteau neigeux et de ses interactions avec la température, son déroulement étant régi par les lois des écoulements multiphasiques. Là encore, des progrès dans la modélisation ont permis d'avancer de façon significative dans

Les glissements de terrain sous-marins sont beaucoup moins bien connus et les zones où ils risquent de se produire sont très mal (voire même pas du tout) répertoriées. Pourtant, ils peuvent générer des tsunamis destructeurs.

la prévention et, dans une moindre mesure, dans la prévision. On est maintenant capable de définir avec une assez bonne précision les zones menacées et les périodes dangereuses. On en a acquis une certaine maîtrise en les déclenchant, au moment voulu, au moyen d'explosions contrôlées.

Les incendies de forêts

Cet aléa est très différent des précédents car il dépend d'une composante biologique essentielle – la couverture forestière – susceptible d'être générée par une action humaine. Il est très étroitement lié aux circonstances météorologiques – sèche-

resse, vent –, ce qui permet de prévoir le risque d'occurrence lorsque les conditions nécessaires sont réunies. On commence à savoir en modéliser le déclenchement et la propagation. Les zones dangereuses peuvent être cartographiées. Enfin il existe diverses techniques susceptibles de diminuer l'aléa, qui sont bien connues: variété des essences, cloisonnement par des coupe-feux, débroussaillage et entretien du massif, mise en place d'un réseau suffisant de pistes, de routes d'accès, de tours de surveillance, de réserves d'eau, disponibilité de moyens de lutte terrestres et aériens suffisants. Dans l'avenir, la surveillance pourrait encore être largement améliorée, grâce à des réseaux de détecteurs automatiques.

Peut-on espérer maîtriser progressivement de plus en plus d'aléas-?

Le rapide progrès des connaissances, qu'on vient de rappeler, ne doit pas conduire à penser qu'il serait désormais possible, à plus ou moins long terme, d'échapper à une grande partie des catastrophes naturelles.

Un système efficace de détection des astéroïdes dangereux, couplé à un dispositif capable d'assurer leur destruction ou leur déviation, est techniquement envisageable, mais demandera encore de longs développements (dans un cadre proche de celui des recherches militaires). Quoiqu'il en soit, il restera très coûteux et il risque de se heurter à des obstacles psychologiques et politiques redoutables (utilisation massive de l'énergie atomique et d'explosifs nucléaires, de surcroît dans l'espace-!). Cela étant, il restera longtemps illusoire de vouloir repérer et arrêter les plus petits d'entre eux. Un bloc d'une soixantaine de mètres de diamètre, en explosant à une dizaine de kilomètres d'altitude, a écrasé et brûlé près de 2-000-km² de forêt sibérienne en 1908 (événement de Tugunsk). Même avec les moyens actuels, il serait resté pratiquement indétectable jusqu'à quelques minutes avant l'impact.

Il n'y a aucun moyen connu (ou prévisible) d'éviter une éruption volcanique. On peut évidemment définir une zone de sécurité autour des volcans les plus dangereux et dissuader les populations de s'y installer. L'exemple de Naples, qui continue à se développer près du Vésuve, illustre les difficultés de l'entreprise. Reste la mise en place d'un système de détection efficace et d'un très bon

plan d'évacuation. Les difficultés d'évacuation de la Nouvelle-Orléans et de Houston, lors des récents cyclones du golfe du Mexique, ont montré que ce genre de transfert n'était pas particulièrement facile à gérer.

Il n'existe pas, non plus, un quelconque moyen d'empêcher les séismes, les cyclones et les tempêtes et *a fortiori* les tsunamis. Les zones menacées sont d'ailleurs tellement vastes qu'il est évidemment impossible d'y interdire les activités humaines.

Là encore, il faut se rabattre sur la détection et l'évacuation. Toutefois, on verra plus loin qu'on peut agir sur la vulnérabilité et qu'il s'agit là d'un travail d'ingénieur proprement dit.

En revanche, en ce qui concerne les inondations, les avalanches, les mouvements de terrain et les incendies de forêts, il existe déjà divers moyens d'atténuer l'aléa, tant en fréquence qu'en amplitude et il subsiste, à l'évidence, de larges marges de progrès possibles. Parallèlement, les autorités mettent en place des procédures légales et administratives afin de définir les zones dangereuses et d'y limiter (voire d'y interdire) l'implantation d'habitations ou d'entreprises. Dans un monde idéal, il devrait y avoir un équilibre entre le coût des mesures de protec-

tion et celui du risque qu'elles sont censées éviter. Il n'est pas facile à réaliser: il s'agit d'un problème de gouvernance et de politique, au meilleur sens de ce terme.

Quoiqu'il en soit, il est pratiquement impossible de maîtriser les phénomènes extrêmes.

Par exemple, en ce qui concerne la région parisienne, on sait bien qu'en dépit des importants travaux hydrauliques et des réservoirs réalisés, ainsi que des nombreuses mesures législatives et régle-

mentaires adoptées, une inondation, analogue hydrologiquement à celle de 1910 (qui n'est pourtant pas la plus grande crue connue de la Seine), entraînerait d'énormes difficultés de gestion et aboutirait à des coûts financiers très supérieurs aux disponibilités du fonds d'assurance des catastrophes naturelles.

Connaissance scientifique et typologie de la vulnérabilité

La vulnérabilité représente la sensibilité d'une zone à la manifestation d'un aléa. Théoriquement, elle pourrait se définir par une fonction reliant

l'ampleur des dégâts à l'intensité de l'aléa (par exemple, lors d'une inondation, le coût des réparations, suivant la hauteur et la durée de la montée des eaux). En fait, il est très difficile d'établir des fonctions de ce genre, même sous forme de barèmes. Les compagnies d'assurances essaient de les mettre au point et elles en utilisent des versions approximatives.

La vulnérabilité est évidemment liée à l'importance de l'occupation humaine du site considéré. Sauf pour les très gros impacts d'aérolithes et les grandes éruptions volcaniques, la plupart des catastrophes naturelles n'ont que des effets géomorphologiques et environnementaux mineurs, dans des régions non habitées. Cependant, l'augmentation de la population mondiale et la concentration urbaine croissante des populations, des services et des moyens de production rendent les villes de plus en plus étendues et donc, vulnérables. Les villes ont elles-mêmes tendance à se regrouper le long d'axes privilégiés comme les vallées fluviales ou certaines zones littorales, aboutissant à des concentrations de concentrations urbaines, encore

plus sensibles aux inondations, ouragans et autres tsunamis...

Une typologie des vulnérabilités

Dans l'ouvrage «-Les catastrophes naturelles, le grand cafouillage-», P.H.-Bourrelier *et al.* distinguent les vulnérabilités-:

- ✓-humaine, correspondant au sort des hommes-;
- ✓-matérielle, correspondant au sort des biens-;
- ✓-fonctionnelle, liée à la gestion des systèmes socio-économiques-;
- ✓-environnementale, qui concerne les écosystèmes naturels et artificiels.

On constate qu'il s'agit bien, pour les trois premières et, en partie, pour la quatrième, de la vulnérabilité des établissements humains. En ce qui concerne les écosystèmes naturels, nous savons aussi que, bien avant l'homme, les grands événements destructeurs ont été des facteurs importants du modelage de la planète et de l'évolution de la biosphère (formation du relief et des réseaux hydrographiques, grandes extinctions d'espèces, etc.). En toute rigueur, la vulnérabilité environnementale devrait n'être prise en considération que dans ses effets sur les

sociétés humaines. Protéger la biosphère des effets des catastrophes naturelles, à seule fin de garantir sa stabilité – considérée comme bonne en soi – reviendrait en effet à donner à l'homme le rôle de gardien et de protecteur d'un état présent, qu'on chercherait à préserver. Prendre ce parti serait faire un choix philosophique – pour ne pas dire idéologique – sur lequel il y aurait beaucoup à dire...

Parallèlement, il semble qu'on puisse faire une autre distinction entre une vulnérabilité « intrinsèque-», et une vulnérabilité aux contours plus flous, qu'on pourrait qualifier de « zone-».

✓-La vulnérabilité intrinsèque est liée à la résistance propre et immédiate vis-à-vis de la catastrophe, par exemple la capacité d'un bâtiment à résister à un séisme, de par sa conception et construction. Elle est aisée à définir et chercher à la diminuer relève essentiellement du travail de l'ingénieur.

✓-La vulnérabilité de zone est liée à la position géographique ou topographique de l'entité concernée, par rapport aux zones menacées par l'aléa. Une construction légère, très proche du rivage, sera inmanquablement détruite par un tsunami-; la même construction, en haut d'une colline proche, ne risquera rien. On le voit-: ce

On peut évidemment définir une zone de sécurité autour des volcans les plus dangereux et dissuader les populations de s'y installer. L'exemple de Naples, qui continue à se développer près du Vésuve, illustre les difficultés de l'entreprise.

deuxième type de vulnérabilité dépend directement des zones d'influence de l'aléa.

La vulnérabilité humaine dépend très étroitement des vulnérabilités matérielles et socioéconomiques.

La vulnérabilité matérielle. Sa réduction dépend du niveau de connaissance des aléas, du potentiel technologique et économique, et de la volonté politique. La mise en œuvre des techniques disponibles et le développement des techniques nouvelles restent essentiellement des questions d'ingénierie à résoudre pour des ingénieurs.

✓-Vis-à-vis des impacts ou des éruptions volcaniques la vulnérabilité reste totale dans la zone touchée et cette situation ne semble pas améliorabile dans un futur prévisible.

✓-Vis-à-vis des mouvements de terrain, il y a très peu de possibilités de protection, sauf pour les tout petits phénomènes, et la meilleure solution reste l'évacuation hors zone.

✓-Vis-à-vis des séismes, des inondations et des tsunamis (à l'exception des tsunamis géants, très rares), les possibilités d'amélioration dans le domaine des bâtiments et des équipements sont considéra-

bles. Elles sont loin d'avoir été toutes exploitées et la mise en œuvre en est surtout limitée par le manque de volonté politique et de disponibilités budgétaires. Toutefois, dans ce domaine, les progrès sont constants.

✓ Vis-à-vis des tempêtes et des ouragans, la situation ressemble beaucoup à la précédente, à la différence notable des surfaces menacées, bien plus vastes, ce qui accroît les coûts de protection et rend plus difficile les prises de décisions.

✓-Vis-à-vis des avalanches, il est très difficile de protéger efficacement les installations. Sauf à diminuer l'aléa, la solution consiste à construire dans des zones moins menacées, ce qui, en général est possible, compte tenu du nombre relativement limité des couloirs d'avalanches.

✓-Vis-à-vis des feux de forêts, la vulnérabilité des bâtiments peut être fortement atténuée, grâce à des mesures d'urbanisme assez simples et des dispositions temporaires relativement faciles à mettre en œuvre (arrosage des toits et des murs). Globalement, la meilleure méthode consiste à diminuer l'aléa et à éviter les

constructions en zone dangereuse.

La vulnérabilité fonctionnelle est étroitement liée à la vulnérabilité matérielle ainsi qu'à la robustesse et à la résilience des structures socioéconomiques. Ce dernier point sort de notre thème. Notons toutefois qu'il faut éviter les effets « dominos-» et toujours prévoir des solutions de secours à chaque niveau. Bien évidemment, ces structures ne peuvent continuer à fonctionner que si leurs équipements restent en état de marche. Ayons en mémoire la panne généralisée du central radio de la police de la Nouvelle-Orléans, lors du cyclone Katrina, dont les conséquences se sont avérées très lourdes. Privé d'électricité, il était alimenté par un générateur de secours... bientôt en panne, car fonctionnant lui-même au gaz naturel, dont le réseau avait été très rapidement mis hors d'usage. Ce type de panne s'est produit de très nombreuses fois dans le passé, lors de diverses catastrophes, dans beaucoup de pays. Il provient du fait que les spécialistes chargés de mettre en place les équipements de transmission n'ont le plus souvent aucune idée de la vulnérabilité de leur propre système, en l'absence de contrôle effectué par un ingénieur ayant une vision globale du risque.

La *vulnérabilité environnementale* se décline comme la vulnérabilité matérielle. Les techniques pour la diminuer font partie intégrante d'un secteur généralement mal connu de l'ingénierie, appelé «-génie écologique-». Ce concept, qui va bien au-delà du simple génie de l'environnement, vise à intégrer aussi bien que possible les divers types d'agricultures et de sylvicultures dans les mécanismes de la biosphère, sans en appauvrir le patrimoine. Le potentiel de réalisations et de progrès dans ce domaine est considérable, les principales difficultés de mise en œuvre provenant surtout des idées reçues et du man-

que de compétences disponibles. Rappelons, à titre d'exemple, que le simple retour à un état de nature de zones non exploitées aboutit rarement à un résultat intéressant: forêts et maquis provençaux, laissés à eux-mêmes, ont une forte propension à brûler, ce qui – généralement – n'est pas souhaité.

La *vulnérabilité de zone* est très variable. Mais elle dépend directement de la nature de l'aléa et de la vulnérabilité intrinsèque. Certains aléas ont des effets en cascade, pouvant aller bien au-delà de la superficie direc-

tement touchée: les impacts d'astéroïdes et les éruptions volcaniques peuvent engendrer des séismes et des tsunamis, les séismes et les mouvements de terrain causent également des tsunamis, voire même parfois des inondations. D'autres ont des effets plus ou moins fortement décroissants en fonction de la distance (ouragans, inondations) ou bien – presque toujours – limités à la zone touchée (avalanches, feux de forêts).

La vulnérabilité de zone est très variable. Mais, à court terme, les effets d'un aléa peuvent être largement démultipliés par une vulnérabilité socioéconomique excessive ou, à long terme, par la vulnérabilité environnementale.

La vulnérabilité de zone est évidemment fortement modifiée par les tentatives de maîtrise de l'aléa. Cet aspect est particulièrement net en matière d'inondations. L'installation de zones d'expansion et de sur-stockage à l'amont d'une rivière, va faire baisser, pour une situation hydrologique donnée, l'amplitude et la probabilité de la crue qui en aurait résulté. Dans les zones inondables, cela pourra entraîner une demande accrue de construction et d'urbanisation, fermement refusée (à juste titre) par l'administration, tout au moins

Mais, à court terme, les effets peuvent être largement démultipliés par une vulnérabilité socioéconomique excessive ou, à long terme, par la vulnérabilité environnementale.

en France. Là encore, il s'agit d'un travail d'ingénieur (maîtrise et modélisation des effets de l'aléa), mais aussi d'un problème – politique – d'aménagement du territoire.

Tout cela ne fait que souligner la nécessité d'une vision synthétique, voire même holistique, de la catastrophe naturelle et de ses effets.

En conclusion

Mieux connaître les mécanismes des catastrophes naturelles, c'est mieux savoir s'en protéger.

Le corpus des connaissances, déjà considérable, reste malheureusement fortement éparpillé entre des disciplines scientifiques extrêmement variées et il présente de nombreuses lacunes. Le potentiel de progrès, énorme, nécessitera un important effort de recherche dans les sciences de l'univers, de la terre et de la vie. Les ingénieurs doivent participer à cette quête, non seulement par le retour des observations de terrain et l'orientation qu'ils peuvent donner à leurs travaux, en fonction de l'urgence et des exigences socioéconomiques, mais aussi grâce à leur vision synthétique des problèmes, qui est susceptible de compenser les effets négatifs

de l'hyper-spécialisation des chercheurs.

Diminuer les vulnérabilités est un impératif évident, d'autant plus urgent que la population de la planète s'urbanise rapidement. Cela nécessite toujours, au départ, une analyse détaillée et approfondie des aléas. Réduire les vulnérabilités matérielles reste un travail d'ingénieur basé sur toutes les techniques déjà disponibles et qui doit fortement s'appuyer sur des recherches appliquées efficaces. Le savoir-faire est déjà considérable en matière de génie civil et de technique hydraulique. Il est certainement plus important et mieux réparti dans ce domaine que dans d'autres. Quoiqu'il

en soit, toutes les nouveautés intéressantes devraient pouvoir être mises en œuvre très rapidement. Les obstacles et les retards proviennent de lourdeurs dans la diffusion et dans la transmission des connaissances. Mais ils peuvent avoir aussi pour cause des décisions politiques et économiques à courte vue, visant à rechercher d'abord le coût immédiat minimum, sinon le profit maximum et s'efforçant

de ne pas trop perturber les populations dans leurs habitudes de vie et de pensée.

En définitive, une des formes de vulnérabilité les plus dangereuses – car la moins bien connue – est certainement d'ordre socioéconomique. Elle est, en effet, la plus difficile à étudier et les retours d'expériences dégénèrent, au moins à court terme, en polémiques partisa-

Les ingénieurs doivent participer à cette quête des connaissances, non seulement par le retour des observations de terrain et l'orientation qu'ils peuvent donner à leurs travaux, en fonction de l'urgence et des exigences socioéconomiques, mais aussi grâce à leur vision synthétique des problèmes, qui est susceptible de compenser les effets négatifs de l'hyper-spécialisation des chercheurs.

nes et en jeux de pouvoir, totalement stériles, sinon négatifs. Dans ce domaine, les essais d'amélioration ne peuvent être faits qu'en vraie grandeur. Une organisation efficace des structures administratives et sociales est d'autant plus difficile à mettre en place. Pour progresser, il faut du temps, une vision claire du but à atteindre et de la ténacité.

En France, deux exemples montrent qu'il est possible d'y parvenir. Le Comité technique permanent des barrages (CTPB), créé en 1958, à la suite de la rupture du barrage de Malpasset, contrôle, entre autres vulnérabilités, la sensibilité des ouvrages hydrauliques à divers types de risques naturels. Depuis lors, il a fonctionné de façon efficace, en intégrant à

ses procédures les progrès techniques et scientifiques disponibles. Sur un plan plus large, la mise en œuvre progressive des plans de protection contre les risques, en particulier dans le domaine des inondations (PPRI), s'avère une réussite car elle dote l'administration d'un outil très puissant, qui permettra de limiter les dégâts et le nombre des sinistrés des futures catastrophes.

Pour tous les types de vulnérabilité, les opportunités de progrès sont nombreuses et prometteuses. Les décideurs doivent savoir tirer profit de l'émotion née des désastres, afin de lancer les recherches, les travaux et les réformes nécessaires.