



Inspection générale
des Finances

Conseil général
des Ponts et Chaussées

Inspection générale
de l'Environnement

ETUDE SUR LES ALEAS NATURELS ET LEURS ENJEUX

Établi par

Philippe DUMAS
Alexandre MACAIRE

Membres de l'inspection générale des finances.

André CHAVAROT
Christo DIMITROV
Christian QUEFFELEC

Membres du conseil général des ponts et chaussées.

Denis LAURENS
Henri LEGRAND
Xavier MARTIN

Membres de l'inspection générale de l'environnement.

Octobre 2005

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
I LES ALEAS NATURELS.....	3
II LES CHUTES DE METEORITES.	5
II 1 CARACTERISTIQUES GENERALES	5
II 2 LES DANGERS	5
II 3 LES RISQUES	5
II 4 QUELQUES CONSEQUENCES	6
II 5 PREVENTION	7
III LES RISQUES MAJORITAIREMENT LIES A LA TECTONIQUE DES PLAQUES.....	8
III 1 LE VOLCANISME	8
III 1 1 CARACTERISTIQUES GENERALES	8
III 1 2 LES DANGERS	9
III 1 3 LE RISQUE EN FRANCE ET A PROXIMITE	9
III 1 4 LA PREVENTION	11
III 2 LES SEISMES	12
III 2 1 CARACTERISTIQUES GENERALES.....	12
III 2 2 LES DANGERS	12
III 2 3 LE RISQUE	13
III 2 4 LA PREVENTION	15
IV LES CYCLONES.....	16
IV 1 CARACTERISTIQUES GENERALES.....	16
IV 2 LES DANGERS ET LES RISQUES.....	17
=> IV 2 1 <i>Le vent.</i>	17
=> IV 2 2 <i>La marée de tempête</i>	17
=> IV 2 3 <i>La houle</i>	17
=> IV 2 4 <i>Les précipitations</i>	18
IV 3 LA PREVENTION	18
V LES INCENDIES DE FORET.....	20
V 1 LES INCENDIES DE FORET DANS LE MONDE.....	20
V 2 LES ESPACES CONCERNES EN FRANCE.	20
V 2 1 <i>L'aléa.</i>	20
V 2 2 <i>Les enjeux.</i>	21
V 2 3 <i>Quelques catastrophes récentes en France.</i>	21
V 3 LA PREVENTION DANS LES DEPARTEMENTS A RISQUE.....	22
V 4 QUELQUES PERSPECTIVES.....	23
V 5 CONCLUSION.	24
V 5 1 <i>Un atout.</i>	24
V 5 2 <i>Mais des catastrophes possibles.</i>	24
VI LES ALEAS LIES AUX PRECIPITATIONS	25
VI 1 LES AVERSES INTENSES.....	25

VI 1 1	LES DISPOSITIFS DE MESURE.....	25
VI 1 2	LES OBSERVATIONS.....	25
VI 1 3	LES DANGERS.....	27
VI 1 3 1	LES COULEES DE BOUE.....	27
	Les caractéristiques générales.....	27
	Les dangers en France métropolitaine.....	27
	La prévention.....	28
VI 1 3 2	LES RUISSELLEMENTS GENERALISES.....	29
VI 2	LES ALEAS LIES AUX COURS D'EAU	29
VI 2 1	LES ECOULEMENTS EN RIVIERE.....	30
VI 2 1 1	LES DISPOSITIFS DE MESURE DES COTES DE L'EAU.....	30
VI 2 1 2	L'EVALUATION DES DEBITS.....	30
	L'évaluation du débit des crues (des inondations).....	30
	L'évaluation du débit des étiages (les sécheresses hydrologiques).....	31
VI 2 1 3	LE REGIME DE QUELQUES COURS D'EAU.....	32
VI 2 2	LES ECOULEMENTS SOUTERRAINS.....	33
VI 2 3	LES CRUES	34
VI 2 3 1	<i>Les crues à cinétique rapide.....</i>	<i>34</i>
	=> crues instantanées,.....	34
	=> crues subites.....	34
	=> crues rapides.....	35
VI 2 3 2	<i>Les crues à cinétique lente.....</i>	<i>36</i>
VI 2 4	LES INONDATIONS	36
VI 2 4 1	LES RISQUES.....	37
VI 2 4 1 1	<i>Quelques crues à cinétique lente en France :</i>	<i>37</i>
	De la Loire :.....	37
	Du Rhône.....	37
	De la Seine.....	38
	De la Garonne.....	38
VI 2 4 1 2	<i>Quelques crues à cinétique rapide.....</i>	<i>39</i>
VI 2 4 2	LA PREVENTION.....	39
	La prévision.....	39
VII	LES MOUVEMENTS DE TERRAIN.....	41
VII 1	CARACTERISTIQUES GENERALES.....	41
VII 2	LES DANGERS.....	42
VII 3	LE RISQUE.....	42
VII 4	LA PREVENTION.....	42
VII 5	QUELQUES CATASTROPHES.....	43
VIII	LE "RETRAIT - GONFLEMENT DES ARGILES".	46
VIII 1	LES RISQUES.....	46
VIII 2	LA PREVENTION.....	47
IX	LES AVALANCHES.....	48
IX 1	CARACTERISTIQUES GENERALES.....	48
IX 2	LES DANGERS.....	49

IX 3 LA GESTION DU RISQUE	50
X QUELQUES EFFETS "DOMINO"	52
X 1 LE TALUS DE LA VOIE FERREE BIZE-MINERVOIS, NARBONNE A CUXAC D'AUDE (DEPARTEMENT DE L'AUDE).	52
X 2 L'EFFONDREMENT DU MONT TOC (ITALIE).	52
X 3 LES BASSINS DE LA SAVOUREUSE (TERRITOIRE DE BERLFORT).....	53
XI QUELQUES REFLEXIONS SUR LES VARIATIONS CLIMATIQUES	54
XI 1 L'EXEMPLE DE POTOSI.....	54
XI 2 LES CRUES RECENTES EN FRANCE.	55
XI 3 D'UNE MANIERE GENERALE.	55
Les modèles de climat.	55
ANNEXE	57

INTRODUCTION

Les ministres de l'intérieur, des finances, de l'écologie et du développement durable, de l'équipement et du budget ont, par lettre en date du 25 février 2005, mandaté les inspections générales des finances, de l'administration, de l'environnement et le conseil général des ponts et chaussées pour établir un état des lieux du régime d'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles et faire des propositions en vue de sa réforme éventuelle.

Avant de répondre aux ministres, la mission a voulu élaborer un document présentant les aléas naturels susceptibles, s'ils se produisent, de mettre en jeu au moins le régime d'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles. Il concernait ainsi les aléas non assurables aux termes du code des assurances qui peuvent affecter le territoire national et a été remis aux ministres commanditaires le .

Les inspections générales ont décidé, ensuite, de compléter ce document par "les incendies de forêts"¹ et de rendre sa lecture possible sans référence aux documents qui l'accompagnaient.

Tel est le présent document dans le quel les auteurs passent en revue les aléas naturels et pour chacun d'entre eux, tentent de définir leurs caractéristiques, les dangers qu'ils représentent, les catastrophes qu'ils ont occasionnées par le passé et les préventions possibles

Il n'a aucune ambition scientifique. Il s'efforce d'utiliser un vocabulaire simple quelquefois technique, mais facilement accessible. Il pourra apparaître simpliste aux yeux des spécialistes.

Il est une synthèse, une compilation d'articles scientifiques, techniques, voire de vulgarisation qui sont issus :

- très majoritairement des services du ministère de l'écologie et du développement durable : inspection générale de l'environnement et direction de la prévention des pollutions et des risques ;

- mais aussi des apports de Jean DUNGLAS, ingénieur général du génie rural des eaux et des forêts, particulièrement sur les chutes de météorites, des auteurs des pages du site "www.prim.net" de la DPPR déjà citée et des innombrables ressources documentaires provenant du monde entier et accessibles sur le web.

Toutes les informations que ce document contient, hors des rapports officiels, ont été vérifiées par croisement.

Les catastrophes naturelles ont toujours existé et leur représentation mentale n'a vraisemblablement pas beaucoup changé :

- on n'imagine pas l'aléa qu'on n'a pas subi ;
- on oublie rapidement, au moins en apparence, celui qu'on a subi. La mémoire sélective est un fait, étudié en psychosociologie.

Par contre, les enjeux apparaissent avoir bien augmenté au cours du 20^e siècle et plus particulièrement depuis les années 1970 en France et dans le monde.

Le risque est le croisement d'un aléa et d'une vulnérabilité. Agir sur le risque, c'est ainsi agir, par exemple pour le "risque inondation", sur les deux facteurs :

¹Qui est un aléa assurable.

- l'aléa c'est à dire les caractéristiques de la crue sur les quelles l'homme n'a pas d'influence et ses conditions d'écoulement sur lesquelles l'action humaine a, par contre, dans une certaine mesure une influence ; au-delà d'un certain seuil de crue, ce facteur ne joue plus ;
- la vulnérabilité, c'est-à-dire les enjeux. Le plus sûr moyen d'échapper à une inondation est de s'installer hors de son atteinte et si c'est impossible, de s'adapter en se préparant à la crue. Plus la vulnérabilité croît, plus le dommage sera grand ;
- enfin la gestion de la crise peut avoir une influence sur les dommages aux personnes en particulier quand l'alerte est donnée dans des délais raisonnables.

La gestion des risques est prévue par des lois et des règlements ; elle comprend en particulier la prévention des risques.

Bien connaître les aléas, c'est connaître les risques aux quels on s'expose. Il ne faut pas les ignorer ; il faut savoir vivre avec eux.

"Il est de notre devoir d'informer les habitants sur les risques qu'ils ont couru ceci afin de prévenir les prochaines catastrophes qui ne manqueront pas de survenir"².

La prise en compte des risques doit être présente dans les "attitudes" en particulier celles des acteurs potentiels de la gestion des crises.

² Émile GUEYMARD Rapport sur les inondations du Drac et de la Romanche du 30 mai 1856. (Grenoble, Baratier, 1856, 8p.).

I LES ALEAS NATURELS.

Les aléas sont cités par le législateur en particulier à :

- L'article L. 562-1 du code de l'environnement. Il concerne les compétences de l'État dans l'élaboration "des plans de prévention des risques naturels prévisibles tels que les inondations, les mouvements de terrain, les avalanches, les incendies de forêt, les séismes, les éruptions volcaniques, les tempêtes, les cyclones".
- L'article L. 2212-2 du code général des collectivités territoriales. Il concerne le pouvoir de police du maire qui a "le soin de prévenir ... et de faire cesser ... les fléaux calamiteux ainsi que les pollutions de toute nature, tels que les incendies, les inondations, les ruptures de digues, les éboulements de terre ou de rochers, les avalanches ou autres accidents naturels, les maladies épidémiques ou contagieuses, les épizooties, ...".

Jean Dunglas, déjà cité, essaye de classer les aléas selon l'énergie qu'ils déploient (voir le tableau de la page suivante). Nous suivrons sa logique dans la suite du rapport.

=> Le célèbre meteor crater (cratère Barringer) en Arizona, correspond à une énergie de 10^{17} Joules.

=> L'explosion du volcan Tambora en Indonésie en 1815 a libéré une énergie d'environ 10^{20} joules représentant 10 fois celle de l'explosion du célèbre volcan Krakatoa en 1883 mais 500 000 fois moins que l'explosion de la montagne Pelée en 1902.

=> L'un des plus grands séismes connus, celui du Chili en 1960 a également libéré une énergie de 10^{20} joules.

=> Le cyclone Camille (1969), l'un des plus dévastateurs connus, a libéré une énergie de $0,5 \times 10^{20}$ Joules.

A titre de comparaison la plus importante explosion thermonucléaire jamais réalisée sur terre³ a dégagé une énergie de $1,3 \times 10^{17}$ Joules soit 30 mégatonnes de TNT (ce qui équivaut à l'impact d'une "petite" météorite de 70 à 100m).

³ En Nouvelle Zemble ex URSS en 1961

Aléa	Zone impactée	effets		durée	Préavis	Energie totale (j)	Densité d'énergie (J/m²)
		locaux	globaux				
Chute de météorite sur terre	planète	Mécaniques, thermiques (explosion)	Biosphère, climat.	Qq secondes à qq heures.	Qq heures à qq années	Jusqu'à 4×10^{23}	De qq à 10^{13}
Chute de météorite dans l'océan	planète	Tsunami, submersion, érosion	Biosphère, climat.	Qq secondes à qq heures	Qq heures à qq années	Jusqu'à 4×10^{23}	De qq à 10^{13}
Eruption volcanique	Ponctuelle à régionale	Thermique, asphyxie, enfouissement.	Biosphère, climat.	Qq heures à qq jours.	Qq jours	Jusqu'à 10^{20}	De 10^2 à 10^8
Séismes	Variable mais localisée dans les zones sismiques	Mécaniques	Très faible à nul.	Qq secondes à qq heures	indéterminé	Jusqu'à 10^{20}	Faible.
Cyclones, tempêtes	planète	Mécaniques, submersion, érosion.	nul	Qq heures à qq jours.	Qq jours	Jusqu'à 10^{20}	De 10^2 à 10^5
Incendie de forêts	Zones boisées.	Thermiques, asphyxie.	Biosphère, climat.	Qq heures à qq jours.	Qq heures	Jusqu'à 10^{18}	De 10^4 à 10^8
Inondations	Vallées	Submersion, érosion	nul	Qq heures à qq jours.	Qq heures à qq jours	Jusqu'à 10^{16}	De 10 à 10^3
Glissement de terrain	Relief	Mécaniques, enfouissement.	nul	Qq minutes à qq jours.	Qq minutes à qq années	Jusqu'à 10^{15}	De 10^2 à 10^4
Avalanches	Vallées	Mécaniques, enfouissement.	nul	Qq secondes à qq minutes	Qq minutes à qq jours	Jusqu'à 10^{13}	De 10^3 à 10^4

Les évaluations des amplitudes et des densités énergétiques maximales pour les inondations, les avalanches et les glissements de terrain sont approximatives et mériteraient d'être affinées.

II LES CHUTES DE METEORITES.

La grande peur des gaulois était que le ciel ne leur tombe sur la tête mais l'idée que des pierres puissent tomber du ciel, n'est admise que depuis 1803⁴, après la chute d'une pluie de météorites près de l'Aigle, dans l'Orne, étudiée par le physicien Biot.

II 1 Caractéristiques générales

Il tombe chaque jour entre 400 et 1 200 tonnes de matière céleste sur terre. La plupart des météorites ont de la taille d'un grain de sable jusqu'à celle d'un bloc de pierre et se volatilisent en traversant l'atmosphère donnant une "étoile filante". Certains sont beaucoup plus gros.

Il y a probablement 150 000 objets dans la ceinture d'astéroïdes du soleil. 30 000 ont été répertoriés et étudiés. Il existe probablement une dizaine (sinon plusieurs dizaines) de milliers d'objets de plus de 100 m de diamètre. En juillet 2002, on connaissait 1986 NEO (near earth objects) ; on en découvre, en moyenne chaque mois, une douzaine de plus d'un km⁵

Le groupe de NEO le plus dangereux appelé PHA (potentially hazardous asteroid) comptait en juillet 2002, 449 objets (on en a repéré 3 autres en août 2002 ...).

Il faut avoir conscience que la majorité de ces objets a une trajectoire instable.

II 2 Les dangers

L'énergie⁶ déployée par les astéroïdes lors de leur descente et de leur impact dépend de facteurs bien connus : leurs dimensions, leur densité (de moins de 2 à plus de 7), leur vitesse (en général comprise entre 10 et 70 km/s) et l'angle d'incidence de leur trajectoire avec la terre (le plus probable est de 45°).

La physique des impacts des objets inférieurs à 10 m est relativement bien connue⁷.

Pour les objets plus gros on sait que la compression prolongée de l'air à l'avant entraîne de très forts échauffements, une ionisation intense et des vaporisations de surface (ablations) qui dissipent une part importante de l'énergie cinétique. Il peut en résulter de très violentes explosions, ou des éclatements moins violents suivis d'une fragmentation avec l'arrivée au sol de morceaux de faible masse, fortement ralentis donc potentiellement moins dangereux.

Pour les objets de plus de 30 m, l'explosion présente tous les effets thermiques et mécaniques d'une explosion nucléaire. Certains experts estiment que température et pression peuvent amorcer une réaction nucléaire mais ceci est bien controversé.

II 3 Les risques

Il est admis à l'heure actuelle les fréquences suivantes pour qu'un objet de 50 m de diamètre⁸ (l'énergie déployée implique une destruction totale directe dans un rayon de 24 km) heurte :

- **la terre** : une fois tous les 100 ans.

⁴ Lavoisier lui-même estimait que des pierres ne peuvent pas tomber du ciel parce qu'il n'y a pas de pierres dans le ciel.

⁵ 9, en juillet et 18, en août 2002, ...

⁶ $\frac{1}{2} MV^2$. Il y a controverse sur de possibles réactions nucléaires.

⁷ Avec les programmes spatiaux.

⁸ Cratère Barringer, Tsunguska, ...

- une région **habitée quelconque** : une fois tous les 900 ans !
- un **lieu précis** : une fois tous les 25 millions d'années ($4 \cdot 10^8$).

II 4 Quelques conséquences

Parmi les objets relativement gros qui se volatilisent dans l'atmosphère ou tombent dans l'océan chaque année on peut citer :

- le 23 avril 2001 au-dessus du Pacifique au large de la basse Californie, une météorite de 3 à 5 m de diamètre s'est volatilisé et a libéré une énergie équivalente à une dizaine de KT de TNT, comme une autre le 25 août 2000, ...
- le 10 août 1972, un objet de 10 à 20 m est arrivé au-dessus de l'Utah avec une trajectoire pratiquement parallèle à celle de la terre, a parcouru près de 1 500 km avant de quitter l'atmosphère terrestre.

On retiendra la description de quelques impacts cataclysmiques :

=> La météorite tombée à la fin du crétacé il y a environ 65 millions d'années. Elle avait 9 à 10 km de diamètre. En tombant, elle a creusé le cratère de Chicxulub (Yucatan) de 180 km de diamètre et a du déployer une énergie équivalente à 10 millions de grosses bombes thermonucléaires. Elle a détruit de 70 à 80 % des espèces vivantes à l'époque. Il s'agit évidemment d'un événement très exceptionnel dont la période de retour est estimée ente 50 et 100 millions d'années. **Mais il s'est produit et se reproduira forcément un jour.**

=> Le cratère de Kōfels (Ötztal) dans le Tyrol autrichien à 60 km d'Innsbruck a 5 km de diamètre. Il est le résultat de l'impact d'un objet de 200 à 250 m de diamètre qui a du dégager une énergie de 200 MT de TNT⁹. La catastrophe qui date de 8 500 ans a vraisemblablement eu des effets régionaux importants sur l'environnement et le climat ; les répercussions sur les populations qui habitaient cette région ont dû être considérables.

=> L'explosion de la Tunguska du 30 juin 1908 au-dessus de la Sibérie centrale. La trajectoire du météorite fut suivie sur 700 km, son explosion vue jusqu'à plus de 600 km et le bruit entendu à plus de 1 000 km. La forêt sibérienne fut complètement dévastée sur environ 2 200 km² et dans la partie centrale de la zone, le phénomène a créé une dépression de quelques km² qui s'est transformée avec le temps en un lac et un marais. Cette explosion est très intéressante à plusieurs titres :

- Elle a été suivie par de nombreux témoins et a fait l'objet d'études scientifiques très sérieuses et approfondies.
- Elle a dégagé une énergie importante équivalente à celle d'une charge thermonucléaire (12 MT) qui aurait pu détruire une ville.
- La période de retour d'un tel impact est de l'ordre de 100 ans (voir ci-dessus)
- L'astéroïde impacteur est petit : il aurait été difficilement repérable à grande distance même avec les moyens actuels ; de plus il est arrivé dans la direction du soleil.

=> L'astéroïde de Bodaibo en Sibérie orientale, tombé le 24 septembre 2002 en dégageant une énergie équivalente à environ 200 KT de TNT (7 grosses bombes thermonucléaires). Il avait une dizaine de m de diamètre. Il n'existe encore actuellement aucun rapport sur les dégâts au sol.

⁹ L'impact a constitué un minéral original "la kofelsite".

II 5 Prévention

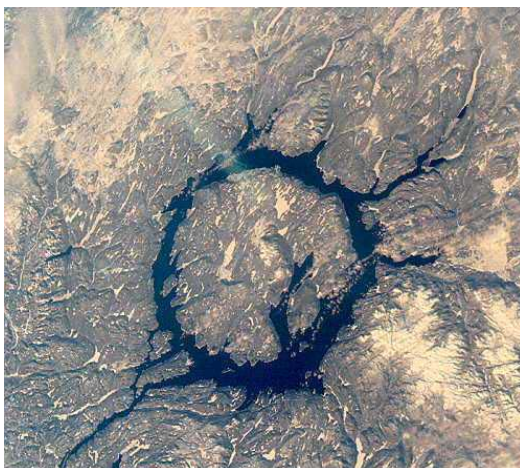
- Il s'agit d'un aléa équiprobable sur la surface du globe.
- Le risque existe et est quantifié et gradué¹⁰.
- Les moyens de prévision existent, mais ils ne sont pas utilisés pleinement¹¹.
- Les moyens de prévention consistent à détruire l'astroïde ou d'en dévier la trajectoire ; ils mettent en œuvre des moyens que russes et américains avaient commencé à développer dans les années 80 sous l'appellation de guerre des étoiles. Les moyens les plus facilement opérationnels font appel à l'énergie nucléaire. Le développement des moyens de prévention est à l'échelle planétaire. Il n'existe pas actuellement de volonté affichée pour ce faire¹².
- La réparation des dommages dus à l'impact d'un petit astéroïde sur une zone habitée mettra en jeu la solidarité mondiale ; la catastrophe aura des impacts durables sur l'économie du pays touché.



Le célèbre meteor crater (cratère Barringer) en Arizona.

Ce cratère de 1 220 m a été créé par l'impact d'une sidérite (météorite ferreuse de densité 7 à 8) d'un diamètre de 40 à 60m, il y a 25 à 50 000 ans.

C'est un site touristique très visité.



Le cratère de Manigougan au Canada.

Cet astroblème¹³ a 70 km de diamètre et date de 210 millions d'années.

Il s'est formé dans les restes du cratère un lac annulaire bien visible sur cette photo satellitaire.

Photos NASA.

¹⁰ Selon deux échelles différentes : l'échelle de Turin et celle de Palerme.

¹¹ 2002MN, astéroïde de 50 à 160 m de diamètre, est passé le 14 juin 2002 à 120 000 km de la terre, donc tout près d'elle. Venant de la direction du soleil, donc invisible, il n'a été détecté que le 17 juin !

¹² Voir la sonde et son missile "deep impact" sur la comète "tempel one" en juillet 2005.

¹³ Terme géologique désignant un cratère de météorite.

III LES RISQUES MAJORITAIREMENT LIES A LA TECTONIQUE DES PLAQUES

Le volcanisme est avec l'activité sismique, l'une des manifestations de la tectonique des plaques.

Cependant le volcanisme peut se manifester ailleurs, sur des "points chauds", là où la croûte terrestre est la plus mince.



La faille de San Andrea.

Elle a 1000 km de long et traverse la Californie du nord au sud.

La plaque pacifique coulisse horizontalement vers le nord devant l'Amérique du Nord.

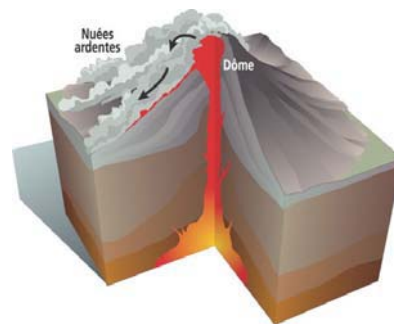
III 1 LE VOLCANISME

III 1 1 *Caractéristiques générales*

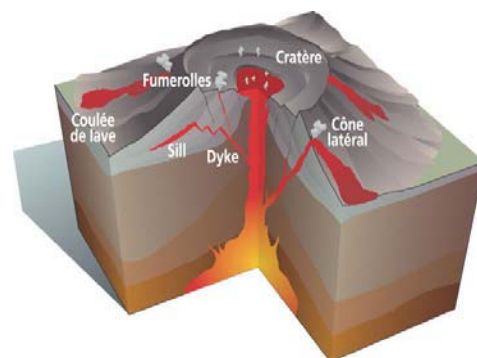
Le volcanisme est toujours le résultat d'une remontée en surface d'un magma profond, mais ses manifestations en surface peuvent différer d'une éruption à une autre.

Les nuées ardentes sont des émissions brutales et dirigées d'un mélange constitué de gaz brûlants transportant des roches à plus de 800 °C, "bombes volcaniques", cendres, ... L'ensemble dévale les flancs du volcan à des vitesses de 200 à 500 km/h, sur de grandes distances.

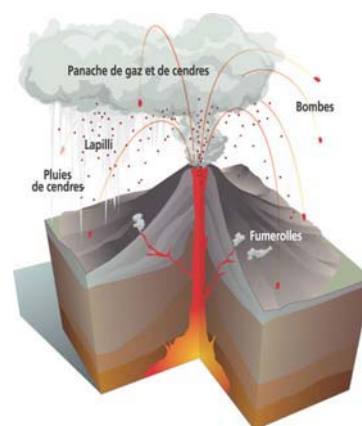
Ces phénomènes sont caractéristiques d'un volcanisme "explosif".



Les coulées de lave, dont la température moyenne est de 1 000 °C, sont caractéristiques des éruptions effusives. Elles s'écoulent à des vitesses de l'ordre de quelques centaines de mètres à l'heure. Cette vitesse diminue en s'éloignant du lieu d'émission, sous l'effet de la solidification due à la baisse progressive de la température.



Les émanations de gaz se produisent aussi bien au cours d'une éruption explosive, qu'au cours d'une éruption effusive. Elles peuvent également être plus ou moins continues entre les phases éruptives. Les gaz sont émis au niveau de la gueule du volcan et sous forme de fumerolles sur les flancs.



Blocs MEDD. Commentaires d'après MEDD

Il faut ajouter que :

- des séismes peuvent également accompagner les éruptions volcaniques et provoquer des glissements de terrain ;
- enfin, les explosions violentes, les séismes, les éruptions volcaniques sous-marines ou les glissements de terrain s'ils se produisent dans la mer ou à proximité de la côte, peuvent être à l'origine de raz-de-marée, ou "tsunami" dévastateurs.

III 1 2 Les dangers

Les nuées ardentes détruisent tout sur leur passage, ce qui en fait le phénomène volcanique le plus dévastateur.

Les cendres peuvent se déposer sur plusieurs mètres d'épaisseur en quelques heures et causer l'effondrement de bâtiments sans, en général, faire de victimes.

Les coulées de lave sont lentes ; les dégâts sont en règle très générale exclusivement matériels.

Les tsunamis peuvent remonter loin dans les terres et créer des dégâts humains et matériels à plusieurs kilomètres du littoral.

III 1 3 Le risque en France et à proximité

Les éruptions volcaniques constituent un risque majeur dans les départements d'outre-mer ; le volcanisme est en activité dans les DOM. Le risque volcanique concerne à un degré moindre la Polynésie française et le centre-sud de la métropole où le volcanisme est en sommeil.

Quatre anciens volcans émergent des basses plaines de l'Hérault, aux environs d'Agde¹⁴ : Agde, Saint Thibéry, Pézenas et Roque-Haute. Ils constituent l'extrémité sud de la chaîne des Puys et sont des vestiges de l'épisode volcanique le plus récent¹⁵ en France. Ce sont des volcans de "type hawaïen", effusifs, qui émettent une lave fluide, le basalte¹⁶, dont les coulées peuvent s'étendre sur des distances très importantes, et qui présentent des cônes peu élevés. Les coulées cristallisées peuvent former, en coupe transversale, des "orgues basaltiques" et en plan des "chaussées de géants".

¹⁴ Dans la région Languedoc Roussillon, le département de l'Hérault et la communauté de communes d'Agde.

¹⁵ 640 000 ans environ.

¹⁶ Il en existe différents types avec des caractéristiques physiques et chimiques différentes.



Le volcan de Roque Haute.
Les terrains résidentiels au premier plan et la méditerranée à l'arrière plan.
Photo Gaillard De Clock

Le volcanisme est particulièrement actif dans les petites Antilles :

Date	Volcan	Localisation	Volcanisme	Dégâts et victimes
1902	Montagne Pelée	France (Martinique)	Nuées ardentes	29 000 morts ; destruction de la capitale Saint-Pierre et de Morne-Rouge. Le volcan ne s'est pas manifesté depuis 70 ans.
Depuis 1995	Soufrière	Montserrat (Antilles). Cette île est "à vue" de la Guadeloupe	Nuées ardentes. Cendres.	Les deux tiers de l'île ont été évacués ; la capitale Plymouth a été complètement détruite.
Depuis (?)	Soufrière	Guadeloupe (Basse Terre)	?	Volcan sans manifestation importante depuis des années.

L'éruption de la Montagne Pelée en Martinique en 1902 est la plus grande catastrophe française depuis le début du XX^e siècle. A saint Pierre, une seule personne a survécu à l'éruption.

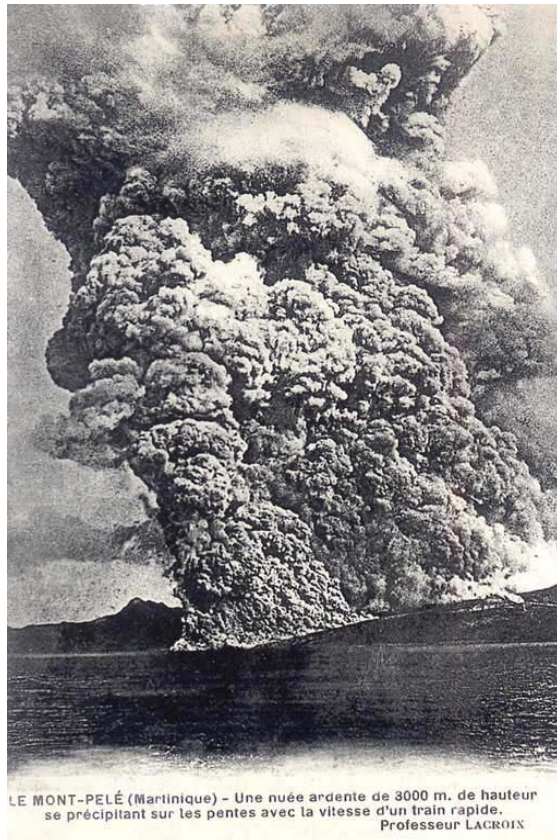
Depuis quelques éruptions dans les décennies qui ont suivies 1902, la Pelée se manifeste que par des phénomènes mineurs (eau minérale de "Didier", sources chaudes dans l'eau de la mangrove du Lamentin, ...).

Par contre les observations des capteurs dont la Pelée est truffée, témoignent bien de son activité.

Les îles voisines de la Martinique (La Dominique au nord et Ste Lucie au sud) ont chacune une soufrière active. Le volcanisme à la Dominique se manifeste en particulier par la présence du plus important lac bouillant du monde (après la Nouvelle Zélande). La Soufrière de Ste Lucie a explosé en 1902 comme la Pelée en détruisant totalement l'agglomération de la Soufrière. Dans les deux îles des phénomènes volcaniques mineurs sont continus, spectaculaires et constituent une attraction touristique qui mériterait une meilleure organisation.

L'activité de la Soufrière de la Guadeloupe se manifeste par des sources chaudes, des fumerolles sur les pentes du volcan. Après avoir été longtemps abandonnée¹⁷, la géothermie fournit une part significative de l'énergie électrique utilisée sur l'île

Dans l'océan indien, la Soufrière de l'île de la Réunion se manifeste par des coulées importantes de lave, régulièrement, depuis plusieurs années.



Cartes postales de l'époque de l'éruption de la montagne Pelée (1902).
A gauche **reconstitution** d'une nuée ardente. A droite les ruines de St Pierre.

III 1 4 La prévention

La connaissance de l'aléa.

La prévention, comme pour tous les phénomènes "rares" et "discontinus" passe par la connaissance du volcan et par la reconstitution de son activité dans l'histoire.

Cette histoire permet non seulement de comprendre le fonctionnement du volcan, et notamment de prévoir quel type de phénomène est susceptible de se produire, mais également de dresser une carte de localisation des événements passés. La combinaison de ces deux éléments permet de dresser une carte des zones menacées.

En raison des puissances mises en jeu lors d'éruptions volcaniques, la seule prévention possible est l'évacuation des populations vers une zone hors d'atteinte.

¹⁷ La corrosion des installations a posé longtemps des problèmes. Des études sont en cours (BRGM) pour mettre en valeur cette énergie à la Dominique (exportation vers la Martinique).

La surveillance et l'alerte

Une éruption volcanique est précédée de plusieurs signes annonciateurs, notamment de séismes au sein de l'édifice volcanique.

L'étude en temps réel de l'activité d'un volcan permet ainsi de prévenir l'arrivée d'une éruption et ainsi préparer l'évacuation de la population. Les trois volcans actifs de France à la Guadeloupe, à la Martinique et à la Réunion sont parmi les plus surveillés au monde.

III 2 LES SEISMES

Dans le sud-est de la France métropolitaine et en particulier dans la région niçoise, l'activité sismique est forte ; dans les Antilles aussi.

III 2 1 caractéristiques générales

L'activité sismique est concentrée le long de failles, en général à proximité de frontières de plaques tectoniques. Lorsque les frottements sont importants, le mouvement entre les plaques est bloqué. De l'énergie est alors stockée. La libération brutale de cette énergie permet de rattraper instantanément le retard du mouvement des plaques et cause un séisme majeur. Après la secousse principale, des répliques, parfois meurtrières, correspondent à des petits réajustements des plaques au voisinage de la faille.

L'importance d'un séisme se caractérise par deux paramètres : sa magnitude et son intensité.

- La magnitude traduit l'énergie libérée par le séisme. Elle est généralement mesurée sur l'échelle ouverte de Richter. Augmenter la magnitude d'un degré revient à multiplier l'énergie libérée par 30.
- L'intensité mesure les effets et dommages du séisme en un lieu donné. Elle apprécie la manière dont le séisme se traduit en surface et dont il est perçu. On utilise en Europe l'échelle EMS 98¹⁸ et non comme dans d'autres pays les échelles MSK64¹⁹ ou Mercalli. L'intensité varie dans toute la zone touchée. Des conditions topographiques ou géologiques locales peuvent créer des effets de site qui amplifient l'intensité d'un séisme. Sans effet de site, l'intensité d'un séisme est maximale à l'épicentre et décroît avec la distance.

III 2 2 Les dangers

Le séisme est le risque naturel majeur le plus meurtrier, tant par ses effets directs (chutes d'objets, effondrements de bâtiments) que par les phénomènes qu'il peut engendrer (mouvements de terrain, raz-de-marée, etc.). Outre les victimes, un très grand nombre de personnes se retrouvent blessées, ensevelies, déplacées ou sans abri.

Il cause aussi des dégâts considérables aux biens.

Un séisme peut engendrer la destruction des infrastructures (ponts, routes, voies ferrées, etc.), des usines, ainsi que la rupture des réseaux. Le séisme de San Francisco du 18 avril 1906²⁰ a

¹⁸ Ou plutôt on devrait l'utiliser depuis janvier 2000 : les unités du fichier SISFRANCE (voir plus loin) sont MSK. EMS signifie european microseismic scale.

¹⁹ Medvedev-Sponheuer-Karnik et non MKS, mètre kilo, seconde. Elle comporte 12 degrés. (Sponheur est une orthographe courante mais erronée).

²⁰ À 5 h 15. 700 victimes, 250 000 sans abris et 25 000 immeubles incendiés.

provoqué l'incendie d'une grande partie de la ville ; le feu a été entretenu par des fuites importantes des conduites de gaz.

Si les impacts sociaux, psychologiques et politiques d'une possible catastrophe sismique en France métropolitaine sont difficiles à mesurer, les enjeux économiques, locaux et nationaux peuvent, en revanche, être appréhendés.

III 2 3 Le risque

Chaque année, à la surface du globe, il y a plus de cent cinquante séismes de magnitude supérieure ou égale à 6 sur l'échelle de Richter (c'est-à-dire de séismes potentiellement destructeurs) et 1 à 2 de magnitude supérieure à 8.

En France, le risque sismique est le plus élevé dans les Antilles : la Guadeloupe et la Martinique sont situées au contact de deux plaques tectoniques (voir ci-dessus).

En métropole, les Alpes, la Provence et, dans une moindre mesure, les Pyrénées, sont considérées comme les régions où le risque est le plus fort.

Les autres régions où la sismicité n'est pas considérée comme négligeable sont d'anciens massifs (Massif Armoricaïn, ouest du Massif Central, Vosges) et des rifts (Limagne et fossé du Rhin). Il ne faut cependant pas les oublier.

La France métropolitaine est considérée comme ayant une sismicité moyenne en comparaison de celle d'autres pays du pourtour méditerranéen :

- le seul séisme d'une magnitude supérieure à 6 enregistré au XX^e siècle est celui dit de Lambesc, au sud du Lubéron, le 11 juin 1909, qui fit une quarantaine de victimes.



Séisme de Lambesc (Bouches-du-Rhône),
le 11 juin 1909.

- il y en a eu bien d'autres dans l'histoire ; le fichier SISFRANCE constitué par l'institut de radioprotection et de sécurité nucléaire, EDF et le BRGM rassemble les éléments historiques de la sismicité en France.

Parmi les séismes les plus meurtriers et les plus fameux, nous en citons un certain nombre sur le tableau ci-après.

En France métropolitaine, il faut se souvenir au moins :

- du séisme de Bâle de 1356, le séisme majeur en Europe occidentale et ses répercussions en Alsace, en Franche-Comté, ...
- du séisme de Lisbonne, de ses victimes et des réflexions polémiques de Voltaire et de Rousseau sur cette catastrophe ;
- que le dernier séisme en Bretagne date du 1^{er} octobre 2002 ; il avait une magnitude de 5,5. et a été ressenti dans tout le massif armoricain. Ce n'est pas le premier (2 janvier 1959, 9 janvier 1930, ...). Ce ne sera pas le dernier.

Quelques séismes remarquables.

Date	Localisation	Magnitude (Richter)	Impacts.
227 av JC	Rhodes		? destruction du Colosse.
18 octobre 1356	Bâle et dans toute l'Alsace 2 secousses principales; 14 répliques en 2 jours.		300 morts à Bâle 1 000 à 2 000 (?) victimes dans toute la région. 80 châteaux détruits, cathédrale de Bâle en partie effondrée dans le Rhin. Dégâts (?) et secousses ressenties à Besançon, Reims, etc..
1556	Chine		800 000 morts.
Début du XVII ^e siècle	Japon (Edo)		200 000 morts. La ville est rasée.
1 ^{er} novembre 1755	Portugal (Lisbonne)	8,7	90 000 morts. Le séisme a été suivi d'un tsunami dévastateur : de 3 à 6 oscillations de très grande amplitude (à Cadix retraits de la mer à 2 km et retour d'un mur d'eau 20 à 30 minutes plus tard)
22 mai 1960	Chili	8,5	2 000 victimes recensées. Le tsunami qui a suivi a ravagé Hawaï (vague de 18 m de hauteur) puis le Japon.
18 avril 1906	USA (San Francisco)	8,5	700 morts, 250 000 sans abri. La ville de la ruée vers l'or, en bois, a été quasi détruite par un incendie alimenté par des fuites de gaz.
1 ^{er} septembre 1923	Japon	8,2	143 000 victimes ; grand incendie dans Tokyo
26 janvier 2001	Inde (Gujarat)	7,9	Plusieurs dizaines de milliers de victimes.
31 mai 1970	Pérou	7,8	67 000 victimes, 530 millions de dollars de dégâts.
28 décembre 1908	Italie (Messine)	7,5	Messine et Reggio de Calabre détruites. 86 000 victimes. Séisme suivi d'un tsunami : vague de 3 m. à Messine - bateaux détruits - et de 10 m au paroxysme.
17 janvier 1995	Japon (Kobe)	7,2	6 300 victimes, 12 000 bâtiments détruits.
7 décembre 1988	Arménie	6,9	50 000 victimes, trois grandes villes détruites.
17 août 1999	Turquie (Izmit)	6,7	17 000 victimes, dues essentiellement au non-respect des normes de construction parasismique.
2 décembre 2003	Iran (Bam)	6,3	26 000 morts. La ville construite en terre est détruite à 80%
31 octobre 2002	Italie (Molise)	5,4	Une école s'effondre, tuant de nombreux enfants

III 2 4 La prévention

La prévention du risque sismique porte en particulier sur deux points :

- appliquer rigoureusement les normes de construction. L'objectif n'est pas d'empêcher les constructions de s'effondrer mais d'éviter qu'elles ne fassent des victimes quand elles s'effondrent
- informer les citoyens sur les mesures de protection individuelle à prendre en cas de séisme.

La prévision, en l'état actuel des sciences, n'est pas possible.

IV LES CYCLONES

IV 1 Caractéristiques générales

Un cyclone est une dépression d'origine tropicale dans laquelle la vitesse des vents moyennée sur 10 minutes dépasse 117 km/h.



Trois vues en photomontage du cyclone Andrew les 23, 24 et 25 août 1992 dans sa course d'est (au large de la Floride, les Bahamas et Cuba) en Ouest (sur la Louisiane et le golfe du Mexique). On voit l'œil du cyclone et ses murs abrupts. Le diamètre de l'œil est fonction inverse de l'intensité.
Image satellitaire NOAA.

Un cyclone se présente comme une masse nuageuse organisée en bande spiralée qui converge vers le centre (l'œil). L'œil est une zone de calme caractérisée par des vents faibles et généralement par un ciel clair ou peu nuageux. A la périphérie de cet œil, dans le mur de nuages qui l'entoure, le phénomène atteint son paroxysme : averses diluviennes, vents pouvant atteindre les 350 km/h en rafale.

Généralement la masse nuageuse des cyclones est de l'ordre de quelques centaines de km et le diamètre de l'œil de l'ordre de quelques dizaines de km.

L'intensité de ces perturbations est classée (échelle de Saffir-Simpson) de 1 à 5 selon la vitesse moyenne du vent et la pression atmosphérique au centre du cyclone.

Dénomination	Vitesse moyenne du vent en km/h	Pression atmosphérique dans l'œil hPa	Quelques références récentes
Classe 1	118<<153	>980	Cindy en 1993 reclassé.
Classe 2	154<<177	965<<980	
Classe 3	178<<209	945<<964	
Classe 4	210<<248	920<<944	Hugo en 1989
Classe 5	>249	<920	Camille ²¹ , Andrew en 1992, Katrina en 2005.

²¹ En 1969. Déjà cité.

IV 2 Les dangers et les risques

Toutes les zones océaniques tropicales, sauf l'atlantique sud et le pacifique sud sont intéressées mais à des degrés divers : en France : les Antilles, l'île de la Réunion, etc.

En moyenne, 85 tempêtes tropicales²² naissent par an dans le monde dont environ la moitié atteint le stade "cyclone". Pour ceux qui concernent les Antilles et le continent américain, les dépressions naissent dans l'Atlantique en face des îles du Cap Vert et se déplacent vers l'Ouest en évoluant éventuellement en puissance.

C'est dans les zones surpeuplées du nord du bassin indien, au Bangladesh en particulier, que ces phénomènes sont les plus redoutables : 250 000 victimes le 13 novembre 1970 avec le cyclone Bhola (500 000 dans plusieurs sources), 150 000 en avril 1991, ...

Parallèlement, le cyclone Andrew en 1992 (plus intense que Bhola) a fait 26 morts, a causé 26,5 milliards de US\$ de dégâts aux Bahamas en Floride et en Louisiane.

Les dangers sont dus aux caractères d'un cyclone :

=> IV 2 1 Le vent.

Le pouvoir destructeur du vent est proportionnel au carré de sa vitesse. Outre leur pouvoir mécanique, les vents à des vitesses élevées transforment tout ce qui offre une résistance (tôles ondulées, affiches publicitaires, etc.) en projectiles.

A l'approche d'un cyclone, le vent se renforce d'abord progressivement puis de façon exponentielle à l'approche de l'œil. À sa proximité le vent souffle avec sa force maximale dans des conditions indescriptibles. Le mur du cyclone franchi, le vent tombe brutalement et le ciel s'éclaire. Cette accalmie dure de quelques dizaines de minutes à quelques heures mais le mur de l'œil à nouveau franchi, la reprise de la tempête est tout aussi brutale et le vent qui a tourné de 180 degrés casse tout ce qu'il avait ébranlé lors de son premier passage.

=> IV 2 2 La marée de tempête

La dépression²³ atmosphérique importante dans l'œil du cyclone crée une élévation brutale du niveau de la mer et un mouvement oscillatoire qui se diffuse sans discontinuer en se déplaçant. C'est la houle cyclonique. Quand cette houle cyclonique se conjugue avec la marée astronomique²⁴, le phénomène s'appelle une marée de tempête.

L'amplitude de la marée de tempête dépend de la vitesse de déplacement du cyclone, de la forme de la côte et de la bathymétrie.

Lors du Cyclone Bhola déjà cité, la marée de tempête a dépassé 9 m sur un littoral plat du Bangladesh permettant à la mer de pénétrer sur une dizaine de km.

En 1994, à Saint Martin, une marée de tempête a traversé tout le lido et s'est arrêtée dans la lagune en ayant tout dévasté. Sa hauteur avait été estimée aussi à une dizaine de mètres. Il y a eu des victimes.

=> IV 2 3 La houle

Il s'agit là du mouvement de l'eau généré par la vitesse du vent au contact avec la surface de l'eau. Sa dangerosité s'ajoute à celle de la marée de tempête.

²² Les dépressions tropicales sont à l'origine de vents inférieurs à 63 km/h et les tempêtes tropicales de vents dont la vitesse est comprise entre 63 et 117 km/h.

²³ 1 hPa de dépression équivaut à 1cm d'élévation de hauteur d'eau. La pression atmosphérique normale est de 1015 hPa.

²⁴ De centimétrique à décimétrique dans les Antilles.

Elle est citée dans les documents de prévention des risques de la Martinique, au même niveau de dangerosité que la marée de tempête²⁵.

=> IV 2 4 Les précipitations

Les formations nuageuses des cyclones sont très actives et sont à l'origine de pluies diluviennes comparées aux phénomènes métropolitains. Le volume des précipitations contenues dans un cyclone mature s'évalue en milliards de m3.

Les précipitations les plus intenses sont localisées à proximité des murs de l'œil. Le temps pendant lequel les nuages restent actifs au-dessus d'un lieu donné est plus important que l'intensité de l'averse.

Dans l'océan indien, le relief de l'île de la Réunion accentue les averses déjà paroxystiques. Certains records du monde y ont été établis :

Date	Hauteur d'eau en mm.	Durée de l'observation	Observations
Janvier 1966	1825	24 heures.	Cyclone Denise.
Janvier 1980	1170	12 heures.	Cyclone Hacinthe.
id	3240	72 heures	Id
id	6401	11 jours.	id

Il a été observé²⁶ 428 mm en deux heures lors du cyclone (encore classée tempête tropicale) Cindy en 1993 en Martinique²⁷. On rappelle que la valeur moyenne annuelle des précipitations à Paris est de l'ordre de 700 mm.

Ces pluies diluviennes s'accompagnent :

- de ruissellements généralisés²⁸ ;
- de crues à cinétique rapide et d'inondations dangereuses ;
- de mouvements de terrain, d'érosion y compris côtière, d'écoulements de boue de densité variable²⁹, d'écoulement de cendres volcaniques (laars ou lahars) à l'énergie considérable.

IV 3 La prévention

- Il n'existe aucun moyen d'agir sur l'aléa. On a vu d'ailleurs que l'énergie qu'il déploie est considérable.
- Le risque est quantifié et qualifié par de multiples autorités.
- Les épisodes cycloniques sont répertoriés ; on peut citer les recherches historiques réalisées aux USA (avec des documents dont les premiers datent du début 16^{ème} siècle). On peut élaborer des statistiques sur "les temps de retour"³⁰ dans la zone nord-américaine ; elles sont très incomplètement exploitées dans les Antilles françaises.
- Les moyens de surveillance et de prévision existent et sont regroupés pour une grosse partie du globe (Pacifique, Atlantique) au "national hurricane center" à Miami. Le

²⁵ Ceci mérite une investigation plus approfondie.

²⁶ DIREN Martinique.

²⁷ Cette valeur est localement méconnue.

²⁸ Très importants en Martinique en 1992 lors du passage de Cindy.

²⁹ Ceci d'ailleurs explique le transport de blocs de rocher d'un volume considérable sur des distances importantes. Ces blocs flottent.

³⁰ En Martinique, un phénomène cyclonique (dépression, tempête, cyclone) tous les 4 ans ; un cyclone tous les 12 ans. Mais on cite 3 000 (?) morts en août 1813, 703 morts les 18/22 août 1891, ... en Martinique et dans les îles voisines.

suivi des phénomènes en temps réel est transparent et accessible sans difficulté³¹. Ceci semble toutefois mal adapté aux zones d'habitat très dense et très vulnérable des pays pauvres. Rien n'est organisé au niveau international pour l'océan indien.

- Les moyens de prévention existent : les techniques de protection individuelle sont souvent anciennes. Il existe, en effet, des maisons en bois très anciennes aux Antilles. Les techniques récentes adaptées aux constructions locales en dur sont souvent mises en place, hors de l'habitat spontané.
- La préparation à la crise est sans faille apparente aux moins aux Antilles.
- Les pertes en vies humaines ont maintenant le plus souvent des causes connexes (curiosité, imprévoyance) : 64 victimes en 45 ans, en Martinique, en majorité par noyade.

Quand les cyclones touchent des lieux densément habités, les dégâts sont toujours considérables.

³¹ www.nhc.noaa.gov.

V LES INCENDIES DE FORET.

V 1 Les incendies de forêt dans le monde.

Le phénomène incendie de forêt concerne les forêts de toutes les latitudes :

- équatoriales ,notamment en Asie du sud-est ;
- tropicales sèches, particulièrement en Afrique , Amérique du Sud et Australie ;
- méditerranéennes, notamment en Europe du Sud , Afrique du Nord, ouest des États Unis d'Amérique ;
- boréales et de montagne en Asie et Amérique du nord.

La forêt feuillue océanique, les forêts pluviales de montagne, en absence de "la civilisation", apparaissent indemnes de feux.

Les feux anthropiques (pour la chasse ou la mise en culture) conduisent à des forêts secondaires plus inflammables et combustibles que la forêt primaire.

La foudre et de façon exceptionnelle, les éruptions volcaniques avec les chutes de météorites, sont les causes naturelles des départs de feu.

On attribue à la foudre la très grande majorité des départs de feu en forêt boréale : 1% de la surface forestière parcourue annuellement par les feux en Sibérie méridionale. Elle a représenté, en 2003, de 3 à 5% des éclosions de feux en France.

Les communautés végétales de certains types de forêts comme notamment celles de la forêt méditerranéenne sur substrat siliceux, présentent des adaptations physiologiques profondes au passage du feu. La régénération par graines de certaines essences forestières majeures est permise ou facilitée par le feu. On peut citer le séquoia aux USA ; l'eucalyptus en Australie, le pin sylvestre en Sibérie.

V 2 Les espaces concernés en France.

Les espaces principalement concernés se répartissent en deux ensembles :

- méditerranéen avec les départements de deux régions Languedoc Roussillon et Provence - Alpes - Cote - d'Azur, la Corse et la Drôme et l'Ardèche ;
- les landes de Gascogne.

Ailleurs, dans certaines régions à tendance aride comme l'Alsace et le couloir rhodanien ou à sol siliceux comme la Bretagne, l'aléa est sporadique.

Dans les Landes de Gascogne, les incendies concernent toujours des espaces forestiers.

Ailleurs, notamment en région méditerranéenne, l'aléa concerne aussi des espaces naturels ouverts, landes et garrigues, plus ou moins imbriqués à la forêt.

V 2 1 L'aléa.

L'aléa est un phénomène de combustion de matières hydrocarbonées constitutive de bois en particulier, lignine, cellulose, terpènes. Il s'agit d'une réaction physico-chimique qui agit en chaîne : sa puissance croît de façon exponentielle comme la surface intéressée. Cette surface, en terrain plat, dans un milieu homogène et avec un vent régulier, a un contour elliptique avec une enveloppe parabolique.

Cette réaction physico-chimique se déclenche avec une "mise à feu externe" fonction de l'inflammabilité de la végétation, et se développe en fonction de sa combustibilité.

Le vent, en apportant de l'oxygène, est un facteur aggravant direct ; le relief qui crée ou renforce localement les vents et la chaleur par la transpiration et la dessiccation des végétaux,

sont des facteurs aggravants indirects. Des phénomènes d'inflammation explosive d'une phase gazeuse constituée d'essences volatiles ont été observés.

L'aléa ne concerne pas que des zones forestières, subforestières comme les landes et les garrigues ou cultivées comme les céréales prêtes à faucher, les lavandes mais aussi des espaces urbanisés arborés comme en 2003 à Ste Maxime et Cagnes S/Mer dans lequel le feu s'est propagé dans la végétation stressée par une sécheresse exceptionnelle.

V 2 2 Les enjeux.

Il s'agit d'abord :

=> De la forêt par elle - même avec ses valeurs patrimoniales, paysagère, écologique, stockage de carbone, économique, ...

Il faut vraiment insister sur le rôle assuré par la forêt en particulier dans les régions de petite et de moyenne montagne de protection de l'aval :

- protection contre les mouvements de terrain, les coulées boueuses et les avalanches. Il faut citer la coulée boueuse qui a atteint le milieu du village d'Angles (Alpes de Haute Provence) en 1982. Le premier orage, quelques jours après un grand incendie, a déclenché cette coulée catastrophique.
- protection de la ressource en eau , en quantité et qualité, particulièrement liée aux forêts anciennes.
- Tout ceci est largement perdu de vue parce que ces rôles de protection sont bien assurés et qu'ils apparaissent venir de soi.

=> Des installations et activités humaines, qui traversent ou sont contiguës de massifs forestiers : maisons d'habitation, mais aussi bâtiments publics, réseaux électrique téléphonique et cultures agricoles dont les récoltes sont facilement inflammables.

Sur les 4,6 millions d'hectares, 2,3 sont régulièrement parcourus par le feu dans le sud de la France avec une plus forte récurrence en zone littorale méditerranéenne et en Corse.

En moyenne depuis 20 ans, la surface parcourue par le feu est de 23 000ha par an soit 4% de la zone littorale et le nombre de départs de feux de 2. 900.

Année	Surface parcourue en ha	Nombre de départs
2003	61 506	3 490
2004	10 596	2 028
2005	18 000	2 000

V 2 3 Quelques catastrophes récentes en France.

La forêt des landes de Gascogne a connu de terribles incendies au milieu du siècle dernier. 42 000 hectares en 1937, 396 000 hectares entre 1941 et 1947.

A plusieurs reprises l'incendie propagé par l'éclatement des pommes de pin a frappé aux portes de Bordeaux. Ces catastrophes ont marqué le début de l'organisation de la prévention en France.

Deux événements ont fortement marqué les mémoires :

Le 3 octobre 1970, l'incendie du massif du Tanneron coûta la vie à la femme et aux quatre enfants de l'écrivain Martin Gray.

En avril 1989, l'incendie de la Montagne Sainte-Victoire au dessus d'Aix en Provence laisse encore son empreinte près de 30 ans après.



Diaporama d'incendies en forêt méditerranéenne³².

V 3 La prévention dans les départements à risque

La prévention des incendies de forêts³³ dans les départements à risque comporte :

=> Des mesures forestières pour réduire globalement l'aléa et sauvegarder les enjeux forestiers. Elles sont regroupées sous la dénomination de défense des forêts contre l'incendie soit "DFCI". Elles comprennent en particulier :

³² Photos CEMAGREF.

³³ Elle est principalement de la compétence du MAAPAR.

- Des équipements en pistes d'accès, la création de points d'eau, de zones débroussaillées pour faciliter la surveillance et la lutte une fois l'incendie déclaré. Les zones débroussaillées sont des coupures de combustible. Une pratique efficace, en développement, consiste à détruire la végétation, par un feu provoqué et à la propagation contrôlée, à une époque où les dommages écologiques sont réduits. C'est "brûlage dirigé".
- L'information du public
- La surveillance couplée à l'intervention sur les feux naissants. L'essentiel de la surveillance est assuré par environ 1 100 personnes : office national des forêts, collectivités territoriales, agents du ministère de l'agriculture, etc. sans oublier les bénévoles dont le nombre est difficile à estimer.

On estime que la surveillance et l'intervention sur les feux naissants contrôle 98% des départs de feu. Cependant, les infrastructures restent insuffisantes dans des situations de risque extrême et de feux très énergétiques comme celles rencontrées en 2003.

=> Des mesures concernant l'urbanisme et les infrastructures principalement hors forêt. Elles comprennent en particulier :

- Des interventions sur l'existant comme le débroussaillage aux abords des voies de communication, ferrées, ... sur une profondeur fixée par arrêté préfectoral pour chaque département ou celui des constructions en forêt³⁴. Le débroussaillage crée des surfaces peu combustibles où le feu perd spontanément son intensité et facilite notablement la lutte active. Ces mesures sont encore insuffisamment mises en œuvre par les propriétaires des constructions et des ouvrages.
- Une planification spatiale de la construction et des infrastructures, dans les zones à risque avec l'élaboration des plans de prévention des risques incendies de forêt (PPRIF). Ces PPR déterminent en particulier :
 - des zones inconstructibles par exemple où l'aléa ne peut être contenu ou où l'urbanisation compliquerait la lutte,
 - des zones constructibles moyennant des équipements spécifiques réduisant significativement l'aléa comme la densification de l'habitat, la permanence de zones débroussaillées largement dimensionnées, la création de pistes périmétrales
 - des zones constructibles sans contraintes particulières.

En octobre 2005, la situation est la suivante :

Communes exposées au risque	5 642
PPRIF en vigueur	54
PPRIF prescrits	111

Beaucoup de PPRIF, notamment dans le département du Var, ont été prescrits depuis les grands incendies de 2003.

V 4 Quelques perspectives.

La certitude de voir la vulnérabilité continuer à augmenter.

Les espaces boisés en zone méditerranéenne progressent et se densifient³⁵; ceci est une des conséquences de la déprise agricole déjà ancienne. Ce processus est concomitant d'une

³⁴ Sur une profondeur de 50 m.

³⁵ De l'ordre de 1% par an de la surface totale des deux régions LR et PACA selon l'IFN.

urbanisation rapide largement constituée d'habitat individuel ; ceci est la conséquence de la démographie positive de ces régions et des habitudes de vie.

La situation du massif landais est bien différente : la surface de la forêt est stabilisée voire en légère régression du fait de défrichements agricoles. La structure de ce massif entièrement géré pour la production de bois est stabilisée depuis longtemps.

La continuité des massifs forestiers se renforce, et les interfaces forêt - habitat sont de plus en plus nombreuses. Le risque s'accroît donc par ses deux composantes alea et enjeu.

Le réchauffement climatique ne paraît pas être de nature à freiner la progression forestière : les espèces majeures de cette forêt (chêne vert , pin d'Alep , pin maritime) sont aptes à prospérer sous des climats plus chauds et secs et a fortiori sous un climat un peu plus humide.

Une situation fin 2005 qui peut faire craindre de nouvelles catastrophes.

La situation connue depuis 2003 au Portugal peut se répéter dans le sud de la France à l'occasion d'une succession de saisons plus contrastées.

Après les grands incendies de 2003, il n'y a pas eu les années suivantes 2004 et 2005 en France de grands accidents parcequ' à une pluviométrie estivale favorable s'est conjuguée des températures maximums peu élevées limitant l'évaporation des arbres.

Depuis 2 ans, les réserves en eau des sols forestiers restent très basses, notamment dans le couloir rhodanien.

V 5 Conclusion.

V 5 1 Un atout.

Cas particulier parmi les aléas, les incendies de forêt correspondent à une réaction chimique entretenue : en présence d'oxygène, quelle que soit l'intensité instantanée du feu, que le combustible se réduise ou disparaisse et la réaction ralentit ou s'arrête.

Ainsi, le prélèvement de bois ou de masse ligneuse, proportionné à l'accroissement biologique peut apporter un haut niveau de sécurité. L'exploitation forestière guidée de bons plans d'exploitation est un élément sécuritaire.

L'évolution des cours du pétrole peut rendre rentable - en terme monétaire - la sylviculture des milieux vulnérables en augmentant la demande de bois de chauffage et de biocarburants.

V 5 2 Mais des catastrophes possibles.

Des catastrophes de type californien ou portugais sont possibles, notamment depuis les départements des Bouches du Rhône jusqu'à celui des Alpes Maritimes, à l'ouest, en passant par celui du Var.

VI LES ALEAS LIES AUX PRECIPITATIONS

Ce sont, de loin, les aléas les plus fréquents en France métropolitaine.

Nous exposerons les différents aléas qui s'y rattachent et leurs effets, et d'abord les précipitations et leurs aléas directs.

Après avoir disserté sur le régime des eaux, on s'attachera aux crues et aux inondations. Nous rappelons que les crues conduisent à une élévation du niveau de l'eau dans le lit mineur (lieu des écoulements ordinaires), puis à un débordement dans le lit majeur (espace d'inondation) des cours d'eau.

VI 1 LES AVERSES INTENSES

VI 1 1 *Les dispositifs de mesure*

La quantité d'eau précipitée peut être mesurée à partir de pluviomètres et de pluviographes constitués en réseaux :

- les pluviomètres sont relevés chaque jour à 6 heures³⁶. Les mesures caractérisent les précipitations (appelées quelque fois précipitations journalières) ;
- les pluviographes font des mesures à pas de temps fixe³⁷ qui sont enregistrées automatiquement. Les mesures caractérisent les averses (par exemple de n fois 6 minutes d'origine glissante).

La mesure est toujours ponctuelle et la densité des appareils sur le terrain permet rarement d'apprécier l'étendue spatiale des phénomènes. Ainsi en région Languedoc-Roussillon,

- une zone pluvieuse de 150 km² a une probabilité de 70% d'être interceptée par au moins un poste pluviométrique avec la densité de stations d'observation existant entre 1958 et 1993 ; cette probabilité descend à 25% avec la densité des postes entre 1920 et 1939 ;
- un épisode orageux de quelques km² avait 1% de chance d'être intercepté avant 1958. Cette probabilité est actuellement de 3%.

La faible densité des instruments de mesure et le nombre limité d'années de mesures continues entraînent de larges incertitudes sur les caractéristiques des phénomènes pluvieux en un point quelconque du territoire. Les études statistiques tendent en conséquence à surestimer les périodes de retour de tous les phénomènes importants.

VI 1 2 *Les observations*

Les précipitations les plus dangereuses par leur intensité concernent d'abord la région Languedoc-Roussillon, puis une partie des régions Midi-Pyrénées, Provence - Alpes - Côte - d'Azur et Rhône - Alpes. Ce sont des déluges dont les conséquences sont souvent catastrophiques.

L'histoire a conservé le souvenir d'un certain nombre d'épisodes dévastateurs sur le même ensemble de régions. Pour les derniers siècles on peut citer par exemple 1820, 1827, 1843, 1872, 1875, 1890, 1891, 1900, 1930, 1940³⁸, 1999, 2002, ...

³⁶ Temps universel soit 8 heures locales sous le régime de l'heure d'été.

³⁷ Toutes les 6 minutes.

³⁸ Absolument catastrophique en Espagne et en France mais secrète en France, à l'époque, pour des raisons politiques. La valeur des averses n'est pas connue avec précision.

Quelques précipitations record en France métropolitaine.			
Date	Localisation	Précipitations des épisodes en mm	Observations
9 septembre 2002	Anduze (Gard)	687	Sur 12 heures environ;
12 et 13 novembre 1999	Lézignan (Aude)	551	En plaine 50 m d'altitude. Mais 206 mm à 10 km de là sur la même commune.
	Pulcheric (Aude)	450	idem
31 octobre 1993	Bavella (Corse)	906	En 36 heures et 792 en 24 heures
17 octobre 1940	La Llau (Pyrénées O.)	850	Au pied du Canigou à 900 m d'altitude
29 septembre 1900	Valleraugue (Gard)	950 ³⁹	
9 octobre 1827	Joyeuse (Ardèche)	792	À 200 mètres d'altitude, au pied du Tanargue

Ces épisodes catastrophiques sont rapidement oubliés même localement.

On peut dépasser le caractère ponctuel des mesures et caractériser les épisodes à travers les surfaces touchées par une précipitation d'intensité donnée⁴⁰ :

Superficies en km ² concernées par les événements pluvieux ayant occasionné plus de 400 mm en Languedoc Roussillon seul entre 1958 et 1993.						
pluie	nb	minimum	médiane	maximum	moyenne	écart type
400 mm	9	1,1	120	622	160	202
500 mm	4	1,9	37	140	54	60
600 mm	3	3,0	9	17	10	7

Ces surfaces sont encore plus importantes lors des épisodes des 12 et 13 novembre 1999 dans l'Aude et des 8 et 9 septembre 2002 dans le Gard.

Superficies en km ² concernées par les épisodes les événements pluvieux ayant occasionné plus de 400 mm en Languedoc Roussillon :		
pluie	Aude, les 12 et 13 novembre 1999	Gard, les 8 et 9 septembre 2002
400 mm	930	1800
500 mm	280	
600 mm	10	150

Il n'est pas inutile de rappeler que les précipitations moyennes annuelles à Paris sont de l'ordre de 700 mm.

Les informations sur les précipitations (et non les averses) sont contenues dans la banque de données PLUVIO gérée par Météo France. Les observations climatologiques historiques, centralisées jusqu'en 1950 par l'observatoire de Paris, ont été numérisées par des services étrangers (allemands et russes) et sont actuellement accessibles sur le web.

³⁹ Le directeur général de la climatologie de l'époque avait de sa plume remplacé cette valeur par 200mm qui a longtemps prévalu. De plus ces 950 mm seraient tombés en une dizaine d'heures selon une précision apportée par le préfet du Gard dans la phase contradictoire.

⁴⁰ Desbordes et Neppel de l'université de Montpellier II.

VI 1 3 Les dangers

Les dangers liés aux fortes averses sont identiques à ceux engendrés par les précipitations qui accompagnent les cyclones tropicaux. Les fortes et intenses précipitations sont la cause :

- de crues à cinétique rapide,
- de glissements de terrain, d'érosion,

qui seront vus plus loin ;

- de coulées de boue,
- de ruissellements généralisés,

qui sont vus ci-dessous.

VI 1 3 1 Les coulées de boue

Les caractéristiques générales.

Les précipitations intenses peuvent être directement dommageables sur les sols en particulier peu couverts (vignes, ...) et/ou fragiles.

L'énergie mécanique des gouttes peut détruire la structure du sol jusqu'à la quasi-liquéfaction. Dès lors qu'il existe une pente même légère, la boue se met en mouvement et l'énergie des "flots" érode tout sur son passage. Les coulées de boue sont souvent mortelles.

Dans les départements ultramarins, les cendres volcaniques, en particulier sur les pentes de la Pelée, sont régulièrement mobilisées par les averses intenses qui accompagnent les phénomènes cycloniques. Ces phénomènes "laars ou lahars" possèdent des énergies considérables⁴¹. La modélisation des écoulements a fait l'objet d'articles récents dans la littérature scientifique.

Les lahars sont bien connus, dans la zone américaine et indonésienne ; ils sont très meurtriers.



Après le lahar du nevado del Ruiz (Colombie) : 25 000 morts le 13 novembre 1985⁴². La ville d'Armero a été rayée de la carte.



Village de Bacolor sous une coulée du boue du Pinatubo (Philippines, Iles de Luzon). 700 victimes et 100 000 sans abris en août 1991⁴³.

Les dangers en France métropolitaine.

En France métropolitaine ces phénomènes affectent les plaines agricoles fertiles aux sols limoneux et fragiles (Basse et Haute Normandie, département de l'Aisne, etc.). Ils sont déclenchés par des pluies d'orage.

⁴¹ TOUT flotte et en particulier les blocs de rocher les plus "importants". En effet ces coulées sont des émulsions de densité "d" souvent largement supérieure à 1 et exercent ainsi une "poussée d'Archimède" plus forte de "d" que l'eau.

⁴² Photo J Marso.

⁴³ Après les éruptions du mois de mars (et 5 siècles de sommeil du Pinatubo), la prévention avait été organisée par les américains de la base aérienne de Clark (située sur les pentes du volcan). Photo Yann Arthus-Bertrand.

Les phénomènes peuvent laisser des marques d'érosion localisée de plusieurs centaines de m3. Les flots sont concentrés dans la zone d'écoulement ordinaire (rus) et extraordinaires (vallons secs) des pluies d'orages.

Il faut citer parmi les catastrophes récurrentes de Haute Normandie et des pays de Caux, l'épisode du 16 juin 1997⁴⁴.

Les sols agricoles du plateau limoneux au dessus de La Vaupalière (76) ont été liquéfiés par un violent orage, ont suivi la pente, se sont retrouvés dans un talweg carrossé, ont suivi cette voirie et se sont concentrés rue Auguste Poncy endommageant les maisons riveraines. Ils se sont arrêtés à un carrefour avec une voie à grande circulation, en surplomb, où la boue s'est accumulée.

Il y a eu 3 morts.

Les photos⁴⁵ qui suivent illustrent la violence et la hauteur de la coulée. Elles illustrent aussi l'absence de mesure de prévention après le drame.



Voirie défoncée dans le talweg sec



Maison en construction⁴⁶, à l'amont, dans la rue Poncy. On distingue bien la laisse de crue.



La même en 2002

Des événements analogues ont fait au total 15 morts en janvier 1995 en Basse Normandie et en Bretagne, etc.

La prévention

- Le phénomène est connu. Ses causes aussi, ses effets sont entretenus dans la mémoire collective par nombre d'associations.

- La prédiction existe.

- Les dispositifs d'alerte sont ceux des précipitations intenses et sont opérationnels.

La prévision des coulées n'est pas encore possible et l'alerte quasi impossible compte tenu de la vitesse et de la durée du phénomène.

⁴⁴ On aurait pu aussi citer celui du 12 août 1997 à Pont Audemer, etc.

⁴⁵ Photos sapeurs pompiers et université de Rouen

⁴⁶ Comme toutes celles de la rue, les maisons ont été restaurées. Celle-ci a été achevée. Aucun des habitants actuels n'a été témoin de la catastrophe.

- La prévention consiste à agir le plus possible à l'amont, dans les champs et culture, à ne pas construire dans les zones vulnérables. Elle est bien connue mais insuffisamment appliquée.

VI 1 3 2 Les ruissellements généralisés

Ces phénomènes spectaculaires sont engendrés par les précipitations intenses sur des terrains même en faible pente, hors des lits des cours d'eau.

Un certain nombre de missions de retour d'expérience réalisées après des catastrophes météorologiques ont pu constater⁴⁷ leurs effets dans le département du Gard, les Cévennes mais aussi en Bretagne en 2001 et 2002 :

cultures plaquées au sol dans le sens de la plus grande pente du versant ;

bâtiments situés à mi pente du talweg, traversés par des courants torrentiels dans le sens de la plus grande pente. Si le courant d'eau réussit à pénétrer, l'intérieur du bâtiment se remplit jusqu'à ce qu'une ouverture cède, le vidant brutalement. Les dégâts sont considérables mais localisés.

Ces phénomènes ne sont pas décrits fréquemment et les dégâts sont pris en compte comme les conséquences d'inondations même s'ils sont localisés hors des lits majeurs des cours d'eau.

En ville les écoulements sont collectés et canalisés par la voirie et génèrent des "inondations éclair" souvent meurtrières.

VI 2 LES ALEAS LIES AUX COURS D'EAU

Il convient de rappeler très succinctement des notions générales sur le régime des eaux.

On distingue deux types d'analyse dans les mécanismes fondamentaux de génération des crues :

=> **l'analyse "hydrologique"** et hydro météorologique qui traite de la transformation des pluies (ou de la fusion nivale) en débits dans le bassin versant.

L'hydrologie s'appuie sur de nombreux éléments scientifiques et techniques et les observations des paramètres physiques que l'on peut mesurer avec plus ou moins de précision, et de régularité temporelle et spatiale (débits, précipitations, infiltrations, évaporations, nappes souterraines, etc.) et dont le domaine de variabilité est considérable.

La grande diversité et l'extrême complexité des processus physiques concernés par la transformation des précipitations en débits, dans l'espace et le temps, conduit à des modélisations dont les résultats présentent des incertitudes en rapport avec cette complexité.

=> **l'analyse "hydraulique"** qui traite du transfert et du transport des écoulements dans le réseau hydrographique.

L'hydraulique est gouvernée par les lois physiques fondamentales de la mécanique des fluides. **On dispose ainsi d'outils de modélisation pour les simulations utilisées pour les impacts des crues ou l'ingénierie des aménagements hydrauliques.**

⁴⁷ Des missionnés ont, en effet, aussi constaté des écoulements d'eau et non de boue.

VI 2 1 LES ECOULEMENTS EN RIVIERE

Les écoulements en rivière, et plus généralement dans le réseau hydrographique, sont le résultat d'un processus complexe de transformation des précipitations (pluie, neige) dans le bassin versant récepteur : en ruissellement direct - différé - infiltration dans le sol et les nappes souterraines - évaporation.

Les écoulements de surface comme les écoulements souterrains (en nappe comme en karst) sont l'une des composantes du cycle de l'eau.

VI 2 1 1 *Les dispositifs de mesure des cotes de l'eau*

Les hauteurs d'eau sont appréciées par des échelles, en général cotées en NGF⁴⁸ qui sont lues par des observateurs. Elles peuvent être appréciées en continu par des appareils à flotteur. Un stylet asservi au flotteur marque sa position sur du papier qui se déroule avec un mouvement d'horlogerie. Ces limnigraphes mécaniques sont de plus en plus remplacés par des appareils de mesure physique de la hauteur (capteurs à ultra sons, bulle à bulle, etc.) et enregistreurs électroniques qui peuvent transmettre (par radio, téléphone satellite, etc.) des informations en temps réel ou légèrement différé. Ces stations limnimétriques sont organisées en réseaux (par bassin, sous bassin etc.).

Certaines de ces stations sont utilisées pour "l'hydrologie générale" car il est possible d'attacher un débit précis⁴⁹ à une cote. La relation cote-débit nécessite de tracer une "courbe de tarage" et de la tenir à jour régulièrement au moyen de jaugeages.

Ces jaugeages⁵⁰ nécessitent des interventions de spécialistes qui utilisent des techniques en apparence simples mais sophistiquées. Ces jaugeages (de fréquence moyenne au moins bi mensuelle) mobilisent beaucoup de moyens humains et sont très chers.

VI 2 1 2 *L'évaluation des débits*

L'évaluation du débit des crues (des inondations)

Elle pose un certain nombre de problèmes pratiques :

- Tous les cours d'eau ne sont pas équipés de stations limnimétriques.
- Quand il y en a, certaines stations peuvent être endommagées et même emportées par les crues comme d'ailleurs les pluviographes par les averses intenses.
- La réalisation des jaugeages n'est ni simple ni dénuée de danger en période de crue.

Si l'observation des cotes est toujours nécessaire, elle n'est jamais suffisante : les cotes sont influencées par de nombreux facteurs à l'amont comme à l'aval, liés à la géométrie et à la rugosité des lieux d'écoulement. L'observation des champs de vitesse est donc toujours nécessaire mais moins fréquente⁵¹. L'estimation immédiate des débits à partir des cotes est souvent très difficile car la cote de la rivière en crue est au-delà des courbes de tarage qui ont été établies par jaugeages.

⁴⁸ Niveau géographique national.

⁴⁹ Parce que la mesure est chère, la priorité est actuellement mise sur les réseaux d'usage, c'est à dire limnimétriques, pour les services de prévision des crues. Depuis les années 1990, l'hydrologie générale comme l'hydraulique souffre d'une crise importante en France essentiellement due à une perte de savoir faire et un déficit systémique de compétence technique à tous les niveaux.

⁵⁰ Il s'agit d'explorer le champ des vitesses dans un profil transversal au moyen de "moulinets". Ce sont des appareils munis d'une hélice tarée dont la vitesse de rotation est une fonction simple de la vitesse du courant.

⁵¹ Il faut d'abord être là au bon moment et rester en sécurité.

- La reconstitution des lignes d'eau à partir de photos aériennes des submersions, et/ou des cotes des laisses de crue ainsi que d'autres sources comme des témoignages est possible avec une précision largement suffisante. Le calcul des débits correspondant est en revanche un travail long et délicat car il doit intégrer toutes les pertes de charge.

Pour évaluer la période de retour, l'analyse statistique de l'événement se heurte aux mêmes difficultés que pour la pluviométrie. Il s'y ajoute des questions propres à l'hydrologie : il n'existe pas de lien déterministe entre les précipitations et les débits car il faut faire intervenir d'autres variables pour tenir compte de l'état initial des bassins, de la localisation des pluies par rapport aux limites des bassins versants, etc.

L'allongement des séries d'observation est possible. Des études bibliographiques (historiques) apportent des informations ; elles permettent de retrouver les événements et de connaître les cotes, souvent avec précision, et les débits, mais pas avec la même précision. Elle se heurte au manque de spécialistes⁵².

La géomorphologie donne une idée de la crue maximale, mais peu d'éléments sur la datation et la fréquence

Ainsi la fixation de l'aléa de référence des PPR, *"la plus forte crue connue et, dans le cas où celle-ci serait plus faible qu'une crue de fréquence centennale, cette dernière"*, nécessite des recherches historiques auxquelles les ingénieurs ne sont pas formés et qu'ils rechignent à faire quand ils ne les dénigrent pas. Ceci peut entraîner des répercussions fâcheuses :

Pourtant la méthodologie de ces recherches est de mieux en mieux fixée. De ce fait, on observe souvent que c'est le débit centennial calculé qui est pris comme aléa de référence même si l'écart type du débit n'est généralement pas mentionné⁵³. Il n'est pas rare de voir extrapoler, dans la définition des règles de l'art, le débit de pointe de la crue à partir d'une série d'observations trop brève faute de séries de longueur suffisante. C'est alors le nombre de méthodes différentes utilisées qui semble assurer la validité du résultat⁵⁴. Tout ceci n'est évidemment ni rationnel ni conforme aux instructions ministérielles : l'aléa de référence ne doit pas être minoré.

L'évaluation du débit des étiages (les sécheresses hydrologiques).

Parce que l'État s'est intéressé aux étiages pour l'irrigation des terres agricoles et l'alimentation en eau potable des communes rurales, les stations d'hydrologie générale ont été installées en majorité sur les cours d'eau dont la compétence en matière de police des eaux appartenait au ministère chargé de l'agriculture.

Parce que la mesure des débits d'étiage des cours d'eau importants est difficile à faire (seuils calibrés, etc.) et à organiser et que la navigation se contente de cotes "seuils" dans le chenal principal des fleuves, la quantification des étiages est rare.

Pourtant la mesure des étiages⁵⁵ comme des crues donnent des indications fondamentales sur l'hydrologie.

⁵² L'association d'historiens, d'hydrologues et d'hydrauliciens commence en France.

⁵³ On a vu des crues centennales calculées avec une série d'observations inférieure à 30 ans, ou la période de retour des crues de 2002 en Bretagne affichée centennale alors que l'écart type était de l'ordre du millier d'années.

⁵⁴ Ils sont, bien entendu, du même ordre de grandeur mais pourquoi retenir la valeur médiane et non le maximum?

⁵⁵ Ce n'est pas la "valeur 0" qui est importante, c'est la courbe de tarissement, la vitesse avec la quelle le débit est arrivé à 0 et le temps qu'il y est resté. La forme du limnigramme donne des indications majeures.

Un récent colloque international organisé à Lyon en 2004 par la SHF⁵⁶ sur les phénomènes hydrologiques extrêmes a révélé d'abord l'absence en France de toute organisation structurée sur la mémoire des événements hydrologiques importants et ensuite la pauvreté des informations disponibles sur les étiages et la sécheresse.

De nombreux pays ont dépassé ce stade et recourent systématiquement aux études de documents historiques pour mettre à jour leurs connaissances.

Par exemple aujourd'hui en Espagne, faute d'informations quantitative et qualitative précises, l'étude approfondie de cérémonies religieuses diverses, processions, rogations, ..., permet d'obtenir des informations fort précises sur la sévérité de la sécheresse, son étendue géographique, sa durée et ses répercussions sur l'économie locale.

Ce type d'étude qualifiée péjorativement "d'histoire" est fiable, a un intérêt scientifique et technique considérable.

En France, ces études sont le fait de quelques hommes (Le Roy Ladurie, Cœur, ...) et suscitent un intérêt guère en relation avec la période d'incertitude climatique actuelle.

Les études disponibles ne sont ni regroupées ni exploitées comme elles devraient l'être.

Les observations des stations d'hydrologie générale (et de quelques stations limnigraphiques) sont centralisées dans la banque nationale HYDRO gérée par le MEDD. Cette banque, accessible par le net, est ouverte à tout public.

Elle contient le résultat de quelques calculs statistiques simples sur les stations d'hydrologie générale tels que les débits d'étiage et de crue de diverses périodes de retour.

VI 2 1 3 Le régime de quelques cours d'eau

Il résulte des caractéristiques du climat que les cours d'eau en France ont des valeurs de référence fort différentes tant en étiage qu'en crue :

Quelques débits caractéristiques de cours d'eau de différents régimes.						
Cours d'eau	Station	Surface du bassin versant	Module spécifique ⁵⁷	Débit d'étiage centennal spécifique ⁵⁸	Débit de crue cinquantennale spécifique ⁵⁹	Débit de crue cinquantennale ⁶⁰
Unités		Km ²	L/s/km ²	L/s/km ²	L/s/km ²	m3/s
Le Rhône	Ternay	50 560	20,6	6	111	5600
La Seine	Paris	43 800	6,6	1,2	53	2300
La Loire	Blois	28 320	9,5	1,3	100	3800
La Loire	Brive Char.	867	12,7	2,1	520	450
L'Ouveze	Vaison La Romaine	585	10,3	<1	360	210
Le Vidourle	Sauve	190	16,8	0	1 370 ⁶¹	260

⁵⁶ Société hydrotechnique de France.

⁵⁷ D'une manière générale, les débits spécifiques permettent de comparer des cours d'eau indépendamment de la surface de leur bassin versant.

⁵⁸ VCN10 : débit moyen spécifique sur 10 jours consécutifs.

⁵⁹ Débit moyen journalier maximum.

⁶⁰ QJ : débit moyen journalier maximum.

⁶¹ Il s'agit du débit vicennal. Le 9 septembre 2002, le débit maximum était de 2 100 l/s/km² et de 400m3/s.

VI 2 2 LES ECOULEMENTS⁶² SOUTERRAINS

Les écoulements souterrains sont de deux principaux types :

- Les écoulements karstiques pour les quels les modèles des écoulements à surface libre peuvent être appliqués.
- Les écoulements en nappe qui suivent la mécanique des écoulements dans les milieux poreux. Il existe deux principaux types de nappes⁶³ : les nappes libres dont l'écoulement est gouverné par la pression atmosphérique et les nappes captives dont l'écoulement est gouverné par la pression que les terrains situés au dessus du toit de la nappe exercent sur l'aquifère.

Les observations des cotes et les mesures de débit. Les crues et les inondations.

=> Les écoulements karstiques.

Tout ce qui a été écrit et ce qui suit sur le réseau hydrographique de surface s'applique aux écoulements karstiques.

Cependant, une rivière souterraine (karst) s'écoule dans un lit de dimension limitée⁶⁴. En cas de crue, l'eau est mise en charge et les écoulements vont de proche en proche gagner des karsts à des cotes supérieures dont les dimensions sont, elles aussi, limitées. Ces lits sont qualifiés d'historiques car abandonnés au fur et à mesure de la dissolution du calcaire en profondeur.

Ainsi, à l'exutoire, au débit "pleine gueule" de la résurgence du karst actif, c'est à dire du "tuyau en charge", s'ajoute celui des résurgences historiques (évidemment à l'amont) souvent complètement oubliées et le débit propre à l'écoulement de surface dans le talweg.

Ce type de phénomène de crue a eu des conséquences spectaculaires et fort dommageables en particulier à Bourg St Andéol (Ardèche) durant les épisodes catastrophiques de septembre 2002.

=> Les nappes souterraines.

Les observations sont faites d'une manière identique en lisant une cote d'eau à l'intérieur d'un puit, "trou" ou forage de petit diamètre en communication avec la nappe (piézomètre). Comme pour les écoulements superficiels on peut installer sur un dispositif de mesure continue, enregistreur, télé transmetteur. La connaissance d'une nappe souterraine suppose des dispositifs d'observation en nombre suffisant pour en déterminer sa surface, sa puissance et sa courbe de tarissement. En crue :

- les nappes captives débordent au niveau de leur alimentation et de leurs exutoires artificiels (puits artésiens) ou sous marin.
- La ligne d'eau des nappes libres s'élève jusqu'à déborder au niveau d'exutoires (sources) ou d'une manière généralisée par exemple :
 dans une vallée qui draine la nappe. Cela a été le cas des inondations "surprises" de la vallée de la rivière Somme en 2000/2001 qui ont été très dommageables.
 dans des "plaines" à un niveau inférieur au toit de la nappe. Cela a été le cas dans les plaines calcaires de département des Deux Sèvres en 1982 où des bourgs ont été inondés "par le bas" par plus d'un mètre d'eau. C'est fréquemment aussi le cas, ailleurs, dans de nombreuses caves "en saison" avec des impacts mineurs.

⁶² Il n'est pas inutile de rappeler que les eaux souterraines coulent d'amont à l'aval : si elles ne coulaient pas les puits déborderaient ! Les fleuves coulent même quand il n'a pas plu à l'amont : les nappes souterraines les alimentent.

⁶³ En simplifiant à outrance.

⁶⁴ Un tuyau.

Toutes ces crues ont une cinétique lente (les nappes ont une certaine inertie) ; elles peuvent être prévues longtemps à l'avance.

Dans tout ce qui suit, nous ne parlerons plus que des écoulements aériens.

VI 2 3 LES CRUES

Les mécanismes de génération des crues en rivières et fleuves conduisent à une élévation du niveau de l'eau dans le lit mineur (lieu des écoulements ordinaires), puis à un débordement dans le lit majeur (espace d'inondation).

Depuis le 19^{ème} siècle, on classe les crues en rapides et lentes, différenciées par la brutalité, la durée, le volume.

VI 2 3 1 Les crues à cinétique rapide

Ces crues peuvent se décomposer grossièrement en trois catégories où les principaux ingrédients sont dans l'ordre : intensité des pluies - surface réceptrice - pente - forme du bassin versant - structure du réseau hydrographique - pédologie - végétation.

Elles peuvent durer d'une heure à plusieurs dizaines d'heures, avec une réaction rapide aux pluies, un gradient de montée élevé du débit, des débits de pointe très importants mais un volume total modeste (voir le tableau ci-après).

D'une manière générale, les postes de mesure sont par nature particulièrement vulnérables ; ils sont souvent emportés par les crues exceptionnelles et les débits sont quelques fois difficiles à reconstituer. On distingue les :

=> crues instantanées,

brèves dues à des pluies d'orage de quelques dizaines à plus de cent mm/heure pendant une à deux heures sur quelques hectares à quelques km² sans possibilité de les localiser précisément, ni de les prévoir ; on admet qu'elles ont une possibilité d'occurrence uniforme sur une surface importante avec la même loi de probabilité d'intensité. On a parlé ci-dessus des ruissellements généralisés en zone urbaine.

=> crues subites

dites "éclair" (flash flood) se produisant sur des surfaces de quelques km² à la centaine de km², dues à des pluies orageuses intenses plus structurées dans l'espace et le temps de 100 à 300 mm dans certaines régions ; ces phénomènes existent en France métropolitaine. Ils sont redoutables et redoutés en zone urbaine (Bordeaux par exemple, ou Marseille parce que l'histoire – et non les hommes - en conserve la mémoire).

Il n'existe qu'une seule photographie de ce type de crue. C'est celle d'une lave torrentielle c'est à dire en simplifiant beaucoup, d'une crue de liquide dont la densité est supérieure à 1 (voir les coulées boueuses).



La Zarvagria, le 18 juillet 1987 à 16 h. la rivière est déjà en crue. la photo de droite a été prise 15 minutes après.

Le débit supplémentaire a été estimé à 600 m³/s et la vitesse d'avancement du front à 8 m/s.

Photo T VEZIN in Analyse des crues de l'année 1987 Office fédéral de l'économie des eaux –Service hydrologie et géologique national. Confédération helvétique.

=> crues rapides

Elles se produisent sur des surfaces de 500 km² à 5 000 km² pendant 6 à 36 heures avec un temps de concentration de moins de 12 heures pour des bassins de 1 000 km². Les pluies qui les génèrent (circulation météorologique du sud ou sud-est en métropole,...) ont des intensités horaires de plusieurs dizaines de mm et des cumuls de plusieurs centaines de mm voire dans les départements d'outre mer, des intensités horaires de plusieurs centaines de mm avec des temps de concentration encore plus brefs.

Les volumes d'eau impliqués par les crues centennales exposées à ces deux derniers paragraphes sont de l'ordre de quelques dizaines à plusieurs centaines de millions de m³ pour 100 à 10 000 km².

Quelques caractéristiques de crues rapides.						
Date	Bassin	Point de mesure	BV en Km ²	Débit max en m ³ /s.	Débit max journalier en m ³ /s	Volume de l'événement en Mm ³
22 / 9 / 92	Ouveze	Vaison Romaine La	585	1000	270	37
5 / 10 / 95	Gardon	St. Hilaire de B.	328	456	200	40
11 / 99	Aude	Carcassonne	1770	810		46
11 / 99	Orbiel	Bouilhonnac	239	315	120	18
20 / 10 / 01	Loire	Goudet	432	1600	688	25
		Coubon	732	1600	700	35
		Chadrac	1300	723	190	40
9 / 9 / 02	Vidourle	Sauve	190	690	417	60
		Salinelle	540	1500	930	98

Les crues rapides, violentes, causent des pertes en vies humaines et des dégâts matériels importants mais localisés.

Crues des 20 dernières années ayant entraîné des morts.		
juillet 1987	Grand Bornand	23 morts
octobre 1988	Nîmes	10 morts
septembre 1992	Sud-Est	47 morts dont 34 à Vaison la Romaine
septembre, novembre 1993	Sud-Est	10 morts

décembre 1993, janvier 1994	Sud-Est	10 morts
janvier 1995	Basse Normandie Bretagne ⁶⁵	15 morts
novembre 1999	Aude	36 morts
septembre 2002	Gard	24 morts
décembre 2003	Sud-Est	7 morts

VI 2 3 2 Les crues à cinétique lente

Elles sont généralement dues à des pluies d'averses successives, de longue durée (plusieurs jours à plusieurs semaines voire plusieurs mois) d'origine océanique, mais d'intensité modeste de quelques mm à quelques dizaines de mm par jour sur une surface significative. Leur montée ainsi que la décrue sont lentes et progressives, et donc prévisibles.

Elles durent de plusieurs jours à quelques semaines avec des débits de pointe en crue centennale pouvant se situer entre 2 500 et 12 000 m³/s selon les bassins de fleuves et rivières, compris entre 15 000 et 100 000 km². Ce sont essentiellement les volumes de telles crues qui sont importants ; ils peuvent être de l'ordre de quelques centaines de millions de m³ voire de plusieurs milliards de m³.

Les crues lentes sont rarement la cause de décès directs mais ont des conséquences lourdes sur les infrastructures, les biens, les activités économiques et l'environnement.

VI 2 4 LES INONDATIONS

Les crues sont le fait du ciel, c'est-à-dire de la quantité d'eau qui tombe. C'est une donnée physique sur laquelle l'homme n'a pas pour l'instant d'influence à l'échelle régionale.

Les inondations sont le fait de la "terre" c'est-à-dire des conditions dans lesquelles le débit s'évacue. L'homme peut avoir de l'influence sur la manière dont le débit circule c'est à dire sur la cote (le périmètre mouillé) et la vitesse des écoulements.

En effet, les inondations (cote de l'eau et étendue de la submersion) peuvent être atténuées ou aggravées :

- par le stockage de l'eau derrière les barrages ou dans les champs d'expansion de crues⁶⁶ ;
- par la "canalisation" des écoulements derrière des digues ;
- par la vidange de retenues suite à la rupture accidentelle de digues ;
- par des obstacles (ouvrages obstrués, encombrés ou insuffisants), tronçons de cours d'eau mal entretenus, etc. en particulier dans les zones à faible pente ;

Par ailleurs, en zone côtière, elles peuvent aussi être influencées ou même causées⁶⁷ par des sur-cotes marines liées aux marées, aux dépressions atmosphériques et par la houle (voir au IV au-dessus).

⁶⁵ Il s'agit dans cette région de dégâts causés par des coulées de boues. Voir ci-dessus.

⁶⁶ Dans ce cas, leur volume "utile" doit être en rapport avec le volume de la crue à écrêter. Si ces champs sont inappropriés, ils sont remplis quand la pointe de la crue arrive ce qui est susceptible d'aggraver les effets de la crue par une " Brusque " montée de l'eau.

⁶⁷ Synchrones ou non.

VI 2 4 1 Les risques

Il faut citer quelques événements sans doute "d'intensité anormale" aux termes de la loi de 1982. Ce sont cependant des événements "normaux" au sens hydrologique du terme mais rares en termes statistiques.

La qualification d'anormale est fort politique : l'expérience montre que l'anormalité rassure ; elle est entretenue après la crise par les acteurs : *"que pouvait on faire de mieux devant un tel phénomène ?"* pour les citoyens *"c'est tellement épouvantable que cela ne peut pas se reproduire"*.

Bien d'autres événements dans l'histoire ont été beaucoup plus intenses que ceux qui sont cités. Certains événements rares se sont succédés à peu d'intervalle ...

Hélas, ils ont été oubliés même localement : on construit de plus en plus en zone inondable car déjà inondée, avec des dispositions constructives toujours insuffisantes. La mémoire des risques est aujourd'hui bien sélective.

Aucunes des "catastrophes" des dix dernières années n'a en effet une longue période de retour.

VI 2 4 1 1 Quelques crues à cinétique lente en France :

De la Loire :

Trois événements de période de retour recalculée⁶⁸ de 170 ans se sont reproduits en vingt ans, en 1846, 1856 et 1866.

Aucune de ces grandes crues ne semble avoir causé de victimes directes. Les seules victimes répertoriées l'ont été du fait de leur imprudence (certaines se sont trouvées sur des digues au moment de leur rupture).

Les événements qui ont affecté la Loire moyenne ont été étudiés par l'équipe pluridisciplinaire "Plan Loire Grandeur Nature". Les plus gros enjeux sont évalués.

Les aménagements de protection contre les crues sont anciens et sont maintenant évalués tant sur leur solidité (résistance des digues) que sur le plan de la protection qu'ils apportent.

Dans l'état d'entretien actuel des digues, aucun aménagement de protection contre les crues de la Loire ne résisterait à une crue centennale.

Du Rhône.

La crue de l'année 1856 (après la crue majeure de 1840) a déclenché les premières dispositions législatives sur la prévention contre les crues et la protection contre les inondations.

Cette crue du Rhône vraisemblablement centennale a été synchrone de celle de la Loire (de période de retour de 170 ans voir ci-dessus) et d'autres moins importantes dans d'autres bassins. Au même moment et pendant plusieurs (?) semaines, près des deux tiers de la France ont été sous l'eau.

Le phénomène se reproduira. Quelles seraient ses conséquences s'il se produisait dans les prochaines années ? Les plans de secours existent-ils ? Comment établir le trafic de transit entre l'Europe du Nord et l'Espagne ? etc.

Ces questions sont actuellement sans réponse.

⁶⁸ Car plus la série des observations s'allonge, meilleure est l'estimation. Mais par définition un événement rare est rare : l'absence d'ouverture sur l'histoire surestime largement l'appréciation de la durée de retour.

Une conférence de consensus tenue en juillet 2005 a mis fin à une controverse sur la pointe de débit de la crue du Rhône de décembre 2003. Sa période de retour est dans le grand-delta de l'ordre de 100 ans. Elle avait été estimée par certains à 500 ans. Il est vrai que cette dernière durée est rassurante pour le concessionnaire qui doit à l'État une protection des riverains contre les crues millénales⁶⁹.

En annexe, nous joignons le dernier inventaire des crues du Rhône depuis l'an 1500. Il résulte d'une commande faite par la mission chargée du retour d'expérience sur les crues de 2003 et aurait dû être poursuivi par une exploitation des documents existants. C'est un exemple à suivre dans d'autres bassins et d'autres lieux.

On y remarquera que les remparts de la ville d'Avignon ont été submergés à plusieurs reprises et que la ville d'Avignon a été inondée sévèrement à plusieurs reprises dans son histoire! Des marques de crues se retrouvent encore non loin du palais des Papes⁷⁰.

De la Seine.

L'épisode de 1910 est bien connu et est rappelé de plus en plus souvent.

Ce n'est pas la crue de la Seine la plus importante connue. Elle est cependant la mieux documentée et est l'aléa de référence (PPR) pour les crues de la Seine à Paris.

A l'occasion de la décennie internationale sur la prévention des catastrophes naturelles, la question de la prévention des inondations de Paris a été posée. La question méritait, en effet, de l'être ; la mise en défends des installations les plus vulnérables qui a suivi est loin d'être achevée⁷¹. A titre documentaire, on estime à 780 000 le nombre de personnes dont le logement serait inondé ou inaccessible du fait de la crue, notamment en Val de Marne et dans les Hauts de Seine.

Les effets de l'aléa météorologiques à l'origine de cette crue (de la Seine mais aussi des nappes souterraines) n'ont pas été modélisés en prenant en compte l'urbanisation et les aménagements hydrauliques actuels des bassins amont de Paris (imperméabilisation, corsetage des berges de la Seine, couverture de tous les affluents, lacs réservoirs écrêteurs, etc.)

On étudie actuellement les scénarios météorologiques probables qui pourraient être à l'origine de crues encore plus dévastatrices de la Seine à Paris, les moyens de les prévoir et de les prévenir.

Une crue de la cote (et non du débit) de 1910 serait une catastrophe majeure au niveau national sinon européen. Les dégâts totaux ont été estimés à plusieurs (?) dizaines de milliards d'euros et la vie économique française serait sans doute paralysée pour un certain temps.

Le recours à la solidarité internationale serait sans doute nécessaire.

De la Garonne

La crue de 1875 est considérée par l'État comme l'aléa de référence (PPR) de la ville de Toulouse ; le plan des zones submergées a été dressé à l'époque : Il donne les cotes précises du miroir ainsi que des courbes isocotes⁷².

⁶⁹ La CNR, société privatisée, est le seul organisme à faire des jaugeages en routine sur le Rhône non seulement sur ses stations hydrologiques mais aussi sur celles d'autres utilisateurs et en particulier l'État. Les services déconcentrés de l'État s'en sont remis à la CNR pour tout ce qui touche l'hydrologie et l'hydraulique du Rhône.

⁷⁰ "Elles n'ont pas été remontées en ville," comme a t'on dit ailleurs "parcequ'elles gênaient"

⁷¹ Partiellement pour la RATP dont le centre de commandement serait sous l'eau comme celui de la SNCF. Mais tous les sous-sols de la chambre des députés le sont aussi, les centraux téléphoniques, ceux de transformation de l'énergie électrique, les parkings, les magasins d'alimentation, etc.

⁷² D'égale profondeur de l'eau.

Cette crue est bien documentée et son débit a été estimé à 7 500 m³/s. L'eau est montée à Toulouse de 20 à 50 cm/heure ; la prévision de la crue comme l'alerte des populations nécessitent d'en tenir compte. Cependant si la montée des eaux est rapide, la cinétique de la crue est heureusement plus lente.

60 000 personnes vivraient à l'heure actuelle en zone inondable dans Toulouse.

Les aménagements de protection existants contre les crues (digues mais aussi déversoirs dont les coursiers et les canaux d'évacuation sont urbanisés) mériteraient une expertise sérieuse de leur état d'entretien et de leur capacité à résister aux aléas pour lesquels ils ont été conçus.

VI 2 4 1 2 Quelques crues à cinétique rapide

On peut citer les crues des bassins du Gard et du Vidourle de septembre 2002, celles du haut bassin du Tarn, de l'Aude de novembre 1999, de l'Ouveze en septembre 1992, ...

Ce ne sont pas des crues exceptionnelles. Cependant toutes ont été meurtrières.

Toutes ont fait l'objet de missions de retour d'expérience. Les rapports sont publics et sont disponibles⁷³.

VI 2 4 2 La prévention

Les structures du MEDD (services d'annonce de crues dits SAC) ont été récemment réformées avec pour objectif de parvenir à une prévision des crues. Un service central d'hydrologie et de prévision des crues (SCHAPI) a été créé ex-nihilo et des services de prévision des crues (SPC) mis en place à partir de quelques SAC. Les services actuels, réformés récemment, ne sont pas encore tous opérationnels pour faire de la prévision mais l'annonce existe bien encore⁷⁴.

La prévision.

- La prévision des événements rapides.

L'efficacité de la prévision de ces événements repose sur la compréhension des phénomènes le plus à l'amont possible. Le "modèle numérique du temps" utilisé par Météo France donne des prévisions d'évolution des paramètres atmosphériques toutes les 6 heures. Elles sont exploitées par les prévisionnistes du centre national de Toulouse.

L'imagerie RADAR⁷⁵ complétée et/ou précisée par les observations de pluviographes interrogeables en temps réel, donne des indications précieuses sur les phénomènes en cours et à venir. Elle permet de suivre le déplacement des précipitations et de faire des prévisions qualitatives avec une échéance de une à trois heures.

La traduction quantitative de l'image radar impose un calibrage pour s'affranchir des obstacles physiques, de la dérive des fréquences des ondes radars, de la taille des gouttelettes d'eau, etc.

La méthode actuellement à l'étude consiste à associer en temps réel l'image radar brute avec des observations de pluviographes de la zone de l'image.

- La prévision des crues à cinétique lente.

⁷³ Sur le site du ministère de l'écologie et du développement durable, à la documentation française, etc.

⁷⁴ Qui peut le plus peut le moins.

⁷⁵ Le RADAR est un outil de détection indirect des précipitations par la mesure du rayonnement électromagnétique réfléchi sur les gouttelettes. Le réseau de radars météorologiques ARAMIS, qui comprend en 2002 18 radars dont 5 ont été co-financés par le MEDD, est exploité par Météo – France ; il s'efforce de couvrir uniformément le territoire.

Le mécanisme de formation des crues lentes est variable selon les bassins mais il laisse toujours un temps d'alerte raisonnable aux populations menacées.

Les caractéristiques de la crue, vitesse de montée de l'eau, pointe (heure et cote en en lieu donné), ne posent avec les techniques actuelles aucun problème particulier d'annonce dans des délais raisonnable.

La prévention des inondations est fondée sur des documents limitant le droit de construire.

VII LES MOUVEMENTS DE TERRAIN

Ce terme regroupe des phénomènes très variés

- par leur nature : affaissements et effondrements dus aux cavités souterraines, instabilité des versants avec des glissements, des écroulements et des coulées boueuses ou non ;
- par leur dimension : de quelques m³ avec des chutes de blocs, des avalanches rocheuses et pouvant atteindre quelques centaines de millions de m³ voire plus.

Le terme inclut les déformations du sol "dues à la sécheresse" comme le retrait gonflement des argiles. Cependant cet aléa fait l'objet du chapitre VIII suivant.

VII 1 Caractéristiques générales



Effondrement de cavité à Bargemont (Var)⁷⁶



Écroulement de la colline de Fourvière à Lyon le 13 novembre 1930⁷⁷. (19 pompiers soit 20% des effectifs des pompiers de la ville ont trouvé la mort).



Glissement de terrain à La Conchita Californie⁷⁸

Dans leur principe, les mouvements de terrain sont bien compris : ils surviennent quand la résistance des terrains est inférieure aux efforts moteurs engendrés par la gravité, l'eau souterraine (poussée d'Archimède), les séismes, les travaux de l'homme,... Toute leur dynamique répond évidemment aux lois de la mécanique. Dans le milieu naturel cependant les phénomènes sont beaucoup plus complexes du fait des incertitudes :

- sur les conditions aux limites et initiales notamment en profondeur ;
- sur les propriétés mécaniques des terrains en général hétérogènes, non-linéaires, anisotropiques, discontinus, ...
- sur les conditions hydrauliques : la position de la nappe d'eau en particulier. L'eau est le principal facteur déclenchant des mouvements de terrain.

Les causes majeures d'effondrement de cavernes sont bien identifiées. Cependant, il est patent que les scientifiques, pour des raisons évidentes, manquent d'observations fines, ante et post rupture.

⁷⁶ Dissolution de gypse. Photo M Toulement MEDD.

⁷⁷ Des mouvements de terrain catastrophiques marquent l'histoire de Lyon. Le 8 mai 1932, 30 victimes au Cours d'Herbouville, le 13 novembre 1932 : 40 morts quartier St Jean, ...

⁷⁸ Photo RL Schuster. US geological survey.

VII 2 les dangers

L'étude de l'aléa couvre deux aspects :

- la différenciation des sites stables et instables;

Les compétences actuelles sont satisfaisantes lorsqu'il s'agit de dimensionner un talus et une conformation d'instabilité.

- la description du mouvement des masses instables.

Lorsqu'il s'agit de mouvements à dynamique rapide (chute de blocs, avalanches rocheuses, laves torrentielles), les modèles sont encore en développement. Pour les phénomènes lents de "quelques mm à dm par an) on ne dispose pas de modèle et l'appréciation se fait à dire d'expert.

Il est possible d'établir des "statistiques" sur un aléa donné dans un périmètre donné.

Bien évidemment, l'aléa une fois réalisé, c'est un autre aléa (localisation, volume etc.) qui risque de se produire même au même endroit : le bloc est tombé, il ne retombera plus.

L'analyse des risques est ponctuelle et l'estimation de l'aléa est bien rodée.

Les cartes d'aléa existent.

VII 3 Le risque

Le risque se caractérise par une répartition spatiale et temporelle assez diffuse et peut intéresser des régions montagneuses mais aussi à relief plus doux et/ou de type karstique, des régions côtières d'érosion active, des zones de dissolution de calcaire ou de craie,...

L'aléa se réalise en période de forte pluie, de fonte des neiges,... en contrecoup à des interventions humaines telles que dérivation de cours d'eau, talus mal calculé, etc.

VII 4 La prévention

La prévision et l'alarme sur un site donné font appel à des techniques de mesure sophistiquées dont les observations sont transmises en temps réel dans les conditions maximum de fiabilité. Elle commence à avoir quelque fiabilité à court terme lorsque le phénomène est en régime stationnaire d'une part et en phase d'accélération finale avant rupture d'autre part.

Les prévisions à plus long terme sur la date et l'importance du phénomène sont particulièrement difficiles sinon impossibles à faire.

Les techniques de protection sont au point et se rangent en deux familles :

- les parades actives telles que le soutènement, le drainage, le terrassement,...
- les parades passives comme les pièges à blocs.

Ces techniques ne sont envisageables que pour les mouvements de faible ampleur ; leur coût n'est pas toujours à l'échelle des enjeux : la permanence de l'entretien des parades passives doit être assurée et la surveillance du risque toujours continue.

Pour les mouvements de grande ampleur prévisible la seule prévention consiste à réglementer l'accès et l'occupation de la zone vulnérable.

Les risques directs sont en règle générale importants et touchent souvent des vies humaines.

L'aléa peut considérablement augmenter par "effet domino". Nous en verrons quelques exemples plus loin.

VII 5 Quelques catastrophes

La catastrophe du Mont Granier (Savoie)⁷⁹

Elle s'est passée le 24 novembre 1248 et a causé environ 5 000 victimes rayant de la carte cinq villages.

On estime qu'une masse de rochers de 1 à 9 millions de m³ s'est détachée du mont Granier entraînant un volume estimé à 500 millions de m³. La coulée a une surface de 32 km², représente 2 km de large sur plus de 10 km de long.

Le phénomène déclencheur a été probablement un séisme.

"Si" la coulée avait emprunté l'autre versant, Chambéry aurait vraisemblablement été rasée.



Le Mont Granier. On devine la trace de glissement et la partie effondrée à droite. Le vignoble de Myans est situé sur la coulée.

Photo in CCSTI

Le glissement de terrain de Roquebillière (Alpes Maritimes).

Cet événement mérite un développement.



200 000 m³ de terrains de nature géologique complexe ont glissé du 23 novembre en 1926 au 27 février 1927 sur le village de Roquebillière-Le-Vieux en faisant, le 24 novembre, 19 victimes.

⁷⁹ Voir le site www.ccasti-chambery-org qui décrit d'une manière très détaillée le phénomène.

Le mouvement s'est réactivé d'avril à août 1971. La menace d'un glissement de 1,5 millions de m³ plane encore en 2005.

Le village actuel a été évacué⁸⁰ en 1927 après un référendum auprès des habitants. Le village, non démoli, a été réoccupé à la suite de la crise du logement juste après la dernière guerre. Après un nouveau glissement de terrain en 1971, une décision d'évacuation a de nouveau été prise⁸¹.

La mémoire du risque est très courte et cela se vérifie tout particulièrement dans le cas de Roquebillière. Si les habitants ont voté pour partir en 1927 et les nouveaux habitants étaient consentants pour partir à nouveau après 1971, l'absence de mouvement de terrain important (il y a quand même de petits glissements fréquents) a conduit les habitants actuels à nier le risque et à se constituer en comité de défense.

L'instance de conseil et d'appui technique à la prévention des risques naturels (créée par arrêté du 25 mai 2001 du MEDD), consultée, a remis au ministre de l'écologie et du développement durable un avis sur le sujet en février 2003. Il est public⁸².

L'effondrement de Clamart (haut de Seine)

La voûte d'une ancienne carrière de craie s'effondre en 1961 et affecte 8 ha de zone urbanisée. On a compté 21 morts.

La catastrophe du Plateau d'Assy (Haute-Savoie).

Une coulée de boue et de neige mêlée, détruit en le 16 avril 1970 le sanatorium de Praz-Coutant en faisant 70 (71 ?) victimes.

Le glissement de terrain de Remirè (Guyane).

Le dernier mouvement de terrain important en France, a fait 10 morts le 19 avril 2000, à Remirè-Montjolly dans la banlieue de Cayenne. La partie de la colline de Cabassou a glissé sur la route nationale 3 et a arrêté sa course sur l'usine en activité de la Cimala.

D'autres.

Il faut citer les coulées boueuses dans le massif de Belledonne des 22 et 23 août 2005 (Isère) comme dans le même département celui antérieur de st Martin de Clelles (Trezanne) dont les transports solides ont été spectaculaires ;

Les mouvements de terrain majeurs actifs en métropole.

Depuis	Localisation	Volume	Menaces
1976	Les Ruines de la Séchilienne ⁸³ (Isère)	2 à 3 millions de m ³ (masse active)	Hameau de l'Ile-Falcon, obstruction de la vallée de la Romanche et, indirectement, menaces importantes sur l'agglomération grenobloise en cas de rupture du barrage ainsi formé.
1976	La Clapière à Saint-Étienne-de-Tinée (Alpes-Maritimes)	50 millions de m ³	Risque d'obstruction de la Tinée et d'inondation du village de Saint-Étienne-de-Tinée.

⁸⁰ Et les propriétaires indemnisés.

⁸¹ Et les propriétaires (?) indemnisés.

⁸² Voir la préfecture des Alpes Maritimes.

⁸³ Les parades ont fait l'objet d'un rapport public de l'IGE et du CGPC en mars 2005 (www.ecologie.gouv.fr) ou sur le site de la préfecture de l'Isère. Tous les foyers menacés ne sont pas encore évacués. Le coût des parades immédiates à mettre en œuvre est d'environ 80 M d'euros.



Le site de la Clapière. Photo geosciencesazur.

VIII LE "RETRAIT - GONFLEMENT DES ARGILES".

Les mouvements du sol liés à des variations de l'état hydrique du sol, variation due à des phénomènes climatiques comme une sécheresse prolongée, ou à une modification de l'équilibre naturel local, conséquence de la présence d'arbres ou de l'activité humaine (modification du niveau de la nappe phréatique du fait de pompages ou de la configuration de la construction dans son environnement) sont connus depuis plusieurs décennies, mais ils peinent à être bien compris.

Les déformations volumiques des sols fins sont généralement attribuées à trois phénomènes :

- La **modification de l'état de contraintes** dans le sol. Ce changement s'opère, par exemple, lors de l'adjonction ou de l'enlèvement des charges ou surcharges. Il conduit à terme, c'est-à-dire lorsqu'un nouvel équilibre s'est établi, à une déformation du sol, qui se traduit en général par un déplacement en surface (tassement, soulèvement).
- La **modification des "pressions interstitielles"**⁸⁴. Un changement dans l'environnement hydrique du sol conduit à une modification des pressions régnant dans son sein. Ceci signifie que les contraintes exercées sur le sol se modifient et par-là même qu'il peut changer de volume avec les effets vus au dessus.
- La **nature physico-chimique**. L'apport d'eau dans le sol et sa fixation au niveau de certains constituants de l'argile conduisent à des phénomènes d'hydratation entraînant une augmentation de volume. Ce mécanisme d'hydratation est largement conditionné par le type et la nature des matériaux argileux, la pression interstitielle et la succion régnant dans le sol, la composition de "l'eau" du sol, ...
- D'autres types de mouvement tirent leur origine dans une réaction chimique provoquée par une action anthropique. Ce retrait est dû à la transformation en un composé de poids spécifique inférieur.

Ces phénomènes sont regroupés dans ce qu'il est courant d'appeler le "retrait - gonflement des argiles".

Certains sols sont sensibles d'autre pas.

VIII 1 Les risques.

Les dommages causés par la sécheresse du sol sont un phénomène traditionnel et fréquent, qui affecte un très grand nombre de pays dans toutes les parties du monde. La question se pose ainsi du caractère normal (ou anormal) de l'intensité de l'aléa.

Il n'existe pas de risque direct sur les personnes : par contre ses effets sur certains bâtiments peuvent entraîner des risques forts sur les personnes.

=> En ce qui concerne les bâtiments, rien qu'en France, depuis une quinzaine d'années, il n'est guère d'année où un état de catastrophe naturelle au titre de la sécheresse ou de la réhydratation⁸⁵ des sols n'ait pas été reconnu dans un nombre significatif de communes⁸⁶.

Les dommages dits de subsidence⁸⁷ se traduisent par un appel à la solidarité nationale par le recours au régime d'indemnisation des victimes des dégâts dus aux catastrophes naturelles.

⁸⁴ On lira avec intérêt le rapport visé ci-dessus.

⁸⁵ Ces deux phénomènes se traduisant par des mouvements contraires, de retrait ou de gonflement, des sols.

⁸⁶ Pour la période 1989-2000, le coût des sinistres de subsidence (dommages aux bâtiments) causés en France par la sécheresse du sol est évalué par la CCR à 3200 M€ pour l'ensemble du marché. De 1990 à 2003, 160 à 1800 communes ont chaque année été déclarées en état de catastrophe naturelle au titre de la sécheresse.

C'est la subsidence qui a le plus sollicité ce régime, dépassant les inondations et les risques associés.



Exemple de pathologie⁸⁸.

"L'objectivation" du phénomène de subsidence provoquée sur les immeubles par un retrait-gonflement des sols d'une intensité anormale constitue un enjeu politique.

=> En ce qui concerne l'agriculture, l'aléa existe - les sols craquent - avec une vulnérabilité nulle pour ce phénomène propre ; étant bien entendu que la vulnérabilité des plantes à la sécheresse est un phénomène d'un autre ordre.

VIII 2 La prévention.

Un certain nombre de propositions ont été faites en septembre 2005 aux ministres compétents par la mission d'inspection générale dont il a été parlé plus haut. Elles suggèrent en particulier de :

=> Recenser les zones soumises à un aléa significatif de retrait-gonflement des argiles.

=> Dans les zones ainsi définies:

- Respecter, pour les constructions neuves, une profondeur minimale de fondation.
- Fournir une étude de sol lors de la vente d'un terrain constructible pour l'information de l'acheteur ainsi que lors du dépôt d'un permis de construire

=> Réviser le document technique unifié relatif aux "fondations superficielles" afin de définir des dispositions plus précises en matière d'études de sol et de conception, calcul et exécution des fondations et d'envisager, pour les maisons individuelles, la définition de dispositions types et de règles de dimensionnement forfaitaires.

⁸⁷ Il s'agit plus précisément, en termes technico-juridiques, des dommages causés par les mouvements différentiels de terrain consécutifs à la sécheresse et à la réhydratation des sols.

⁸⁸ Document de l'agence qualité construction.

IX LES AVALANCHES

IX 1 Caractéristiques générales

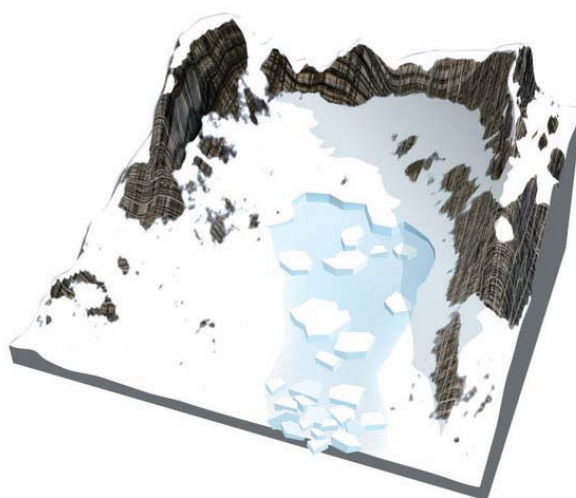
Une avalanche correspond à un déplacement rapide d'une masse de neige sur une pente. Cette masse varie de quelques dizaines à plusieurs centaines de milliers de mètres cubes, pour des vitesses comprises entre 10 km/h et 400 km/h. Les pentes favorables au départ des avalanches sont comprises entre 30 et 55°.

La pente avalancheuse typique est raide, à l'ombre, proche d'une crête et couverte de neige soufflée.

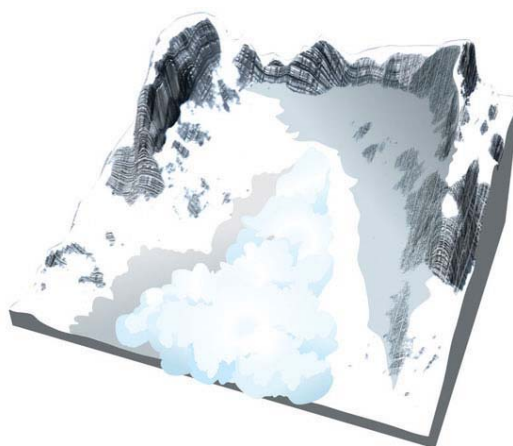
On distingue trois types d'avalanches selon le type de neige et les caractéristiques de l'écoulement :

L'avalanche de plaque est générée par la rupture et le glissement d'une plaque, souvent formée par le vent, sur une couche faible du manteau neigeux. Lorsque la cohésion de la neige est forte, la plaque est dure et composée de blocs de neige. En revanche, lorsque la cohésion est faible, la plaque est friable et les blocs se disloquent rapidement.

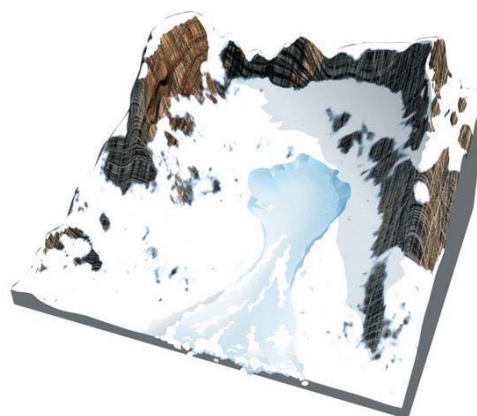
Deux types de plaques peuvent être distingués : la plaque au vent, peu dangereuse, résultant d'une compression due à la poussée du vent, et la plaque sous le vent, plus dangereuse car mal ancrée à la sous-couche.



L'avalanche en aérosol : une forte accumulation de neige récente, légère et sèche (poudreuse) peut donner des avalanches de très grandes dimensions avec un épais nuage de neige (aérosol), progressant à grande vitesse (100 à 400 km/h). Leur puissance destructrice est très grande. Leur trajet est assez rectiligne et elles peuvent remonter sur un versant opposé. Le souffle qui les accompagne peut provoquer des dégâts en dehors du périmètre du dépôt de l'avalanche.



L'avalanche de neige humide : lorsque la neige se densifie et s'humidifie sous l'action de la fonte, au printemps ou après une pluie, des avalanches peuvent entraîner l'ensemble du manteau neigeux. Elles s'écoulent à vitesse lente (jusqu'à 20 km/h) en suivant le relief en ses points bas (couloir, ravin, talus, etc.). Bien que leur trajet soit assez bien connu, elles peuvent être déviées par un obstacle et générer des dégâts dans des zones a priori non exposées.



Blocs et commentaires MEDD.

Une avalanche peut se produire spontanément ou être provoquée par un agent extérieur :

- **l'augmentation du poids**, d'origine naturelle (importantes chutes de neige, pluie, accumulation par le vent) ou accidentelle (passage d'un skieur ou d'un animal) ;
- **la température** : après des chutes de neige et si une période de froid prolongée se présente, le manteau neigeux ne peut se stabiliser. Au printemps, la chaleur de mi-journée est un facteur déclenchant, car la neige devient lourde et mouillée ;
- **le vent** engendre une instabilité du manteau neigeux par la création de plaques et corniches.

IX 2 Les dangers

Les avalanches sont parmi les catastrophes naturelles les moins meurtrières.

Dans le monde, les avalanches font environ 500 victimes par an. En France, les accidents sont aujourd'hui, dans plus de 95 % des cas, liés aux activités de loisirs, mais ils restent faibles, comparativement au nombre d'usagers de la montagne.

Quelques catastrophes en France.

Date	Localisation	Victimes et dégâts
1601	Chèze et Saint-Martin (Pyrénées)	107 morts, les deux villages sont rasés
1749	Huez (Isère)	130 morts, la moitié du village est détruite
1895	Orlu (Pyrénées)	15 morts
1934	Ortiporio (Corse du Nord)	37 morts le 5 février dans la vallée du Cassagoni
1970	Val d'Isère (Savoie)	39 morts, 37 blessés, chalet UCPA balayé
1999	Hameau de Montroc (Haute-Savoie) ⁸⁹	12 morts, 14 chalets détruits

Malgré l'accroissement de la vulnérabilité (multiplication des constructions et augmentation de la fréquentation hivernale) le niveau des dommages annuel est stationnaire :

- de l'ordre d'une vingtaine de morts par an, dont plus de quinze dans la pratique de sports de montagne,
- de 3 à 5 maisons détruites.

Il existe de 6 000 à 8 000 constructions dans les zones à risque⁹⁰.

⁸⁹ Voir le rapport sur le retour d'expérience sur cette tragédie sur www.ecologie.gouv.fr.

⁹⁰ Zones rouges de la CLPA (voir ci-après).

IX 3 La gestion du risque

La catastrophe du chalet UCPA à Val-d'Isère (février 1970) a impulsé en France une véritable politique de prise en charge du risque basée sur la prévention (amélioration de la connaissance du phénomène, cartographie, prévision, réglementation, etc.) et la protection.

La prévention.

Il existe deux bases:

=> L'enquête permanente sur les avalanches (EPA), initiée en Savoie en 1888 par le conservateur des eaux et forêts MOUGIN, progressivement étendue aux Alpes et aux Pyrénées. C'est une base de donnée chiffrée qui contient des paramètres caractéristiques des avalanches constatées sur un échantillon de couloirs avalancheux à enjeux humains. Parmi ces paramètres, le principal est la cote la plus basse atteinte par la coulée. Pour certains couloirs, on dispose d'une série de relevés sur plus d'un siècle.

=> La carte de localisation des phénomènes avalancheux (CLPA), sur les zones à enjeux humains des massifs alpin et pyrénéen, entreprise après la catastrophe de Val d'Isère. La CLPA représente l'extension maximale des avalanches à partir des traces dans le couvert forestier et des observations de témoins.

Ces bases sont alimentées par des agents des services de restauration des terrains de montagne (dits RTM, de l'office national des forêts), sur environ 5 000 couloirs d'avalanche ; plus de 600 000 hectares ont été cartographiés dans les Alpes et les Pyrénées

Elles ont été rénovées depuis 2002 dans le sens d'une meilleure prise en compte des enjeux dans le choix des sites étudiés et d'une amélioration de la fiabilité des données.

La CLPA est un document informatif et n'est pas une cartographie réglementaire.

Elle sert de base à l'élaboration des plans de prévention des risques naturels qui permettent de maîtriser l'urbanisation dans les zones à risque et de tracer les cartes d'aléas y associant autant que faire ce peut, une occurrence pour une avalanche "d'intensité" donnée.

La prévision : si l'on connaît assez bien les couloirs d'avalanche, la localisation précise de leur trajet et de leur limite d'extension est plus difficile. La prévision des avalanches à court terme est à dire d'expert.

La prédiction se développe depuis une trentaine d'années⁹¹ à travers la nivologie (science de la neige) et la météorologie alpine. Météo France édite régulièrement un bulletin d'estimation du risque d'avalanche qui donne, à l'échelle d'un massif, des indications sur l'état du manteau neigeux en fonction de l'altitude, de l'exposition, du relief. Il propose également une estimation du risque, basée sur une échelle européenne graduée de 1 (risque faible) à 5 (risque très fort).

La protection.

Des ouvrages peuvent empêcher le départ des avalanches ou en atténuer leurs effets : il peut s'agir de filets, râteliers, claies, barrières à vent ou encore plantations.

Dans les zones d'écoulement et d'arrêt, des ouvrages de déviation, de freinage ou d'arrêt (paravalanches) peuvent être efficaces.

⁹¹ Voir l'ANENA (association nationale pour l'étude de la neige et des avalanches), le CGGREF avec Philippe HUET, IGGREF et IGE.

Le dispositif de prévention le plus efficace est de ne pas construire dans les zones à risque et en particulier dans les couloirs d'avalanche. Ceci ne semble pas facile à faire.

X QUELQUES EFFETS "DOMINO"

Une catastrophe peut en provoquer une autre ou plusieurs autres ; le cas n'est malheureusement pas rare d'aléas surajoutés qui amplifient considérablement la catastrophe initiale.

Ces effets domino font partie du cahier des charges des études de danger des risques industriels.

D'une manière générale ils devraient être beaucoup plus étudiés en particulier dans les plans de prévention des risques naturels.

X 1 Le talus de la voie ferrée Bize-Minervois, Narbonne à Cuxac d'Aude⁹² (département de l'Aude).

La dernière inondation importante de la partie aval de l'Aude est intervenue dans la nuit du 12 au 13 novembre 1999. Consécutive à des pluies intenses sur les affluents à l'aval du bassin, la montée des eaux a été très rapide (3 mètres en deux heures à Moussoulens à l'entrée des basses plaines de l'Aude).

Les digues du canal de jonction entre le canal du Midi et Narbonne ont joué leur rôle de retenue puis ont cédé vers 7 h le 13 novembre. L'eau s'est alors accumulée derrière le remblai RFF de la ligne Bize-Minervois, Narbonne qui, à son tour, a cédé conduisant à la formation d'une vague qui a déferlé sur les basses plaines. Dans les lotissements des Garrigots et des Estagnols (commune de Cuxac d'Aude) déjà inondés par les crues de l'Aude, cette vague a provoqué la mort de 5 personnes aux Garrigots dont 4 personnes prisonnières sous le plafond de leur maison en n'ayant pas pu atteindre un niveau de survie; les submersions ont dépassé localement 4 mètres.

Les ouvrages sont systématiquement détruits lors des fortes crues (1814, 1820, 1833, 1843, 1891, 1930, 1940, 1962). Après 1999, ils ont été refaits à l'identique et les lotissements remis en état⁹³. Aucun des habitants actuels des villas sinistrées n'a connu la catastrophe ; une mission de l'IGE en 2002 n'a retrouvé aucune des abondantes marques de laisse de crue vues en 2000. Les effets d'aubaine sont évidents.

X 2 L'effondrement du mont Toc (Italie).

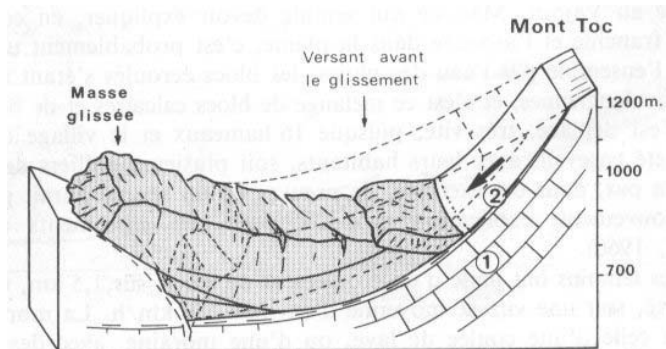
Le 9 octobre 1963 à 10 h 30, 260 millions de m³ de matériaux du mont Toc ont glissé dans la retenue artificielle (115 millions de m³) du barrage de la vallée du Vajon (Italie) et l'ont rempli quasi instantanément. Il s'est formé une vague de 100 m de haut au dessus du barrage (263 m de haut, le 2ème plus haut du monde; il a résisté à la "submersion" comme le montre la photo ci-après) et un torrent de boue de 50 millions de m³ a dévalé la vallée à plus de 60 km/h.

Ce flot a totalement rayé de la carte le bourg de Langaronne et a submergé 6 villages de la vallée de la Piave. Le nombre des victimes a été estimé à 1 800. Il dépasse vraisemblablement les 2 500.

⁹² Voir les rapports IGE CGPC sur les crues des 12, 13 et 14 novembre 1999 dans les départements de l'Aude ...et IGE sur l'expertise du projet d'aménagement des basses plaines de l'Aude janvier 2003 (téléchargeable sur le site www.ecologie.gouv.fr)

⁹³ Et même très améliorés.

Le récent film "la folie des hommes" retrace cette catastrophe annoncée⁹⁴.



Source : université de Savoie



Vue de l'aval. Le barrage, intact, au premier plan à gauche.

X 3 Les bassins de la Savoureuse⁹⁵ (Territoire de Belfort).

La crue de la Savoureuse du 15 février 1990 a généré des inondations catastrophiques à Belfort et dans les zones industrielles d'aval (dont les usines Peugeot)⁹⁶. Puis des inondations, de moindre importance, causées par les crues de décembre 1993 et de janvier 1995 se sont produites.

Les risques ont conduit le conseil général du Territoire de Belfort à réaliser un projet de prévention prévoyant en particulier 9 bassins de rétention stockant 2 millions de m³ d'eau. L'aménagement repose sur le concept d'inondabilité⁹⁷ qui propose d'inonder volontairement et de façon contrôlée des zones de l'amont, peu valorisées et aménagées à cet effet, pour protéger des enjeux forts à l'aval (ville, zone industrielle, etc.).

La crue des 27, 28 et 29 décembre 2000 a mis en eau pour la première fois l'aménagement et plusieurs bassins d'écroulement se sont rompus ou ont été très endommagés.

Les digues étaient construites hors du lit majeur de la Savoureuse ; lors de leur rupture, les flots ont emprunté une vallée adjacente non vulnérable, traversé l'étang de la Chaume pris par les glaces, puis charrié des blocs de glace.

Le flot et des blocs de glace de taille encore impressionnante quelques jours après le drame ont inondé des maisons (500 maisons selon certaines sources) sans, par miracle, tuer personne. 2 entreprises, à Eloie et Valdoie, à 3 km à l'aval étaient encore paralysées en 2004.

L'histoire des bassins de la Savoureuse est aussi instructive que les dégâts causés aux constructions inadaptées aux effets des argiles gonflantes : des erreurs de construction peuvent causer des dégâts considérables aux biens soumis à des aléas "normaux".

⁹⁴ Fidèlement car le réalisateur n'a pas été poursuivi. Les responsables ont été condamnés en particulier à des peines de prison et ont été remis en liberté récemment.

⁹⁵ "Inspection suite aux désordres et à la rupture des bassins de rétention de la "Savoireuse" ; enseignements à en tirer notamment pour le fonctionnement des services de l'Etat impliqués dans la police des eaux sur des installations similaires". Rapport public IGE, CGGREF, CGPC du 2 octobre 2002.

⁹⁶ Elle a causé 30 millions de F de dégâts dans le département du Territoire de Belfort et 1 200 millions de dégâts dans celui du Doubs (usines Peugeot).

⁹⁷ "Tout enjeu mérite une protection adaptée à sa valeur".

Force est de constater que le système CATNAT a été et continue d'être mobilisé pour indemniser les désordres causés par des aléas climatiques et dus à des fondations inadaptées aux argiles gonflantes et/ou à des erreurs d'ingénierie dans la conception et la réalisation d'ouvrages hydrauliques.

XI QUELQUES REFLEXIONS SUR LES VARIATIONS CLIMATIQUES

Le labour de la prévention des risques par l'histoire n'a pas eu en France de fertilité à la mesure de l'innovation et de la qualité du laboureur.

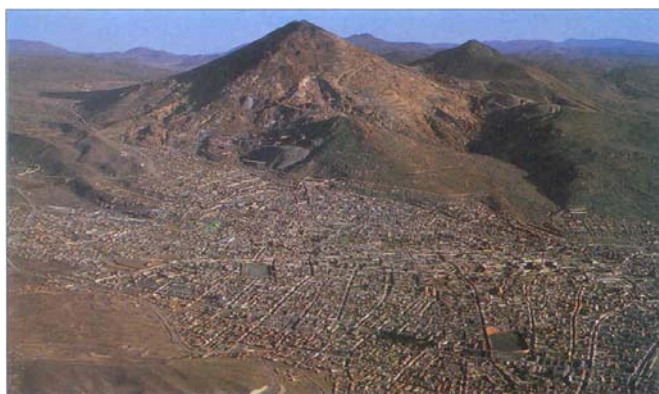
La nouvelle science de l'histoire du climat co-fondée par Le Roy Ladurie⁹⁸, en 1967 avec l'anglais Lamb a été mise en œuvre en Europe et dans le monde particulièrement en Amérique latine ; bien plus qu'en France.

XI 1 L'exemple de Potosi⁹⁹.

Les sources documentaires existent sur Potosi¹⁰⁰ tout au long de sa longue histoire.

Ville d'altitude (3980 m), Potosi avait plus de 200 000 habitants au 17^{ème} siècle et était à ce titre bien plus importante que les capitales d'Europe. Le Cerro Rico, (4824 m), montagne de minerai d'argent et des métaux associés (plomb, zinc, etc.) fournissait environ 40% de l'argent du monde à la fin du 16^{ème} siècle.

L'ensemble des richesses y était déjà concentré en 1545 et l'activité intellectuelle intense.



Le Cerro Rico.
Photo minéralogical records

Le dépouillement et l'étude statistique critique et en particulier hydrologique, des données climatiques (au début non numériques et souvent non calibrées) des archives de la ville et de celle de Sucre (voisine) sur plus de 450 ans (depuis 1545) ont permis de reconstituer les variations climatiques dans l'histoire. Elle montre que la distribution dans le temps des différentes années (sèches, normales, humides) est restée presque inchangée. Les auteurs n'étaient pas en mesure de savoir si l'intensité des phénomènes avait varié.

La haute altitude Potosi permet de supposer que la ville est très sensible aux changements climatiques.

⁹⁸ Voir ci-dessus au V B 1 2.

⁹⁹ Alain Gioda et Yann L'Hôte Maison des sciences de l'eau IRD Montpellier. In Revue de la SHF 4/5 de 2002

¹⁰⁰ Actuellement en Bolivie.

XI 2 Les crues récentes en France.

Les victimes des inondations catastrophiques des dix dernières années en France pointent les changements climatiques comme les principaux responsables des inondations qu'ils ont subies.

Les études hydrologiques, statistiques, réalisées par chaque mission de retour d'expérience pour y répondre, montrent que les épisodes incriminés s'inscrivent dans les variations normales des séries disponibles.

Ces séries sont courtes et dépassent rarement le siècle. Cependant, la longueur de ces séries ne permet, ni de disposer d'évaluation de période de retour avec une variance satisfaisante¹⁰¹, ni d'observer une dérive quelconque des précipitations ou des débits des fleuves.

Quand on allonge les séries d'observations par des recherches historiques sur plusieurs siècles (voir en annexe), on constate alors que les épisodes ressentis comme paroxystiques ne le sont pas et ont été largement dépassés dans le passé.

XI 3 D'une manière générale.

Il est certain que l'effet de serre a un impact sur la température moyenne du globe.

Définir exactement quels seront les changements du climat d'une petite région française et ses répercussions sur les phénomènes météorologiques extrêmes est risqué.

Examiner la série des températures sur quelques siècles dans une grande ville devenue mégapole industrielle, constater une évolution des températures moyennes et pouvoir attribuer cette évolution plus à un changement climatique qu'à la vie et au confort urbain est contestable.

Le propriétaire d'un thermomètre au 17^{ème} siècle¹⁰² était fier de disposer de mesures, de noter et commenter des chroniques et ses descendants de les entretenir. Il existe certainement au fin fond des campagnes françaises des archives à mettre en valeur.

De même pour les précipitations et les averses, lire dans un rapport officiel d'un établissement public de l'État "Fort d'un panel de données de plus de 50 ans permettant un calcul assez fiable de valeurs de durée de retour de 200 ans, ..." mérite d'être affiché comme une manifestation d'une perte de connaissance et de savoir-faire.

Les modèles de climat.

Chaque grande puissance mondiale possède son propre modèle de climat.

Chaque modèle a ses caractéristiques propres et en particulier la taille de ses mailles. Les résultats des modélisations dépendent des conditions initiales, des facteurs qu'on veut ou peut prendre en compte et des éléments dont on veut connaître l'incidence à court ou long terme.

Les calculs mettent en jeu des ordinateurs parmi les plus puissants du monde pendant des durées significatives.

Les modèles de climat apparaissent pour le public - même averti- comme des "boîtes noires". Les changements climatiques prévus par les experts varient assez fondamentalement depuis quelques années : accentuation de la fréquence (?) de la sévérité (?) des phénomènes climatiques extrêmes, accroissement de la probabilité d'occurrence des phénomènes médians (?), ...

¹⁰¹ il faut alors parler du nombre de fois où un phénomène d'intensité au moins égale s'est reproduit dans la série.

¹⁰² À partir de 1660 environ.

Le climat va changer. Mais de quelle manière ? ¹⁰³.

¹⁰³ Voir ci-dessus au V B 1 2.

ANNEXE

PRINCIPALES CRUES DU RHÔNE À AVIGNON ET BEAUCAIRE ENTRE 1500 ET 2000

par

D. Cœur (Juin 2004)

Sources :

- (1) - Champion (1858-1864, *Les inondations en France...*)
- (2) - Kleitz (1861, *Tableau des plus grandes crues observées sur le Rhône*, AD69 / S 1507)
- (3) - Pardé (1925, *Le régime du Rhône...*, dont TAB 175 & 176, I, pp. 870 & 877)
- (4) - Pichard (a-1995, *Les crues du Bas Rhône de 1500 à nos jours* ; b-1999, *Espace et nature en Provence 1540-1789...*)
- (5) - BanqueHydro (avril 2004)
- (6) - CNR (mars 2004, Décembre 2003 une crue historique)

Abréviations

Rh. = rivière Rhône

Du. = rivière Durance

GAES Bas-Rhône

Les aléas naturels et leurs enjeux

Réf.	Date	AVIGNON		BEAUCAIRE		Observations
		Hauteurs	Débites	Hauteurs	Débites	
	AA/MM/JJ	m	m ³ /s	m	m ³ /s	
(1) (2)	1433-XI-30	6.79				Réunion des eaux du Rhône, de la Durance et de la Sorgue Avignon, Arles (hauteur reconstituée par Kleitz d'après manuscrit et terrain)
Pour Info						
(2)	1529-XI-11					Débordements extraordinaires en Camargue, les habitants de Chateaufrenard venaient en barques à Arles
(2)	1543-XI					Camargue sous les eaux (Montlong, Corrège, Salliers)
(1) (2)	1544-XI					Pluies 8jrs et 8 nuits - Avignon
(2)	1548-XI	7.00 ?				Pluies pendant 3 jours et 4 nuits à compter du 12-XI Inondations du Rhône et de la Durance A Avignon, eaux à 1 m en dessous de 1856 (d'après reconstitution Kleitz via texte et levées de terrain c/ Champion qui l'annonce supérieure)
(1)	1557					Avignon
(1)	1561					Beaucaire
(1)	1562-X					Caderousse
(1)	1566-VIII-25					Avignon
(2)	1570-XII					Arles
(1)	1573-X					Beaucaire
(1) (2)	1578-X					Arles : Kleitz conclut que d'après les témoignages cette inondation se serait étendue plus loin que celle de 1856
(1) (2)	1580-VIII-26					Avignon : eaux au-dessus des repères des grandes crues (sans précision)
(1)	1581-I-05 & II-06					Avignon (Rh. + Du.)
(2)	1583-VIII					Camargue
(1)	1586-IX-18					Avignon
(1)	1590					Avignon, Pont-St-Esprit
(1)	1602					Avignon
(1)	1605-XII					Avignon
(1)	1616-VIII					Avignon
(1)	1624					Avignon
(1)	1633-IX ?					Bas Rhône, Provence

Réf.	Date	AVIGNON		BEAUCAIRE		Observations
		Hauteurs	Débites	Hauteurs	Débites	
	AA/MM/JJ	m	m ³ /s	m	m ³ /s	
(4)	1636					Arles, 5.24 m
(1)	1637					Arles
(1) (2)	1647-XI-04					Avignon, débordement Durance Arles, à Fourques eaux au 1 ^{er} étage des maisons, pont de bateaux emportés
(1) (4)	1651-XI-29					Beaucaire, Rh. + Du. Arles, 5.30 m
(1)	1657					Avignon ; Arles 5.24 m
(1)	1669					Avignon, partie pont St-Bénézet emportée
(2)	1673-III					Arles
(1) (2) (4)	1674-XI-12	6.45				Avignon : 4 jours de pluie continue ; Rhône + Durance en crue ; 6.33 m au-dessus du 0 de l'ancienne échelle à l'amont du pont St-Bénézet (rapport Kleitz, 1857) ; ville sous l'eau du 12 au 16-XI ; eau monte encore toute la journée du 16 et commence à baisser le 17 à partir de 22h00 ; au moins 1.25 m au-dessus du niveau de 1586 dans secteur des Minimes. Arles : 5.24 m, pont de Crau emporté, Camargue inondée
(1) (2)	1679-XI-29					Avignon, Arles
(1)	1685-X-06					Avignon
(1)	1689-X-21					Avignon
(1) (2)	1694-XI-24/25					Avignon, Arles
(2) (4)	1705-XI					Arles, 4.8 m (ou 5.16 m ?)
(1) (2)	1706-I-03					Avignon
(2)	1710-IX					Arles
(2)	1711-II-26					Arles
(1) (2)	1711-III-12					Avignon (inférieure à 1433 et 1674)
(2)	1719-XI					Arles
(2)	1724					Arles
(1) (2) (4)	1745-XI-5, 13, 21					Avignon (inférieure à 1711) ; Arles 5.16 m

Réf.	Date	AVIGNON		BEAUCAIRE		Observations
		Hauteurs	Débîts	Hauteurs	Débîts	
	AA/MM/JJ	m	m ³ /s	m	m ³ /s	
(2)	1747-XII-12					Avignon (inférieure à 1711)
(1)	1747-IX-28/X-04					Avignon (Durance ?)
(2)	1748-XI					Arles, 4,30 m
(1)	1751					Avignon (sans précision)
(1) (2)	1754-XI-12					Arles, 4,56 m (cote relevée par l'ingénieur Poulle) ; type de crue fréquente selon Champion
(2)	1755-XI fin / XII début	7.25			10 000 ?	Conditions générales : Vent du sud très fort faisant remonter les eaux de mer dans les terres et retardant l'écoulement de la crue (dépassement des levées d'Arles et Tarascon) Fonte des neiges Durance en crue Importance de la crue sur haut bassin (cf. en Franche-Comté, rivières Doubs, Loue, Louve le 30-XI +3m, /Champion, IV, note 5, p. 59) A Viviers, le père de l'astronome Flaugergues décrit la crue comme « la plus forte dont ont ait conservé la mémoire. Ce fleuve entraînait plus de 20 pas dans la ville par la porte de la Roubine (...) » / Champion, IV, note 4, p. 59 Déjà inondation les 11 et 12-XI-1755 comparable à celle de 1745 Avignon : inondation Rhône commence dans la nuit du 29-XI, elle reste au niveau des « inondations ordinaires jusqu'au 30-XI, 17h00 ; rapide croissance ensuite jusqu'à 02 heures le 1 ^{er} -XII ; « (...) il y a eu dans la ville un 1/3 plus d'eau qu'en 1433 » ; niveau maximum maintenu pendant 24 heures ; seul le palais et ses environs furent épargnés par les eaux ; eau pendant 4 jours en ville et environs ; cote 7.25 m prise sur la Maison de la Madone à 200 m en amont du pont St-Bénézet, en face ou était disposée l'échelle « rhônométrique » avant 1840. Enregistrement le 1 ^{er} -XII

[VOIR REPRODUCTION REPERES 1841,1827, 1843, 1801, 1755, 1840 et 1856 A AVIGNON, DANS RAPPORT KLEITZ SUR événement

							de 1856].	Arles : 5.26 m (cote relevée par l'ingénieur Poulle) ; pertes immenses évaluées à 925 000 livres
(1)	1756-I-18							Avignon
(1)	1758-VII-mi							Beaucaire
(1)	1760-XI							Avignon, Arles
(1)	1763-XII-12							Arles, Avignon, Rh. + Du.
(1) (4)	1765-XI-3/11							Pluie continue pendant 5 jours (déjà épisode sur Du. & Rh. fin octobre) Avignon ; Arles, 4.70 m (ou 5.20m)
(1) (2)	1774-IV							Arles, 5.06 m, relevée au bureau du pont d'Arles par l'ingénieur Poulle
(1)	1776-III-12/13							Avignon
(1)	1777-XI-1/2							Avignon
(1)	1790-XI-12/13							Arles
(1)	1791							Avignon, Arles (sans précision)
A partir de 1801, sélection uniquement des événements > 6 m et/ou > 6500m³/s à Beaucaire								
(2)	1801-XI-09	6.95				7 000 ?		Avignon : repère maison de la Madone Arles, 5.27 m, relevée au bureau du pont d'Arles par l'ingénieur Poulle
(2)	1810-V-25							Arles, 5.13 m, relevée au bureau du pont d'Arles par l'ingénieur Poulle
(2)	1811-V-19							Arles, 5.38 m
(2)	1825-XI				>5.5 m			Arles, 5.86 m ; trois jours >5.5 m à Beaucaire
(2) (3)	1827-X-10/11	6.53			6.17	7500 ?		Avignon, Beaucaire : crue 3 jours > 5.5 m, provoquée par l'Ardèche ; Beaucaire : échelle de à 0.67 le 9-X, elles s'élèvent « presque instantanément » à 5.58 m le 10-X ; Arles : 5.10 m
(2) (3)	1836-X-09	5.45			6.00	6700 ?		Avignon : seulement 1 jour > 5 m ; crue importante de la Durance (3.8 m, échelle canal Crillon, le 9-X à 17h00, débit max. estimé à 4000 m ³ /s) ; coïncidence max. Rh. & Du. Arles : 4.40 m le 10-X
(2) (3) (4)	1840-XI-04	8.30 gauche 8.65 droite	10500	6.87		13000		Avignon : max. le 4-XI à 17h00 ; crue > 6 m pendant 12 jrs (30X-10-XI) Beaucaire : max le 3-XI à 02h 00 (sic d'après Kletzt)) Max. de la Durance (3.4 m échelle Crillon/Bompas; 3500 m ³ /s) coïncide

							avec celui du Rh. Pas de crue sensible du Gard Digues presque toutes endommagées (brèches et autres) Arles : 5.05 m le 2-XI (ou 5.23 m) >> Voir synthèse hydrométéo. dans thèse M. Pardé
(2) (3)	1841-X-27	6.40			6.10	8500	Avignon : max le 28-X à 07 h00 Beaucaire : max le 27-X à 05h00 Crue de la Durance : max 26-X matin, seulement 2000 m ³ /s (2.5 m /Bompas) lors du max. du Rh. à Avignon le 28. Arles : 4.41 m le 26-X
(2) (3) (4)	1843-XI-03	7.04			6.79	9000	Plus forte crue connue de la Durance (4.5 m à Bompas le 2-XI midi pour 6000 m ³ /s. Devance le Rh. d'un jour. Rhône 3 jours > 5.5 m à Beaucaire (et 4.5 m à Arles) Importants dégâts. Arles : 5.15 m le 2-XI (ou 5.33 m)
(2) (3)	1846-X-19	5.80			6.45	7600	Max de la Du. (2.94 m / Bompas le 17-X pour 2500 m ³ /s) précède un peu celui du Rh., mais encore 2000 m ³ /s lors du max du Rh. Arles : 5.04 m le 19-X
(2) (3)	1856-V-31	7.83 gauche 8.45 droite 31-V, 17h00			7.95 31-V, 17h00	12500	Beaucaire (6) = 11640 m ³ /s Pendant 4 jours eaux > 6 m à Avignon et Beaucaire. Max de la Durance le 31-V à midi (3.21 m/Bompas, 3000 m ³ /s). Les hauteurs d'eau enregistrées à l'aval de Viviers sont presque toute supérieures à celles de l'événement de 1840 (+0,5m à +1m). A mettre au compte des ouvrages et aménagements réalisés entre 1840 et 1856 (cf. voie ferrée, ponts, digues). La submersion des ouvrages et l'écoulement différencié dans le lit majeur expliquent en partie la faiblesse relative des cotes à Avignon. Compte tenu des variations topographiques, les Hmax atteintes au long du lit majeur nécessitent une analyse au cas par cas, tronçon par tronçon. « Entre Pont-St-Esprit et Tarascon le débit max. a varié de 11000 à 13900 m ³ /s » (Kleitz) ; M. Pardé situe le débit max. entre 12 et 13 000 m ³ /s. Max du Rh. arrive à l'embouchure 3 heures après celui de la Du. Importance des dégâts aux ouvrages dans partie aval de Pont-St-Esprit : 1.8 millions j>Arles et 0.8 en aval pour réparations (+ dégâts canal Arles>Bouc et embouchures) Arles : 5.58 m le 31-V à 18h00
							Arles : 5.58 m le 31-V à 18h00
(3)	1864-X-28				6.25	7200	Beaucaire (6) = 8100
(3) (6)	1872-III-21					9080	

Les aléas naturels et leurs enjeux

(3) (4)	1872-X-21			6500	6.87	8430	Arles 5.37 m	
(3)	1872-XII-04				6.57	7800		
(3)	1882-X-29				6.60	7500	Beaucaire (6) = 8390	
(3)	1886-X-27			6300	7.48	9400		
(3)	1886-XI-11/12			6600	7.55	9470	Beaucaire (6) = 10200 ; Arles (4) 5.42 m	
(3) (6)	1888-XII/1889-I-01			5800	6.81	7800 / 8780		
(3)	1890-IX-23				6.04	6570		
(3)	1891-X-23				6.34	7200	Beaucaire (6) = 7800	
(3)	1896-XI-02				7.00	8760	Beaucaire (6) = 9060	
(3)	1900-IX-28/30			8160	7.08	8880	Beaucaire (6) = 8940	
(3)	1907-X-11				6.68	8120		
(3)	1907-X-18				6.70	8160		
(3) (6)	1907-XI-10/11			6000	6.83	8440		
(3)	1910-XII-02				6.63	7970		
(3)	1910-XII-07/08			7000	7.02	8800	Beaucaire (6) = 8660	
(3)	1910-XII-13				6.36	7420		
(3)	1914-XI-04				6.34	7080		
(3)	1917-V-21				6.56	7520	Beaucaire (6) = 7850	
(3)	1917-V-31				6.05	6520		
(3)	1919-I-06				6.80	8000	Beaucaire (6) = 8280	
(5)	1923-XII-02					6600		
(6)	1924-X-06					7600	Beaucaire (5) = 7090	
(5)	1926-XII-01					6830		
(5)	1928-X-29					6440		
(5)	1933-XI-21					6880		
(3)	1935-XI-14			8200		9600	Beaucaire (5) = 9240	
(6)	1936-I-03					7820		

Réf.	Date AA/MM/JJ	AVIGNON		BEAUCAIRE		Observations
		Hauteurs m	Débites m ³ /s	Hauteurs m	Débites m ³ /s	
(5)	1944-XI-29				6760	
(5)	1948-I-29				6550	
(5) (6)	1951-XI-22				9170	
(5) (6)	1955-I-22				7230	
(6)	1958-XII-22				7920	
(5)	1960-III-12				6610	
(6)	1960-X-08				7960	Beaucaire (5) = 7760
(5)	1963-XI-07				6980	
(6)	1976-XI-11				8690	Beaucaire (5) = 8090
(6)	1977-X-24				8125	
(5)	1977-XII-09				7220	
(6)	1978-II-27				7800	
(6)	1982-XI-09				8025	Beaucaire (5) = 7350
Duband	1983-V				6750	
(5)	1986-IV-09				6580	
(4)	1992-IX					Arles 5.10 m
(6)	1993-X-10				9800	Beaucaire (5) = RIEN ; Arles (4) 5.40 m
Duband	1994-I-08		8200		10800	Beaucaire (5) = 10500 ; (6) = 11000
(5) (6)	1994-XI-06				8870	
(6)	1996-XI-13/14				8980	Beaucaire (5) = 6980
(6)	1997-XII-19				8020	Beaucaire (5) = 6520
(5)	2001-III-24				6650	
(6)	2002-IX-10				10500	
(6)	2002-XI-26				10200	