

# Des événements naturels extrêmes aux figures de la catastrophe

**Les grands événements climatiques occupent une place privilégiée parmi les mythes sur la naissance et la destruction du monde. Le déluge de la Bible a son équivalent dans toutes les religions. Il n'est donc pas surprenant que l'annonce du changement climatique provoque une véritable renaissance des prédictions apocalyptiques au sens propre, c'est-à-dire de révélations...**

par Paul-Henri BOURRELIER\* et Jean DUNGLAS\*\*

Dans cet article, nous partirons d'une expression couramment utilisée pour en débrouiller la signification et, à partir d'elle, nous tirerons le fil de la catastrophe.

## Les événements extrêmes

Les textes sur le changement climatique emploient très fréquemment le terme d'« événement extrême » (*extreme event*, en anglais). Mais, curieusement, aucune analyse n'en est généralement fournie. Le 4<sup>e</sup> rapport de synthèse du GIEC répare heureusement cette lacune en définissant l'événement météorologique (*weather event*) extrême comme « rare en un lieu et à un moment particulier de l'année » et en indiquant qu'il devient un événement climatologique extrême s'il persiste un certain temps, particulièrement s'il se traduit par une moyenne elle-même rare (1).

Cette définition ne précise pas la nature des « événements » pris en compte. La gamme des paramètres climatiques est large et inclut les températures saisonnières, la vitesse du vent, les précipitations, les déficits hydriques, les pointes de pollution, par exemple. Il n'y a pas de seuil ou de limite dans la durée : ainsi, une pluie intense peut correspondre à une précipitation produite en quelques minutes, une heure, ou une journée ; une sécheresse à un déficit d'eau durant un mois, une saison ou plusieurs années ; l'événement peut se produire abruptement, mais son déroulement peut englober des moments précurseurs et/ou des phases ultérieures longues. Par ailleurs, la même notion événementielle extrême s'applique aussi aux effets résultant des aléas : victimes corporelles et dommages, pandémies, disparitions d'espèces, impacts sur les écosystèmes, etc.

De même que dans d'autres domaines (l'état sanitaire, la Bourse, les paramètres de l'économie, par exemple), la façon opérationnelle d'aborder cette notion d'extrême consiste à suivre la série des valeurs

de paramètres mesurés périodiquement. Les observations sont affectées d'aléas – des variations imputées au hasard ou à des causes inconnues. On peut alors dessiner le diagramme valeurs/fréquence (en coordonnées logarithmiques, de préférence : on verra plus loin pourquoi) et caractériser comme extrêmes les événements correspondant aux extrémités de celui-ci (2).

Le poids des événements extrêmes dépend fondamentalement de la loi de distribution statistique. Si celle-ci est une courbe en cloche classique du type de celle de Gauss (3), les événements deviennent extrêmement rares dès lors que l'on s'écarte notablement de la valeur moyenne, si bien que l'indicateur « intensité x probabilité » chute rapidement ; il est alors raisonnable, pour traiter le risque, de prendre en considération l'ensemble des événements courants et extrêmes, en négligeant ceux qui seraient absolument exceptionnels. Mais il existe aussi des distributions non gaussiennes, représentées par des « lois de puissance », telles que l'intensité des événements extrêmes s'accroît au point de compenser la diminution de leur probabilité – le couple « intensité x probabilité » ne diminue que lentement lorsqu'on se déplace vers la « queue » de la courbe. Il y a même des distributions telles qu'un seul événement exceptionnel nouveau peut être plus important que tous les événements (courants et extrêmes) observés jusqu'alors.

Certaines observations et la répétition des crises laissent à penser que ces distributions menaçantes des extrêmes se présentent plus souvent qu'on ne le croit (4). Il convient donc de surveiller ces « queues de distribution », en mesurant la pente de la courbe, qui permet, de façon simple, de faire la discrimination.

## Changement et aléas climatiques

Certains aléas naturels, météorologiques et climatiques notamment, (ou leurs impacts) sont-ils à classer

dans la catégorie des extrêmes les plus menaçants ? Oui, sans doute, si l'on se réfère au passé (5). Mais la difficulté pour les caractériser réside actuellement dans la méconnaissance, très fréquente, des « queues de distribution », constituées par des événements rares et intenses. Pour en avoir une représentation significative, il faudrait disposer d'observations sur une longue durée, ce qui supposerait, à la fois, que les conditions aient été stables et que des mesures d'une qualité appropriée aient été réalisées. Mais ces deux exigences sont rarement respectées, parce que l'instrumentation précise est récente (il en est ainsi de tout ce qui est obtenu par télédétection) et/ou parce que les conditions ont changé. Toutefois, les reconstitutions de séries s'allongent et s'améliorent, grâce aux travaux des historiens et à des techniques modernes d'investigation et de datation, qui permettent en outre des rapprochements avec les catastrophes des époques anciennes, voire des ères géologiques (6).

Notre attention est actuellement focalisée sur l'évolution séculaire provoquée par l'augmentation (continue depuis la révolution industrielle) des émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Cet effet de « forçage » se superpose à ceux résultant de cycles de longue durée (se comptant en dizaine de milliers d'années) produits par l'évolution astronomique des positions relatives de la Terre et du Soleil, des cycles plus courts des émissions solaires (le principal étant d'une durée de l'ordre de onze ans), et, enfin, des oscillations océaniques (avec une périodicité de 60-70 ans, à laquelle s'ajoutent des périodicités de quelques années).

En réalité, il y a encore d'autres effets à identifier car, après être partis des systèmes météorologiques fondés sur les paramètres physico-chimiques de l'atmosphère couplés avec ceux des océans, nous devons également intégrer non seulement les systèmes hydrologiques, pour lesquels de nombreux problèmes ne sont pas encore complètement résolus (7), mais aussi les systèmes continentaux, beaucoup plus morcelés, avec des constantes de temps d'évolution beaucoup plus longs (à l'aune de phénomènes comme l'érosion, les dépôts sédimentaires, la tectonique des plaques et les systèmes biologiques) (8).

L'ouverture de l'éventail des temps est impressionnante et le choix de l'échelle temporelle peut changer considérablement les perspectives : à une échelle suffisante, l'émission de CO<sub>2</sub> peut être considérée comme une simple « bulle », qui n'aura duré « que » trois siècles, le temps d'exploiter les ressources énergétiques fossiles de la planète ; l'oscillation climatique se prolongera, quant à elle, sur quelques milliers d'années et s'achèvera sur un retour aux mouvements antérieurs, en laissant des traces, comme des dépôts carbonatés au fond des océans et une accentuation temporaire de la disparition d'espèces.

On voit combien la description de ces variations spatiales et temporelles se complexifie au fur et à

mesure que l'analyse devient plus fine et que les modèles intègrent des phénomènes de plus en plus nombreux. Mais c'est au prix de cette complexification que l'on obtient une meilleure coïncidence entre les valeurs produites par les modèles et les données résultant d'observations passées.

L'hypothèse de stationnarité climatique (utilisée de manière sous-jacente pour définir et quantifier les aléas) apparaît donc simplificatrice et, au fond, peu pertinente. En effet, le cours du temps se traduit à la fois par des dérives continues et des cycles, d'un côté, et des moments singuliers, des « événements », ruptures et bifurcations, de l'autre (9).

### **Des aléas climatiques extrêmes d'une nature inédite**

Dans quelle mesure le changement climatique peut-il modifier les aléas extrêmes, voire en créer de nouveaux ? Il convient, pour répondre à cette question, de distinguer entre trois catégories de phénomènes, de nature différente :

■ **Les valeurs extrêmes des paramètres climatiques.** Celles-ci varieront, dans chaque zone, de la même manière que les valeurs moyennes, avec un facteur correctif correspondant à l'évolution de la variabilité. Ainsi, pour prendre l'exemple le plus simple, l'augmentation moyenne de la température provoquerait un décalage équivalent des extrêmes de chaleur, si la variabilité ne changeait pas. **La canicule de 2003 à Paris, qui a été classée comme événement extrême, deviendrait courante en 2100, tandis que serait considéré comme événement extrême le genre de canicule qui menace aujourd'hui des villes (françaises) plus méridionales. A l'inverse, les aléas de froid seraient moins sévères.**

Cependant, certaines études (comme par exemple, en France, celle de l'IMFRET) tendent à accréditer la possibilité d'un accroissement de la variabilité climatique et, donc, d'une augmentation plus importante des températures extrêmes d'été, et d'une moindre réduction des froids extrêmes.

Ces extrêmes apparaissent ainsi comme des précurseurs ou des révélateurs des modifications moyennes : ils anticipent (ou ils concrétisent, subitement) de lents processus de destruction et d'adaptation. Ainsi en est-il de l'intensification des épisodes de sécheresse dans les pays du pourtour méditerranéen, qu'annoncent les modèles climatologiques.

■ **Les « risques naturels » classiques, tels que les tempêtes et les cyclones, les pluies intenses et les crues, la submersion des rivages et l'érosion marine, les avalanches, certains mouvements de terrain, etc.** Ces phénomènes résultent d'une dissipation, subite et chaotique, d'énergie accumulée, dont une représentation analogique simple peut être fournie par le déclenchement inopiné d'avalanches sur la pente d'un tas de sable, sur lequel on verse continûment des grains (10).



© Yan Arthus-Bertrand/ALTITUDE

« En France métropolitaine, le risque de grandes crues débordantes pourrait se réduire, mais des crues rapides, sur de petits bassins, pourraient devenir plus fréquentes... » Paysage inondé par la Saône, entre Lux et Saint-Loup-de-Varenne, Saône-et-Loire.

On doit, le plus souvent, recourir à l'échelle logarithmique pour en mesurer l'intensité, ce qui laisse suspecter que les extrêmes destructeurs suivent parfois une distribution non gaussienne.

L'effet du changement climatique global sur ces événements n'est pas clair ; il ne peut être évalué, pour chaque phénomène, qu'en établissant des modèles à une échelle appropriée et en reconstituant des événements anciens.

Ainsi, l'impact du changement climatique sur les cyclones tropicaux fait l'objet d'une controverse, que reflète le dernier rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat (GIEC). Certes, l'augmentation de la température de surface des océans est favorable à une cyclogenèse intensive, mais les estimations de la fréquence annuelle des ouragans et de leurs changements possibles de trajectoire et d'intensité dépendent du type de modèle utilisé. Les résultats obtenus sont souvent contradictoires, en particulier dans le cas de l'Atlantique nord.

En France métropolitaine, le risque de grandes crues débordantes pourrait se réduire, mais des crues rapides, sur de petits bassins, pourraient devenir plus fréquentes, tandis qu'un accroissement des teneurs en vapeur d'eau de l'atmosphère, consécutif à l'élévation des températures, peut laisser craindre des précipitations brèves de grande intensité, génératrices de ruissellements urbains extrêmes. Les aléas sur le littoral

résultant des tempêtes, des vagues et des marées seraient accrus par la hausse continue du niveau de la mer.

Les feux de forêt et de brousse dépendent des quantités de biomasse sèche et du vent : tant l'intervention de l'homme (en particulier le manque d'entretien et le « mitage » des massifs forestiers résultant d'une urbanisation incontrôlée) que le changement climatique sont susceptibles d'en favoriser la multiplication.

■ **De grandes ruptures, dont on soupçonne que la menace s'accroîtra si l'accumulation dans l'atmosphère de gaz à effet de serre se poursuit. La possibilité d'un emballement de l'effet de serre, en raison de la libération de grandes quantités de méthane retenues actuellement dans les zones du permafrost, ou encore de modifications importantes des grands courants océaniques, par suite de l'irruption de masses d'eau douce produite par la fusion accélérée de la couverture glaciaire du Groenland, sont ainsi soulevées (11).**

Ainsi, les répercussions du changement climatique sur les extrêmes sont différentes, et prévisibles à des degrés divers, en ce qui concerne ces trois catégories, mais elles sont toujours préoccupantes, ce qui justifie l'attention qui leur est portée par l'Académie des sciences et par le GIEC. L'adaptation (subie ou anticipée) en dépendra considérablement.



© Yan Arthus-Bertrand/ALTITUDE

« Un cas exemplaire est celui du risque cyclonique sur les côtes de Floride et de Louisiane. [...] L'extension continue des constructions peu résistantes et l'afflux des retraités qui s'installent, expliquent l'explosion des dommages sur l'ensemble de la côte. » Key West, Floride, Etats-Unis.

### Les figures de la catastrophe globale

C'est bien le paradoxe : aujourd'hui, les catastrophes « naturelles » sont les événements qui frappent le plus l'opinion. Pourtant, elles ne représentent rien de nouveau sous le soleil, et l'humanité est (en principe) mieux armée qu'elle ne l'a jamais été pour faire face aux menaces d'aléas extrêmes, tant que ceux-ci restent relativement ponctuels, d'une étendue géographique et d'une puissance limitées.

Mais l'image des catastrophes de l'histoire de la terre, des grandes extinctions, fonctionne comme un révélateur d'inquiétudes, de menaces cachées allant jusqu'à celle de la disparition possible de l'espèce humaine, tandis que l'inflation des indemnités versées par les assureurs pour les grandes catastrophes (une inflation bien supérieure, au cours des vingt dernières années, à la croissance des valeurs assurées) vient confirmer ces inquiétudes prémonitoires.

L'explication réside dans la vulnérabilité du système social, qui préside à la transformation de l'aléa en risque.

✓ Un cas exemplaire est celui du risque cyclonique sur les côtes de Floride et de Louisiane. Plusieurs ouragans, comme celui de Katrina, sont déjà passés, au cours des deux derniers siècles, dans la région de la Nouvelle-Orléans ; l'urbanisation des zones basses, la ségrégation sociale, l'installation

d'usines, le développement d'un réseau de digues plus ou moins bien entretenues sont les causes du dernier désastre (août 2005). L'extension continue des constructions peu résistantes et l'afflux des retraités qui s'installent, expliquent l'explosion des dommages sur l'ensemble de la côte. Comme le montrent Zajdenweber et Michel-Kerjan, le diagramme dommages/fréquence s'est transformé, dans sa partie extrême. Un accroissement de l'aléa extrême ajouterait un surplus de risques.

✓ Le problème de la santé face au risque d'épidémie n'est pas moins instructif, avec les effets de la multiplication des voyages et des transports, la densification des élevages et les modifications des milieux naturels.

✓ Un autre exemple typique de vulnérabilité, à une échelle encore jamais connue, est celui des mégapoles de certains pays pauvres du Sud ; et, même dans le monde riche, certains projets, lancés sans prise en considération très instrumentée des risques et de la fragilité des réseaux, ne peuvent qu'apporter du crédit à de sombres pronostics.

Les vulnérabilités systémiques sont la vraie cause des menaces qui pèsent actuellement sur l'avenir d'un monde globalisé, uniformisé et limité (12), qui ne peut assurer qu'à ce prix – et jusqu'à quand ? – la croissance de la population et un modèle de consommation gaspilleur : consommation en énergie, réduction des

surfaces arables, besoins en eau, atteintes à la biodiversité. Ce n'est pas que la société mondialisée soit frappée d'une malédiction malthusienne (car elle a la capacité technique d'y échapper) (13), mais elle se comporte comme une caisse de résonance de chocs qui, amplifiés par les mécanismes financiers et le comportement des médias, se propagent à grande vitesse, alors que l'adaptation indispensable est prise en charge par un monde désuni et trop lent à réagir. Gagnants et perdants ne mutualisent pas les impacts. Le spectre de futures migrations climatiques (pour partie, fantasmé, et pour partie, réaliste) crispe l'opinion et paralyse les décideurs.

Dans une telle situation, les aléas ne doivent plus être considérés de façon isolée. D'ailleurs, les actions de réduction des risques (qu'ils soient extrêmes ou ordinaires) comportent des aléas en ce qui concerne l'exposition, la résistance ainsi que le comportement des personnes et des biens, l'efficacité des protections, les vecteurs et l'étendue des menaces, le fonctionnement de l'alerte et l'acheminement des secours... Les accidents se produisent, soit lorsque l'intensité de l'aléa originel atteint un niveau d'intensité « anormal » (mais pas forcément extrême) (14), soit parce que des cibles (des personnes, des biens, certains éléments des écosystèmes) se sont trouvées exposées, affaiblies et mal protégées.

Les aléas climatiques extrêmes n'en demeurent pas moins, comme par le passé, des détonateurs particulièrement puissants et spectaculaires : ce sont des signaux avertisseurs.

### Une boîte à outils pour affronter les risques de catastrophes

Une pratique internationale (plus ou moins codifiée) de la gestion de risques naturels de dimension catastrophique s'est mise en place, depuis le lancement par l'ONU de la Décennie de la prévention, en 1990. Cette pratique repose sur une identification des risques et vise à en réduire les impacts grâce à un ensemble d'actions constituant la DRR (*Disaster Risk Reduction*), qui combine des actions de protection et d'atténuation, des actions de gestion de crise et des actions visant au renforcement de la résilience (15).

En matière d'aléas naturels bien identifiés et cartographiés, le choix peut idéalement comporter l'adoption (concertée, *via* un processus public de prise de décision) de mesures calées sur un aléa de référence. Le principe est de limiter l'exposition et la vulnérabilité à cet aléa (et aux aléas de moindre amplitude), tout en laissant à chacun ses responsabilités et la possibilité de mutualiser ses pertes résiduelles grâce à une assurance. Le risque de voir se produire un aléa (éventuellement extrême) d'intensité supérieure et donc plus dommageable, doit être pris en considération et être soit accepté, soit traité (16).

L'adaptation au changement climatique présente une composante commune avec la gestion des risques ainsi organisée. C'est là un fait admis, mais l'articulation exacte entre les deux reste à définir, car beaucoup d'actions d'adaptation ne reposent pas sur la prise en considération de risques et, par ailleurs, il existe des aléas naturels qui n'ont rien à voir avec le climat. Dans le domaine commun, il y aura lieu de distinguer, plus nettement que cela ne l'a souvent été fait par le passé, les adaptations aux changements courants, avec leurs risques (17), qui relèvent, pour l'essentiel, de la société civile (particuliers, professionnels, collectivités locales) et les risques extrêmes, qui doivent faire l'objet d'une gouvernance publique mondiale (18).

La réduction des aléas catastrophiques proprement dits est un des buts principaux de l'atténuation de l'effet de serre (19) : cette atténuation consiste en la diminution de la pression s'exerçant sur les ressources et les écosystèmes, grâce à des mesures de conservation et/ou d'aménagement et grâce, aussi, à des ruptures technologiques, concertées à l'échelle mondiale, à l'infléchissement de la croissance démographique et à l'éducation.

### Agir et prendre des initiatives en France

En constituant sa plateforme nationale de DRR et en collaborant avec ses partenaires (notamment européens), la France entend participer pleinement à la mobilisation mondiale. Elle a une tradition de l'action publique et une compétence à valoriser (mais aussi, certaines faiblesses à corriger) pour s'adapter aux nouvelles dimensions des menaces. Citons cinq domaines particulièrement significatifs, dans lesquels elle est bien placée pour prendre des initiatives :

- ✓ la vigilance (*Early warning*) : les services français de météorologie, de prévision des crues, de surveillance sismique et de veille sanitaire ont su innover, et ils sont à la pointe. Il s'agit maintenant de passer à une vigilance universelle, démultipliée, en matière de risques extrêmes, dans l'esprit du « catastrophisme éclairé » proposé par le philosophe Jean-Pierre Dupuy, en réalisant une surveillance instrumentée et méthodique des aléas et des vulnérabilités extrêmes (20) ;
- ✓ la gestion des ressources, qu'il s'agisse de l'énergie, de l'eau ou du vivant ;
- ✓ l'aménagement du territoire et l'urbanisme, deux domaines délaissés depuis quelques décennies, mais dans lesquels la méthodologie française et la qualité des opérateurs professionnels restent de grands atouts. La relance qui semble se dessiner, dans le cadre des plans climat territoriaux, exigera la fédération des efforts des parties prenantes (urbanistes, architectes, industriels, collectivités et associations). La coordination des réseaux de services publics (électricité, télécommunications...) est éga-

lement un thème essentiel, sur lequel la position française constitue une référence ;

- ✓ l'organisation des secours, du retour à la vie normale et de la reconstruction, domaines dans lesquels la Sécurité Civile est en pleine rénovation, et où les ONG humanitaires ont su se déployer de manière remarquable. Il s'agit maintenant d'organiser les actions d'avant-crise et d'après-crise, dans la continuité de la prévention et de la vigilance, en établissant une chaîne de coopération entre les forces publiques et la société civile ;
- ✓ enfin, le financement de la réparation : les compagnies d'assurances et la Mutualité françaises ont des positions très fortes, tandis qu'a été expérimenté, depuis 1982, un régime de partenariat public-privé. Ce sont là des bases permettant de lancer une grande initiative, visant à la création d'une garantie internationale (21).

Mais il faut aller au-delà de ces outils spécifiques : les catastrophes ont, en dernière analyse, une dimension morale : quelle société envisageons-nous, pour l'avenir ? Avec quelles solidarités, quelles valeurs ? La vague d'ouvrages à visée philosophique (voire, parfois, ésotérique) publiés tout récemment sur le temps des catastrophes (22) et la proclamation de la nécessité de nouvelles régulations constituent, à n'en pas douter, des signes d'un réveil salutaire.

## Notes

\* Ingénieur général des Mines.

\*\* Président de l'Académie d'Agriculture de France.

(1) Le GIEC vient de lancer la réalisation d'un rapport spécial sur les événements extrêmes, qui devrait être diffusé en 2012 et intégré à son 5<sup>e</sup> rapport (*Scoping Paper IPCC 31<sup>e</sup> session*, 29 avril 2009 : *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation*).

(2) La coupure intervenant, par exemple, dans le dernier décile ou dans le dernier centile, les coordonnées logarithmiques permettent de représenter un éventail d'ordres de grandeur très ouvert.

(3) Sur les distributions gaussiennes et sur celles qui suivent une loi de puissance, voir : *Economie des extrêmes*, de Daniel Zajdenweber (Flammarion 2000, en cours de réédition dans la collection Champs, avec des compléments), *Le cygne noir*, de Nassim Nicholas Taleb (Les Belles Lettres 2008), *Une approche fractale des marchés*, de Benoît Mandelbrot (Odile Jacob, 2005, rééd. 2009), ainsi que les publications citées par ces ouvrages.

(4) De même que la loi de la relativité se substitue à la loi de Newton, pour les vitesses extrêmes, la loi de Gauss est, le plus souvent, une approximation inadéquate en matière de risques de catastrophe. On pourrait dire que la distribution de Gauss légitime l'application de la formule : le risque zéro n'existe pas (sous-entendu : mais il peut être minimisé et acceptable), tandis que les distributions suivant des lois de puissance à faible pente (inférieure à -2) justifient l'application du principe de précaution (qui intervient lorsque les risques collectifs sont trop importants).

(5) Les catastrophes des ères géologiques montrent qu'il y a des possibilités d'événements naturels extrêmes d'ampleur planétaire.

re. Les causes peuvent avoir été atmosphériques, cosmiques (phénomène solaire, chute d'un météorite géant...) ou avoir résulté de la physique interne du globe terrestre (éruptions, ruptures des protections électromagnétiques...).

(6) Exemple : l'analyse des bulles d'air présentes dans les « carottes » prélevées dans des masses glaciaires anciennes (cela, malgré diverses critiques émises sur la représentativité d'une composition gazeuse soumise, au cours du temps et des prélèvements, à de considérables variations de pression, de température et d'agitation mécanique).

(7) De ce fait, les modèles climatiques divergent : à coté de leur aspect déterministe et de l'approximation liée à la linéarisation des équations différentielles, nécessaire au calcul, les faiblesses des GCM (*Global Circulating Models*) sont :

- ✓ la taille toujours trop importante des cellules (la plupart des phénomènes météo-actifs étant de tailles très inférieures) ;
- ✓ le fait même d'admettre qu'il puisse y avoir, même durant un temps très court, un équilibre radiatif dans un milieu en mouvement et en échange thermique continuel ;
- ✓ l'assimilation de la radiation des couches d'air à celle d'un corps solide noir, alors qu'il s'agit d'un gaz raréfié qui n'est pas en équilibre thermique et que l'absorption et la réémission des GES (sauf la vapeur d'eau), du CO<sub>2</sub> en particulier, intervient dans des gammes de fréquences étroites ;
- ✓ les interactions atmosphère/surface océanique, mal connues et dépendant fortement de l'état de surface de l'eau, qui est un paramètre très variable ;
- ✓ le déséquilibre thermique entre les océans et l'atmosphère : une grande partie de la chaleur provenant de l'irradiation solaire et ne servant pas à l'évaporation, est non pas réémise sous forme de radiations, mais dispersée par les mouvements de l'eau et les courants, selon des processus encore mal connus ;
- ✓ l'impossibilité de calculer de façon précise l'évaporation et le transfert de la vapeur d'eau de la surface marine dans l'atmosphère, à l'échelle des cellules, car il s'agit de phénomènes d'ampleur métrique à décimétrique. La teneur en vapeur d'eau est fixée au moyen de paramétrisations approximatives.

Il est donc très difficile de simuler avec un minimum de réalisme la formation et la localisation des nuages et de calculer l'influence de l'amplification de l'effet de serre par la vapeur d'eau supplémentaire. L'albédo des nuages, ainsi que la capacité d'absorption et de radiation des gouttelettes d'eau, ne pouvant être représentés de façon précise, font l'objet d'une paramétrisation qui reste grossière.

La plupart des phénomènes cités ci-dessus n'ont pas à être pris en compte par la prévision météorologique sur une durée de quelques jours. La difficulté (et même l'impossibilité, actuellement), pour les modèles climatiques globaux (GCM), de représenter les grandes oscillations thermiques océaniques, qui sont elles-mêmes responsables d'une partie importante des phénomènes extrêmes, en souligne les limites.

(8) Sur la complexité des systèmes biologiques, voir l'article de Gilles Escarguel dans ce même numéro de Responsabilité et Environnement, ainsi que le rapport de l'Académie de sciences, *Événements climatiques extrêmes : réduire la vulnérabilité des systèmes écologiques et sociaux* (à paraître). Les écosystèmes sont surtout considérés comme des facteurs de stabilité, mais ils deviennent sources d'aléas, s'ils s'effondrent. Les atteintes qu'ils subissent, proviennent du développement de l'agroforesterie et de l'amplification continue des transformations du territoire, en particulier du fait de l'urbanisation. Le changement climatique est, pour eux, un facteur de déstabilisation supplémentaire.

(9) L'opposition entre Darwin (mettant en évidence l'accumulation de modifications minimales, accompagnées d'un mécanisme de sélection) et les partisans des catastrophes est une référence fondamentale. Le débat entre continuité et rupture traverse l'histoire de l'évolution.

(10) Voir Bernard Derrida (Rapport de l'Académie des Sciences), qui se réfère notamment aux publications de P. Bak et de Mark E. J. Newman.

(11) Selon le GIEC, le seuil correspond à un accroissement de la température moyenne du globe de 2°C, et les politiques donnent à cette estimation une interprétation rigide. En fait, il s'agit surtout d'un compromis visant à fixer un objectif qui ne soit pas irréaliste. Mais aucune preuve n'est apportée de l'existence d'un seuil et un livre comme *Six degrés*, du journaliste Mark Lynas, qui vise à sensibiliser l'opinion, montre un accroissement progressif des menaces...

(12) Voir *L'enfermement planétaire*, d'André Lebeau (un ancien responsable du CNES et de Météo France), qui souligne la limite des risques naturels, même dans la perspective du changement climatique, par rapport aux risques systémiques.

(13) L'erreur de Malthus se répète périodiquement : l'annonce de la fin du charbon (à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle), le Club de Rome (il y a quarante ans). Souhaitons que la mode des études sur les ressources rares ne débouche pas sur une erreur de diagnostic : la raréfaction n'est jamais que relative par rapport à un système technique et sociétal donné, et elle peut être surmontée si on change le système à temps, ce qui doit se faire dans le domaine énergétique, pour amortir les chocs pétroliers à venir, ou en agriculture pour éviter un choc alimentaire. A cet égard, le titre délibérément provocateur, *Trop de pétrole*, de l'ouvrage d'Henri Prévot (Seuil 2008, voir aussi son article publié en janvier 2008 dans la Gazette de la société et des techniques (<http://www.anales.org/gazette/gazette-45-01-08.html>) n'est pas malvenu, et l'on se reportera également à l'appel pour un autre système agricole, que lance François Papy, dans ce numéro de Responsabilité et Environnement.

(14) « Intensité anormale d'un agent naturel » est l'expression employée dans la loi fondamentale de 1982 sur l'indemnisation des effets des risques naturels. Dans l'application, les autorités ont souvent retenu un critère de rareté (plus précisément, de fréquence supra décennale). On est, là, très loin de l'aléa extrême.

(15) Sur la DRR, voir les publications de l'ISDR (*International Strategy for Disaster Reduction*), rattachée au Secrétaire général adjoint des Nations unies pour les Questions humanitaires.

(16) C'est ce qui découle, par exemple, de la directive européenne sur les inondations, qui invite à choisir entre plusieurs niveaux d'aléas de référence : ainsi, dans les grands bassins français, on peut prendre l'aléa centennal comme aléa de référence, tout en considérant comme acceptables les conséquences d'un aléa millénal, alors qu'aux Pays-Bas et à Londres, on se calera sur l'aléa millénal, qui constitue un risque extrême inacceptable. Sur les aléas de référence, voir la publication de l'AFPCN : *Adaptation au changement climatique, les risques naturels*, 2007.

(17) La politique française de gestion des risques naturels a été obérée, au départ, par la qualification de catastrophe naturelle attribuée à tous les dommages résultant de l'intensité anormale d'un agent naturel. Un document récent de la Fédération Française des Sociétés d'Assurances (synthèse diffusée le 29 avril) traitant du changement climatique fait cependant la distinction entre « risques locaux » et « grands risques ».

(18) Voir Michel-Kerjan et l'encadré de D. Kessler, président de la SCOR (première société française de réassurance), dans le rapport (à paraître) de l'Académie des Sciences.

(19) Avec l'amortissement des chocs pétroliers.

(20) L'*early warning* est à la fois la vigilance préventive et l'alerte précoce. Le « catastrophisme éclairé », selon Jean-Pierre Dupuy, consiste à envisager la catastrophe comme certaine pour éviter qu'elle ne se produise. La vigilance à l'égard des menaces d'événements extrêmes doit traquer les signes précurseurs et les analyser, grâce aux techniques statistiques mentionnées au début de cet article. Il faut reconnaître l'utilité des lanceurs d'alertes.

(21) Le niveau clé, pour cette garantie, est celui de la réassurance. Le dispositif français, qui accorde le monopole de la garantie de l'Etat à une compagnie nationale spécialisée, isole le marché financier français et fait porter sur l'Etat la totalité du risque en matière d'événements extrêmes.

(22) Revue *Esprit*, mars 2008, dossier *Le temps des catastrophes* ; Frédéric Neyrat : *Biopolitique des catastrophes*, éditions MF, 2008 ; Isabelle Stengers : *Au temps des catastrophes, résister à la barbarie qui vient*, La découverte, 2008 ; Jean-Pierre Dupuy : *La marque du sacré*, Carnets Nord, janvier 2009 ; François Walter : *Catastrophes, Une histoire culturelle*, Seuil, 2008.