

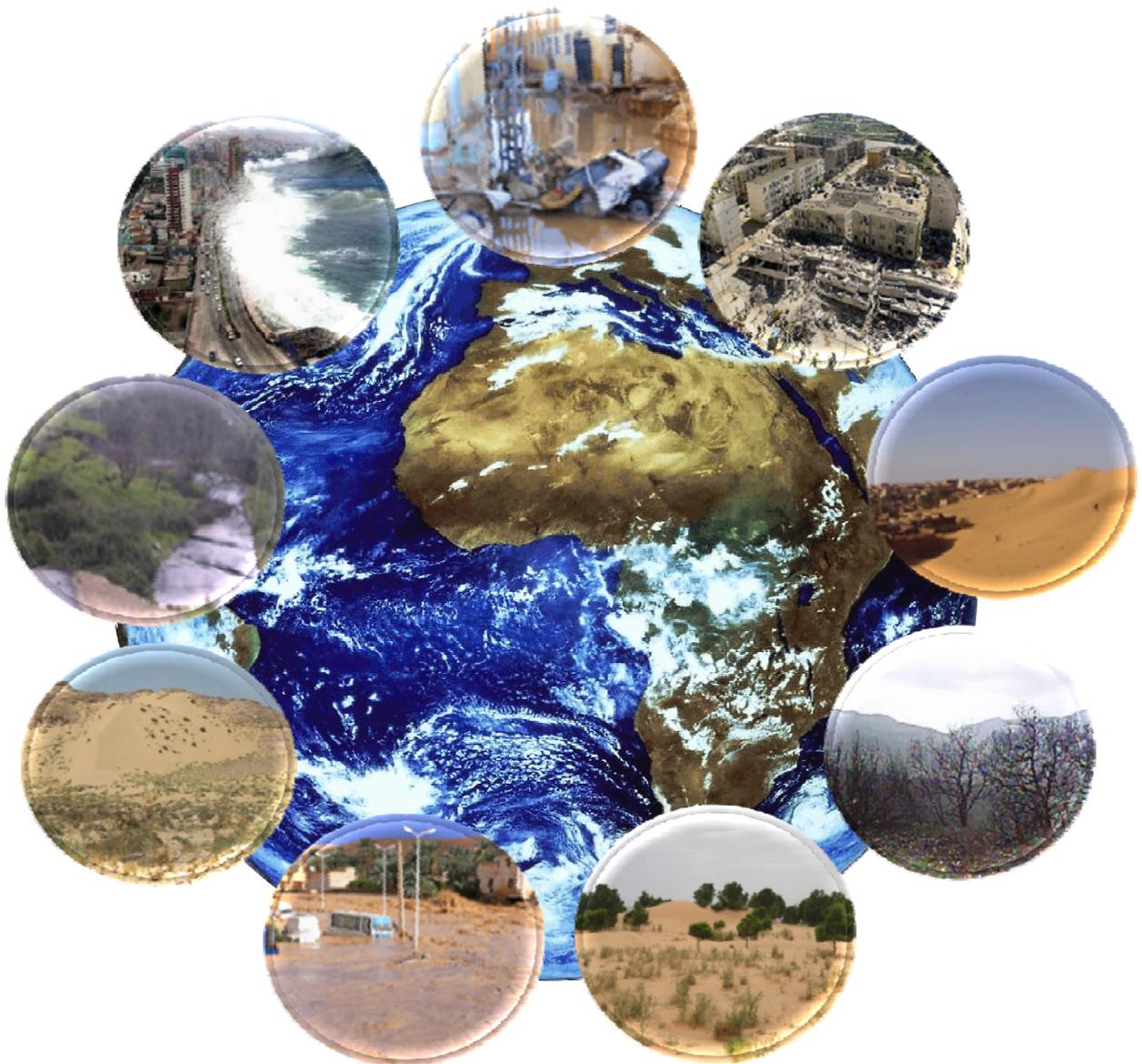


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



CENTRE DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE SUR LES
REGIONS ARIDES Omar El Barnaoui (C.R.S.T.R.A)

Atelier International de Formation sur les Risques Majeurs et les Catastrophes Naturelles Stratégies de prévention et de protection



Biskra 16-17 décembre 2009

Responsable de publication :

Fattoum LAKHDARI

ISBN 978-9961-9745-5-1

N° Protection Légale : 4787-2010

SOMMAIRE

<i>Allocution d'ouverture</i>	03
<i>Préambule</i>	05

I. RISQUES CLIMATIQUES

1. SECHERESSE ET DESERTIFICATION

MATARI A.: le risque sécheresse.....	09
AIDOU A. : la désertification en tant que risque majeur.....	19
KEVIN White & Nick Drake : Tempêtes de poussière et désertification.....	33
ABBAS M. : Prévention et lutte contre les feux de forêt en Algérie.....	49
BELAZZOUGUI M.: Lutte antiacridienne	67

2. INONDATIONS

BRAVARD J.P., Combe C.: Le risque d'inondation dans la vallée du Rhône. Démarches récentes de recherche/communication/gestion. Conduites dans le cadre du plan Rhône.....	77
GARRY G.: La cartographie des zones inondables par approche hydrogéomorphologique et son application au milieu subaride	107
BAHLOULI L.: Connaissance du cycle de l'Eau : un préalable à l'étude des risques majeurs liés à l'eau	147

II. RISQUES GEOLOGIQUES

1. RISQUES SISMIQUES

YELLES-Chaouche A.K., Semmane F.: les séismes en Algérie du Nord.....	159
BELAZOUGUI M. L'expérience algérienne en génie parasismique 1980-2009.....	165
TOUAM S. , Salem Kahlouche : La géodésie spatiale et sa contribution à la réduction des catastrophes naturelles. Cas du risque sismique.....	171

2. GLISSEMENTS DE TERRAIN

BENAZZOZ M. T. : Evaluation du risque des glissements de terrain en milieu urbain appliquée à la ville de Constantine : les causes et les conséquences.....	189
KRAUTER E.: Landslides.....	203

III. AMENAGEMENTS ET GESTION DES RISQUES

BOUBAKEUR M.: L'aménagement et l'utilisation des espaces dans le cadre de la prévention des effets des catastrophes	223
VEYRET Y. : Géographie des risques et aménagement de l'espace : l'exemple français....	233
SOUICI M. : méthodologie de réhabilitation et de reconstruction des ksour.....	265
NUSSBAUM N. : Possibilités et limites de l'assurance, en tant que mode de financement de la réparation des dommages causés par les catastrophes naturelles.....	275

ALLOCUTION D'OUVERTURE

De nos jours, l'humanité est de plus en plus exposée aux risques majeurs en raison de l'accroissement de la population mondiale, de la forte urbanisation qui s'en est suivie et qui s'en suit toujours, de la multiplicité et de la complexité des risques.

En effet, au risque sismique, aux inondations, aux tempêtes, aux cyclones et à tout autre risque d'origine naturelle, il nous faut composer avec les risques technologiques et nous préparer aux effets du changement climatique du moins aux phénomènes extrêmes (inondation d'un côté, sécheresse et canicule de l'autre).

Les catastrophes vécues à travers le monde ont été suivies de lourdes conséquences en terme de pertes en vies humaines et en biens économiques, leurs effets vont jusqu'à rompre des déséquilibres, anéantir des efforts consentis durant des décennies voire des siècles (le Tsunami du 24 décembre 2004 en Asie du sud, avec plus de 200 000 morts résonne toujours dans les mémoires).

De par sa situation géographique, sa structure géologique, son relief et son régime hydrologique, l'Algérie a dû faire face à de nombreuses catastrophes :

2001 : inondations de Bab-el-Oued

2003 : séisme de Boumerdès

2004 : inondations à Béchar/Adrar

2008 : inondations à Ghardaia

Pour n'en citer que celles de la décennie en cours.

En outre, l'Algérie est aussi confrontée aux sécheresses récurrentes, à la désertification et à l'ensablement, des risques qui prennent une autre dimension avec le réchauffement climatique et menacent à terme la stabilité des populations notamment steppiques et sahariennes.

Aujourd'hui, sécheresse et désertification menacent aussi des régions tempérées comme l'Europe et en particulier sa rive sud.

Des pouvoirs publics promulguent des textes législatifs fixant les modalités de prévention et de gestion des risques et des catastrophes qui en découlent, engagent des actions d'aménagement concrètes sur le terrain et intègrent de plus en plus les risques dans les outils d'aménagement du territoire.

Pour sa part, la communauté scientifique s'attèle à l'élaboration d'outils d'aide à la décision et à poursuivre l'observation et le suivi de l'environnement pour la mise en place des systèmes d'alerte précoce.

Malgré les efforts déployés à travers le monde, des insuffisances émergent à chaque catastrophe et notamment à travers les domaines suivants :

- Prévention et préparation des populations
- Difficultés d'application des dispositifs juridiques (avec parfois carence en termes de textes)
- Carences aux difficultés sur le plan des assurances.

- Et parfois manque d'adaptation ou de synergie entre programmes de recherche et attentes des gestionnaires.

Ces difficultés sont amplifiées davantage en raison de la complexité et de l'interférence des risques entre eux, d'où des réactions en chaîne :

- Le séisme a provoqué un tsunami,
- Les inondations peuvent être à l'origine de glissements de terrain,
- Les sécheresses peuvent favoriser les incendies de forêts,
- Les feux de forêt et la sécheresse peuvent être le précurseur de la désertification,
- La désertification peut accroître le ruissellement et amplifier l'effet des inondations,

Le réchauffement climatique accélère la progression de la désertification (via l'aridité, l'augmentation du risque d'incendie de forêt et la difficulté de remonter biologique)

La désertification contribue au réchauffement climatique par défaut de fixation du CO₂ et par l'augmentation de la réflectance des sols dépourvus de la végétation.

Les phénomènes d'ensablement s'installent avec l'amplification de la désertification des que le sol est dénudé.

Les constats font ressortir l'importance des dégâts qui dépassent souvent des capacités et les moyens d'un pays et l'aide et l'organisation internationale deviennent alors nécessaire.

C'est ainsi que les formes d'organisation régionale tels que l'Accord EUR-OPA Risques Majeurs une démarche adéquate pour une meilleure prise en charge des risques.

À ce titre, notre Centre apporte sa contribution en matière des risques naturels et notamment à travers des groupes de travail thématiques regroupant plusieurs pays membres de l'Accord. L'intérêt de ce type de travaux a permis d'identifier les carences, les dysfonctionnements et les difficultés rencontrées en matière de gestion et de prévention des risques d'un pays à l'autre et de mettre en évidence les bonnes pratiques qui ont fait leurs preuves sur le terrain pour une plus large diffusion.

C'est pour tenter de répondre aux interrogations soulevées que nous avons jugé utile d'organiser cet atelier aujourd'hui afin de discuter, d'analyser et de transmettre les acquis en termes d'avancées scientifiques et d'expérience capitalisées dans le domaine des risques. Ce qui permettra à coup sûr de nous éclairer sur les voies et les moyens à mettre en œuvre pour une meilleure prise en charge des risques.

Fattoum LAKHDARI

CRSTRA

PRAMBULE

Le Centre de Recherches Scientifiques et Techniques sur les Régions Arides Omar El Bernaoui de Biskra (Algérie) a organisé du 5 au 10 décembre 2009 un Atelier International sur les Risques Naturels.

Cet atelier a reçu la visite et le soutien de Monsieur Le Wali de Biskra. Il a été suivi par de nombreuses personnes toutes impliquées dans la recherche sur les aléas et les risques, sur la gestion des risques et des crises : membres de la protection civile, des travaux publics, spécialistes de l'urbanisme, scientifiques, le Croissant Rouge, l'Education, le Développement Durable...

Ce séminaire a rassemblé des chercheurs et des gestionnaires des risques et des crises venus d'Algérie et de plusieurs pays européens. Les expériences européennes présentées pouvaient fournir des exemples de méthode de gestion des risques et des crises, faisant écho aux pratiques algériennes en la matière. Elles ont aussi fourni des bilans mettant en évidence des projets avortés, de fausses pistes qui demandent réflexion avant d'être transférés ailleurs.

Pourquoi envisager la question des risques que l'on pourrait considérer comme bien connue ? Dans beaucoup de pays notamment ceux où la croissance démographique et la croissance urbaine demeurent encore considérables, la vulnérabilité des populations, des biens et des aménagements est importante tout particulièrement face aux aléas naturels. A l'échelle du monde, une population importante et croissante, y compris dans les pays qui pourraient considérer avoir mis en œuvre une série complète de réglementations pour se protéger des effets des risques, est menacée par les processus naturels. La France en a fait l'expérience fin février sur le littoral atlantique. Or, depuis 1982 le pays dispose de réglementations destinées à maîtriser l'urbanisation en zone inondable, et plus largement dans tout espace à risque. La France dispose de lois qui ont rendu la connaissance du risque, l'éducation au risque obligatoires et pourtant durant la nuit du 28 février 2010, la tempête associée à un fort coefficient de marée a provoqué plus de 50 victimes installées à l'arrière de digues dans lesquelles ces populations avaient une confiance absolue. Ainsi, la question des risques est toujours d'actualité. Elle le reste parce que l'attractivité de certains espaces (littoraux, bord de cours d'eau) est plus forte que l'existence du danger pour ces populations ? Parce que la confiance dans les digues, les barrages et tout autre aménagement sensé juguler le risque, est souvent totale aussi. Parce que certains terrains « sensibles » sont moins coûteux que d'autres pourtant plus sûrs. Là s'installent des populations dont les ressources sont limitées...

La vulnérabilité des villes augmente aussi, notamment dans les pays où la croissance de la population urbaine est importante, mal maîtrisée spatialement, où les plus pauvres s'installent dans les secteurs les plus dangereux parce que précisément le foncier y est à moindre coût. Il s'agit donc d'envisager à partir de la question des risques et des catastrophes, de nouvelles formes d'urbanisme, de nouvelles constructions (habitat adapté à l'aléa sismique...), il s'agit de réfléchir au coût du foncier. Finalement c'est la question de la croissance urbaine, des modalités politiques, administratives de son accompagnement qui est posée au travers du risque.

Les thèmes abordés au cours de ces journées ont été nombreux et se sont tous rapportés aux aspects qui viennent d'être évoqués. Ils ont concerné les aléas qui plus ou moins régulièrement mais souvent violemment affectent l'Algérie : inondations, aléas sismiques et mouvements de terrain. Ils ont envisagé les aléas sous l'angle de leur dynamique, de leur fréquence, de leur intensité. La connaissance de l'aléa, du lit du cours d'eau et du fonctionnement précis de ce dernier, des matériaux susceptibles de glisser est indispensable pour traiter ensuite de la gestion des risques. L'observation de terrain, la modélisation constituent toujours des éléments fondamentaux de cette connaissance qui passe aussi par l'analyse des paléoenvironnements, de l'action passée des sociétés sur les cours d'eau, dans les bassins versants ou plus largement sur les pentes... La cartographie des aléas et des espaces à risques, cartographie qui peut être facilitée par l'usage de la télédétection demeure une nécessité qui implique de définir ce que l'on veut cartographier exactement, comment le faire, dans quel but ? Et à quelle échelle ?

Les travaux du séminaire ont aussi envisagé la question centrale de la vulnérabilité, sachant qu'un processus de forte intensité qui se produit dans un espace vide ne constitue pas un risque. En revanche là où la densité de population est importante, où les types de constructions sont peu adaptés au processus sismique par exemple (pas de construction anti-sismique) l'effet de la crise peut être bien

plus considérable qu'en un lieu où des précautions ont déjà été prises, où la population est bien informée de ce qui peut se produire, où les constructions sont correctement sécurisées. En cela le risque est bien un objet social auquel il faut répondre en termes de modes d'aménagement de l'espace et qu'il faut traiter par des types d'urbanisation et de construction adaptés. On ne peut oublier que le risque et la crise sont des révélateurs des inégalités sociales et spatiales et que les plus pauvres sont toujours les plus vulnérables comme l'a rappelé il y a peu le terrible séisme qui a fortement affecté la ville de Boumerdès, et plus près, Haïti.

Le séminaire a accordé une place importante à la question des assurances après que soit survenue une catastrophe naturelle. Les différents pays d'Europe n'ont pas la même approche des assurances en la matière. Il était donc utile de rappeler la variété des situations. L'une des questions centrales étant bien de savoir si les assurances contribuent à renseigner les populations sur le risque, à leur faire prendre conscience de leur vulnérabilité et à leur faire envisager des solutions et des pratiques au plan personnel déjà avant même que les autorités n'interviennent au travers notamment de la prévision ou de la gestion de crise. Dans le large panel européen, les différents types d'assurances proposés en matière de catastrophes naturelles offrent des aspects positifs et d'autres qui le sont moins. Il y a là aussi matière à réflexion pour envisager une efficacité maximale.

Ces journées ont aussi fourni l'occasion d'insister sur des risques qui trop souvent sont oubliés. On évoque généralement les risques majeurs, inondation, séisme, mouvements de terrain de grande ampleur, et l'on oublie des risques tels que la désertification. Pourquoi cela ?

En France Haroun Tazieff a été probablement le premier à parlé de risques majeurs pour définir les processus évoqués auxquels il fallait ajouter les épisodes volcaniques. C'était dans tous les cas des processus de forte intensité et caractérisés par un déroulement rapide. Tous ces processus peuvent avoir des effets extrêmement dramatiques et aisément médiatisables. Personne n'est resté insensible face aux conséquences du séisme de Boumerdès et d'Haïti, des inondations de la Nouvelle Orléans...ou plus encore aux suites du Tsunami d'Indonésie. Les médias se focalisent sur ces événements pendant quelques jours, sensibilisent fortement les populations, voire les associations humanitaires et tout cela confère à ces événements un aspects majeurs que l'on en peut d'ailleurs mettre en question..

A côté de ces événements est-ce à dire qu'il existerait des risques mineurs ? Certes les processus n'ont pas toujours une extrême ampleur et les mêmes effets dramatiques que ceux que l'on vient d'évoquer. Mais où dans ce cas situe-t-on la désertification ? Est-elle un risque mineur, puisqu'on en parle peu, que les médias n'en témoignent guère...et que les processus qui l'expliquent agissent sur des temps plus longs qu'un épisode sismique ou volcanique ou qu'une crue éclair d'oued ? Cependant par le nombre de victimes et par les espaces concernées, la désertification est bien un risque qu'il faut considérer comme majeur et une catastrophe de premier plan. Ce risque et ses effets dramatiques ont longtemps mobilisé les chercheurs et les acteurs de terrain lors de ce séminaire...

Une journée sur le terrain a permis d'envisager aléa et risque d'inondation et de désertification dans la région des Ziban, et de revenir sur les modes de gestion.

Puissent ce travail partagé entre chercheurs et praticiens des administrations, de la gestion, contribuer à mieux protéger les populations et les biens des événements naturels, puissent-ils aussi contribuer à réfléchir à un nouvel urbanisme, à des usages plus adaptés des territoires agricoles ou autres...cela au moment où la notion de développement durable se généralise, devient un objectif pour tous les pays et nécessite d'intégrer gestion des risques et des catastrophes. En effet, leur coût en vies humaines en termes économiques voire écologiques peut être très élevé et éloigner plus encore le pays concerné du développement durable par la destruction sociale que provoque ces crises, par la mobilisation des finances et des énergies mises au service de la reconstruction, des réparations et non du développement

L'ouvrage constitue un recueil des nombreuses contributions des participants à l'atelier.

BENAZZOUZ M. T.

Chercheur associé au CRSTRA/

Université de Constantine

I.RISQUES CLIMATIQUES

1-Sechersse et Desrtification

LE RISQUE SECHERESSE

A.Matari IHFR Oran

RESUME

De toutes les calamités naturelles ce sont les sécheresses qui ont marqué le plus l'histoire. La nourriture dépendait de la récolte, donc de la pluviométrie. De nos jours ce sont les pays en voie de développement qui sont les plus vulnérables. En Algérie on parlait également de famine durant la sécheresse des années quarante. La sécheresse est perçue différemment selon la discipline. Dans notre étude on traitera de la sécheresse dite climatologique. Dans une première étape on montre un exemple d'analyse de la pluviométrie sur de longues périodes d'observation et compare les différents indices de sécheresse. Dans une seconde étape on tente d'expliquer la sécheresse par le phénomène et comparer les résultats de modèles sur la pluviométrie de nos régions.

I - INTRODUCTION

A l'inverse des inondations, les sécheresses présentent une forte persistance (jours, mois, années) et une ampleur spatiale bien plus importante (région, pays), elles causent plus de dégâts.

D'après l'OMM les sécheresses sont devenues plus fréquentes qu'auparavant et occasionnent plus de dégâts. Durant les 30 dernières années 3 millions on perdu la vie dont 90% dans les pays en voie de développement suite aux manques d'infrastructures pour palier à ce phénomène. La sécheresse du Sahel (1968-1986) a retenu le plus d'attention des medias suite à ces conséquences désastreuses; le Maghreb n'a pas échappé à ces aléas climatiques car on a observé de longues périodes de sécheresse comme en Algérie et au Maroc. A l'inverse des inondations (crues éclair) les effets de la sécheresse s'accumulent selon un processus lent et progressif. La sécheresse est un risque du à un ensemble de processus d'origine naturel (variabilité saisonnière, interannuelle..) mais peut être amplifiée par des facteurs aggravant souvent d'origine humaine parfois localisé comme un changement de l'albédo du sol ou un changement de la circulation atmosphérique suite au réchauffement planétaire induit par un accroissement significatif des gaz à effet de serre.

La sécheresse est une insuffisance conjoncturelle des apports d'eau, c'est un déficit accidentel; l'aridité est plutôt un état habituel du bilan de l'eau, c a d un écart négatif du bilan pouvant provoquer un certain nombre de difficultés sur le plan social et économique.

- Quantification des précipitations

Les précipitations sont mesurées dans le réseau de l'ONM et l'ANRH par un pluviomètre type association ayant une surface réceptrice de 400cm² installé à un mètre du sol. La pluviométrie est recueillie toute les 3 heures ou seulement 2 fois par jour selon le type de station. A l'échelle mensuelle sur les documents climatologiques, on s'intéresse au total journalier, décadaire ou mensuel. La pluie maximale en 24 heures est également intéressante puisque c'est généralement dans cette journée que l'on observe les plus fortes intensités. Le pluviographe permet de quantifier la variation de la quantité de pluie en fonction du temps et de calculer les intensités. Les premières données de précipitations existent dans notre pays depuis le milieu du dix neuvième siècle, les stations étaient alors implantées dans les

hôpitaux militaires et les ports mais malheureusement il est impossible de trouver des séries continues sur de longues périodes d'observation suite à l'arrêt et aux déplacements fréquents des stations.

- Homogénéité des données.

C'est sur la qualité et la quantité des données que repose l'analyse climatologique. A temps réel les données pluviométriques sont contrôlées par les services de l'ONM et de l'ANRH. Le contrôle qui nous semble le plus efficace est le contrôle spatial, il consiste à comparer la donnée d'une station par rapport aux données des stations environnantes. Il reste toutefois assez complexe et dépend du type même de la précipitation. Pour l'étude de l'homogénéité des séries plusieurs méthodes existent ; celle du double cumul qui consiste à comparer une série par rapport à une série de référence assez proche (en général bien corrélée) homogène est la plus utilisée par la climatologie et l'hydrologie. La rupture de l'homogénéité est principalement due au déplacement du poste d'observation et à l'évolution d'un obstacle et il est possible dans certains cas d'homogénéiser les séries.

-Variabilité spatiale

A l'inverse de la température, la pluviométrie présente une grande variabilité spatiale qui rend sa quantification difficile sur une zone donnée. Cette quantification dépend du réseau existant et du type même de la précipitation et de l'échelle considérée. Pour les précipitations orageuses la densité doit être plus importante, dans ce cas l'OMM préconise même un pluviomètre tous les 20 Km² ; chaque pluviomètre représente une zone d'influence qui n'est pas connue. Il existe plusieurs méthodes pour estimer la pluviométrie dans l'espace, comme celle d'un bassin versant; on peut citer par exemple la moyenne arithmétique, la moyenne de Thiessen, la méthode des isohyètes. A notre avis c'est la dernière méthode qui nous semble plus réaliste dans la mesure où elle tient compte de l'altitude de la station et de son exposition par rapport aux vents dominants.

-Variabilité temporelle

La pluviométrie présente en général une variabilité intra-annuelle ou saisonnière et une variabilité entre les années successives ou interannuelle. La variabilité saisonnière est du type méditerranéen avec un maximum en hiver durant les mois de décembre ou janvier. Dans l'extrême sud de notre pays, les fortes pluies sont du type moussonal et sont observées en été, on peut même distinguer durant cette saison pluvieuse une certaine variation diurne dictée par l'évolution de la convection thermique. D'une façon générale le coefficient de variation CV (rapport entre l'écart type et la moyenne) décrit assez bien la variabilité relative de la pluviométrie, il croit avec l'aridité de la station. Il peut être calculé sur les mois ou l'année. Pour les mois secs et les stations sahariennes il sera très élevé. Nous donnons à titre d'exemple, dans le tableau suivant quelques indications de la moyenne des précipitations en mm (Tab1) et le CV en % (Tab2) pour Oran, Biskra et Tamanrasset.

Tableau 1 : pluviométrie moyenne en mm pour quelques stations

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNEE
ORAN	59	52	38	38	26	8	1	2	13	39	48	73	395
BISKRA	13	8	15	12	9	5	1	4	21	20	17	11	130
TAMANRASSET	2	1	1	3	7	5	3	6	9	4	3	3	46

Tableau 2 : coefficient de variation en % pour quelques stations.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	ANNEE
ORAN	75	79	88	92	118	122	212	214	115	103	90	76	29
BISKRA	137	212	107	117	141	215	200	224	254	145	121	127	76
TAMANRASSET	428	287	237	222	222	163	184	213	137	204	310	265	77

II - LE CONCEPT DE SECHERESSE

Le concept de sécheresse est généralement mal défini ; pour Larousse, c'est l'état de ce qui est sec. L'aridité est un état habituel permanent du bilan d'eau, comme au Sahara par exemple, par contre la sécheresse désigne un écart négatif au bilan habituel, elle aura un caractère accidentel ou temporaire. L'ampleur de la sécheresse va dépendre de cet écart, il doit être suffisant pour provoquer un certain nombre de difficultés sur le plan social et économique. De nos jours la climatologie est en mesure de calculer la probabilité d'apparition d'une situation anormale en la situant dans l'histoire du climat qui va dépendre de la longueur des enregistrements existants. Le calcul des probabilités n'a un sens que si le climat reste stationnaire ou ne présente pas de cyclicités. Les effets de la sécheresse s'inscrivent dans le temps et dans l'espace. La sécheresse qui est observée cette année dans l'Ouest algérien ne serait pas rudement ressentie (restriction plus sévère dans la distribution d'eau) si elle n'avait pas sévit les années précédentes, ses effets sont d'autant plus graves que la dimension spatiale est plus importante.

L'étude de la sécheresse, vu son impact social économique et sur l'environnement, fait appel à plusieurs disciplines (météorologie, agriculture, etc....)

Météorologie: elle se caractérise par un déficit ou une mauvaise distribution par rapport à une valeur de référence

Hydrologie : lorsque le déficit pluviométrique dure assez longtemps pour entraîner une baisse de l'alimentation des retenues et du niveau piézométrique

-Agricole : c'est lorsque le déficit pluviométrique entraîne une baisse sensible de la production agricole suite au bilan hydrique du sol.

Socio-économique. C'est la conséquence du déficit pluviométrique par une mauvaise alimentation en eau de la population

Si la sécheresse agricole peut être définie comme un écart négatif suffisant pouvant entraîner une baisse sensible de la production agricole, le total pluviométrique n'est toujours pas relié à cette production puisqu'il existe des périodes critiques, correspondant à certains stades végétatifs durant lesquelles une certaine quantité de pluie est nécessaire si on veut obtenir de meilleurs rendements. La période sèche peut concerner une période sans pluie ou sans pluie efficace sur un certain nombre de jours, de mois ou d'années. En météorologie on définit un jour sec lorsque la pluviométrie est inférieure à 0.1mm. Ce seuil peut être considéré différemment en hydrologie et en agriculture.

Du point de vue climatologique la sécheresse est définie principalement par l'apport des précipitations sur une période donnée (mois, saison, année) et sa relation avec une valeur de tendance centrale comme le mode, la médiane ou plus fréquemment (à tort) la moyenne ou une valeur ayant une probabilité d'occurrence choisie. Ceci nécessite de longues séries d'observation qui ne sont pas toujours disponibles.

1) A l'échelle de la journée

L'analyse de ces séquences sans pluie ou avec pluie sur un certain nombre de jours successifs, la relation entre la longueur des séquences pluvieuses et la quantité de pluie enregistrée durant une saison donnée fourniraient des renseignements plus pertinents

Par exemple sur Saida, entre octobre et mars et 1982-1991 nous donnons dans le tableau 3 suivant la longueur en jours des séquences sans pluie, leur fréquence et leur fréquence cumulée.

Tableau 3 : fréquence des séquences sèches à Saida.

Longueur de la séquence sèche en jours	Nombres de cas	fréquences	Fréquences cumulées
1	56	42%	42%
9	8	8%	83%
50	1	0.9%	100%

Nb jours pluie= 337 probabilité d'observer un jour de pluie : $P(p)=0.18$

Nb jours sec=1493 probabilité d'observer un jour sec : $P(s)=0.82$

Moyenne des séquences pluvieuses : $M_{sp}=1.8j$

Moyenne des séquences sèches : $M_{ss}=7.8j$

On peut également ajuster par une loi de probabilité (loi de Markov, loi binomiale négative) pour déterminer la probabilité d'observer une séquence sèche ayant une longueur donnée.

2 - L'échelle de la saison

Un total annuel peut être considéré comme une année sèche pour l'hydrologue et une année à bon rendement pour un agronome. En effet, la plante passe par des stades végétatifs et nous savons que les pluies de printemps justifient au mieux les rendements. Il est possible d'identifier la période de sécheresse durant l'année de plusieurs façons :

-à partir du diagramme ombrothermique ($P=2T$).

Ces diagrammes permettent de fixer le début et la fin de la période sèche, donc la longueur de la saison pluvieuse ou sèche à partir des coupures entre l'évolution mensuelle des pluies et des températures. Comme on observe sur les dernières décennies une tendance à la hausse des températures et une tendance à la baisse des précipitations pour la plupart des mois et des stations, on remarque en général que la période sèche est devenue plus longue. La figure (Fig1) donne les diagrammes ombrothermiques sur deux périodes de 30 années successives 1931-1960 et 1961-1990 à Oran. Par contre on remarque pour cette station que le début de la saison des pluies est pratiquement le même pour les deux périodes, par contre la fin de la saison des pluies est plus retardée durant les dernières décennies suite à l'accroissement des pluies de printemps.

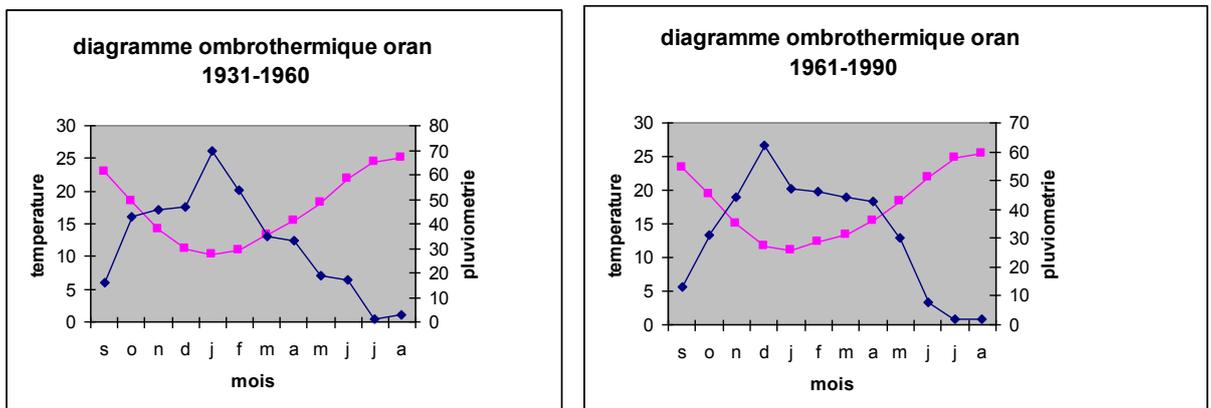


Fig1 : Diagrammes ombrothermiques de la ville d'Oran

-à partir de la pluviométrie et de l'évapotranspiration :

La longueur de la période sèche est obtenue lorsque la quantité d'eau est inférieure à une fraction de l'évapotranspiration potentielle ; cette fraction diffère selon les auteurs et peut être égale à 50% et 30%

-très souvent on peut observer de longues périodes de sécheresse même durant le mois le plus pluvieux de l'année; plusieurs travaux à partir des pluies journalières ont tenté de trouver un événement qui caractérise le début et la fin de la saison des pluies, par exemple le début peut être déterminé par un cumul d'une certaine quantité sur 3 jours consécutifs sans observer après cette date une séquence sèche qui dépasse un certain nombre de jour. La fin de la saison des pluies peut être déterminée par la nullité du bilan hydrique du sol. Une analyse statistique (paramètre de position, de dispersion, lois de probabilités) peut être établie sur le début la fin et la longueur de la saison des pluies.

3- Sécheresse inter annuelle

A partir d'une ACP avec rotation du type Varimax menée sur la matrice de base formée d'un ensemble de stations sur les 40 dernières années on a mis en évidence des ensembles régionaux distincts à partir de la cartographie des saturations produit de l'ACP.

Chaque ensemble peut être représenté par la station la mieux corrélée avec l'axe factoriel. Pour chacune d'elle nous avons analysé les graphes représentant l'évolution chronologique de la pluviométrie en variable centrée réduite, sur l'année et sur les saisons comme ceux d'Oran (Fig2).

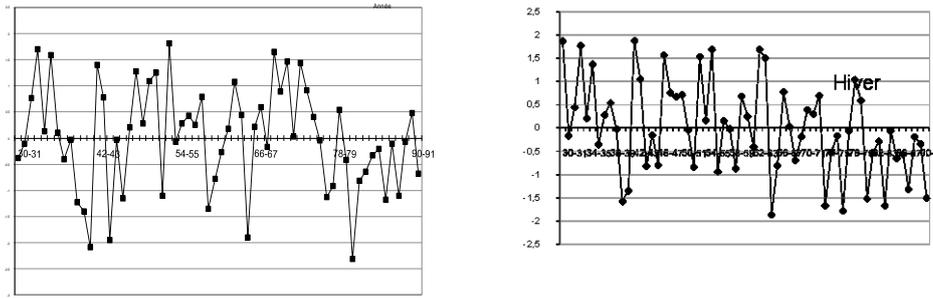


Fig2 : Evolution des totaux annuels et hivernaux en variable centrée réduite sur Oran

La pluviométrie varie autour de la moyenne climatologique et il apparaît des groupes d'années excédentaires et déficitaires qui se répètent d'une façon aléatoire. Les déficits les plus importants et les plus persistants se situent dans les années quarante et quatre vingt et les excédents dans les années cinquante et soixante dix. Il apparaît également une tendance à la baisse sur les totaux annuels mais elle est plus marquée sur la saison d'hiver; pour les pluies de printemps on a observé une augmentation très nette entre 1965-1975. Le test de Mann Kendall confirme cette remarque, considéré mois par mois la statistique du test est négative de septembre à février, positive en mars et avril ; pris sous sa forme progressive et rétrograde, on situe le début de la tendance à la baisse au milieu de la décennie soixante dix.

Durant la baisse de la pluviométrie de ces dernières décennies, le nombre de jours de pluie est resté stable, ceci montre que durant cette période, le déficit est du essentiellement à la baisse des fortes précipitations, cette remarque a été déjà soulevée par d'autres chercheurs en analysant les données du Sahel.

Pour estimer l'intensité du déficit pluviométrique plusieurs méthodes existent ; on citera les indices qui prennent comme référence la valeur la plus fréquente qui est généralement la moyenne climatologique ou l'analyse fréquentielle grâce à laquelle on peut calculer des seuils de sécheresse. Le calcul peut se faire directement à partir des séries observées ou à partir de leurs ajustements par une loi de probabilité adéquate. L'utilisation de la loi de probabilité permet d'estimer plus correctement les différents quantiles et calculer leurs durées de retour. D'une façon générale, le seuil de sécheresse est choisi selon la sévérité désirée puisqu'il n'existe pas de règle préalable. Si on considère, par exemple les quantiles, le seuil d'années sèches est observé en moyenne une fois tous les 2.5 ans et les très sèches tous les 5 ans. Ces seuils n'étant pas sévères, certains auteurs leur préfèrent les indices qui tiennent compte de la moyenne et de la variabilité relative (CV), ils présentent respectivement des durées de retour moyennes de 6 et 44ans.

$$X / \bar{X} = 1 - CV \text{ (année sèche)} \quad \text{et} \quad X / \bar{X} = -1 - 2CV \text{ (année très sèche)}$$

Si le premier indice exagère la fréquence d'apparition de ces années exceptionnelles, par rapport à l'observation, le deuxième donne par contre une probabilité d'occurrence trop faible, surtout pour les années très sèches. Nous préférons à partir de ces remarques considérer qu'une année est sèche ou très sèche lorsque les durées de retour respectives sont de 5 ans et 10 ans, elles correspondent aux probabilités de non dépassement de 80% et 90%. La recherche des années exceptionnelles, sèche (S) et très sèche (TS) va dépendre de la loi de probabilité qui ajuste les observations. Les seuils de sécheresse ont été déterminés en utilisant une loi normale qui ajuste bien les totaux annuels. On remarque que le plus grand nombre d'années sèches s'observe durant la décennie quarante et la décennie quatre vingt. Lorsqu'on passe aux scores (indices régionaux) la fréquence des années sèches devient nettement plus importante ; la différence entre les régions devient plus faible, elle est probablement due à l'atténuation des effets ponctuels puisque les indices synthétiques ou

scores représentent l'effet régional et intègrent plusieurs stations. Le déficit pluviométrique des années quarante est principalement du aux pluies de printemps par contre durant la récente sécheresse ce sont plutôt les pluies d'hiver qui sont à la baisse. L'année la plus sèche depuis 1930 est observée au début des années quatre vingt comme ce fut le cas pour plusieurs stations du Maghreb et du Sahel, elle possède une durée de retour moyenne de 50ans. La moyenne quinquennale 1981-1985 est également la plus basse depuis que les observations existent. On remarque que l'année la plus arrosée est bien plus exceptionnelle, et c'est plutôt la succession d'années sèches traduite par un cumul en déficit qui a rendu la situation alarmante dans ces régions. Grâce à des informations pluviométriques antérieures à 1930, à la station d'Oran Baudens (1887-1915) et d'Oran Port (1913-1954), l'Ouest Algérien a observé d'autres années de sécheresse comme celles de 1887 et 1913. Le tableau4 suivant donne le nombre de cas et le pourcentage des années sèches, normales et humides sur des périodes trentenaires dans la région Ouest.

Tableau 4 : nombre de cas et fréquence des différents types d'années à l'Ouest.

Périodes	année sèche	année normale	année humide
1879-1909	10 33.3%	8 26.7%	12 40.0%
1909-1939	9 30.0%	14 46.6%	7 23.3%
1939-1969	8 26.7%	11 36.7%	11 36.7%
1969-1999	16 53.3%	8 26.7%	6 20.0%

Durant les phases de sécheresse on observe généralement une augmentation de la température de l'air ; cette augmentation est bien remarquable durant la dernière sécheresse puisqu'une tendance à la hausse très nette apparaît aussi bien sur les températures maximales et minimales moyennes. La hausse de la température peut influencer sur l'accroissement de l'évapotranspiration donc sur le déficit hydrique du sol.

III - LA SECHERESSE ET LE PHENOMENE D'EL NINO

En Algérie, les tentatives de prévision saisonnière ont commencé ces dernières années, elles concernent principalement les précipitations. Les méthodes utilisées sont celles des analogues et de la régression multiple. Les données de la température de la surface de la mer, du géo potentiel et de la pression en surface, sur un domaine spatial assez vaste, sont prises comme prédicteurs. D'autres travaux ont mis en évidence le rôle de l'Oscillation Nord Atlantique sur la pluviométrie de l'Algérie.

La corrélation calculée entre l'indice d'oscillation austral (SOI) et les indices pluviométriques annuels sur l'ensemble des stations montre que l'ouest algérien est plus sensible aux répercussions du phénomène el niño (Fig3.)

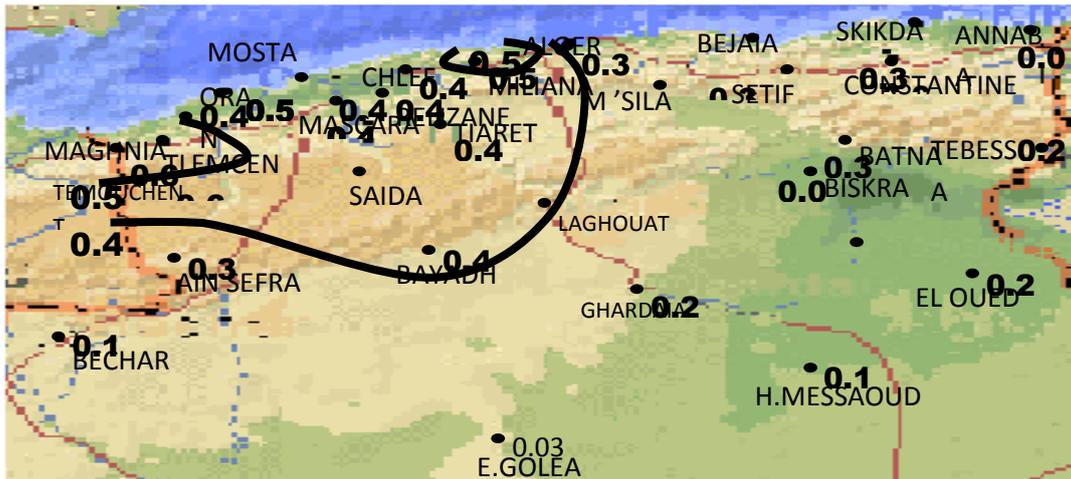


Fig. 3 Corrélation entre le SOI et les totaux pluviométriques aux différentes stations

IV - PLUVIOMETRIE DU FUTUR

Plusieurs modèles de circulation générale tentent de projeter la température et la pluviométrie des prochaines décennies suite à un accroissement de la concentration des gaz à effet de serre comme le gaz carbonique. Si la plupart des modèles convergent vers un accroissement de la température qui peut varier selon la latitude, pour la pluviométrie il existe une certaine divergence comme le montre les figures suivantes (Fig 4) qui donnent les tendances pluviométriques sur les décennies à venir sur notre pays. Les valeurs positives montrent un accroissement de la pluviométrie par contre les valeurs négatives donnent un déficit.

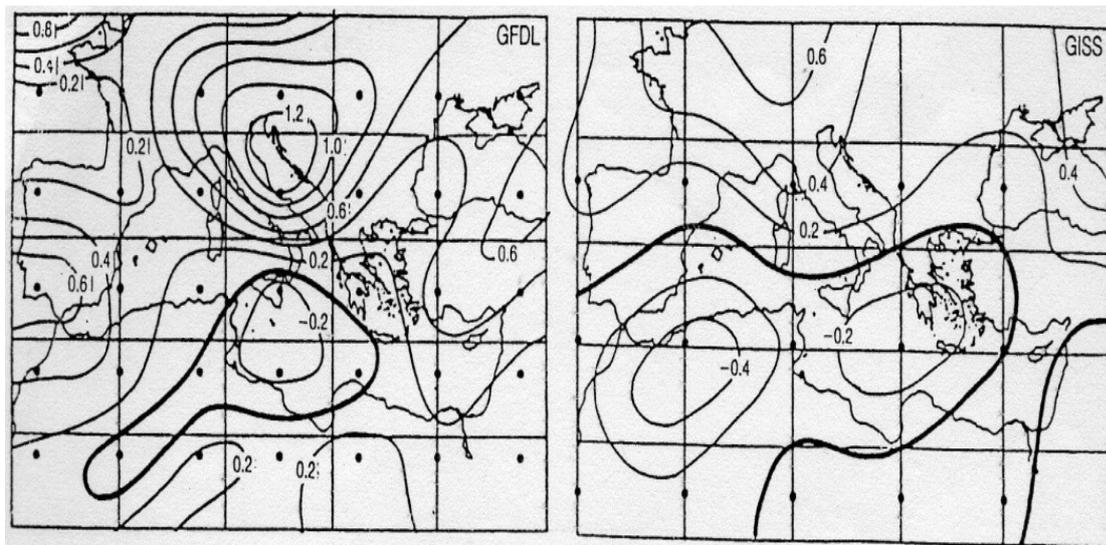


Fig. 4 exemple de sortie de modèle sur les tendances pluviométriques

V - ATTENUATION DES EFFETS DE LA SECHERESSE

Si la pluviométrie n'a pas été suffisante durant une année donnée mais qu'elle a été présente à des moments précis du cycle végétatif, comme par exemple lors de la formation de la graine, on enregistre généralement des rendements intéressants. La pluie provoquée est un des moyens qui peut déclencher l'apport nécessaire ou complémentaire durant une phase donnée. La région de Tiaret est une région à vocation céréalière, il est intéressant dans le cas d'années sèches d'apporter un complément pluviométrique, surtout durant le printemps, pour compenser le déficit hydrique observé. Le centre de physique de nuages de Tiaret a expérimenté l'ensemencement par iodure d'argent avec le concours de la météorologie Libyenne. Une zone test et une zone cible sont nécessaires pour le projet. D'après l'OMM il n'est pas prouvé que l'ensemencement des nuages contribue à une augmentation significative des précipitations

On peut citer également un projet plus ambitieux qui permettrait de contrecarrer d'éventuelles pénuries de la ressource en eau en complément aux ressources mobilisées par les barrages existants ou en construction. Pour l'Agence Nationale du Changement Climatique (ANCC) initiatrice du projet, ça consisterait de déverser une centaine de milliards d'eau douce (5 à 6%) du fleuve Congo par canal transsaharien dans le bassin de Melhir dans le sud-ouest algérien. Le projet permettrait également de freiner l'effet de la désertification vers le nord et aurait un impact climatique favorable pour la région

Pour minimiser les effets négatifs de la sécheresse à une échelle de temps plus courte, sur une région donnée, on peut définir la stratégie suivante pour conduire à une meilleure efficacité des actions de lutte par les structures de l'état. L'état doit également tenir compte des répercussions sociales sur les ouvriers agricoles qui risquent d'abandonner leur profession.

-un système d'évaluation à l'échelle spatiale.

- un système de suivi

-un système d'alerte précoce

- l'organisation de l'action d'urgence et plan d'aide à la population.

Le bénéfice de l'information météorologique et climatologique par un système de prévision et de prédétermination à moyen et à long terme n'est plus à démontrer.

VI - CONCLUSION

Parmi les calamités naturelles, la sécheresse est un fléau qui continue de faire beaucoup de victimes, particulièrement dans les pays en voie de développement. Sa définition présente tout de même une certaine ambiguïté et dépeint de la discipline. Même pour le climatologue qui compare un total pluviométrique par rapport à une valeur habituelle existe plusieurs indices. Il ressort que la fréquence de la sécheresse dans l'ouest algérien est plus importante durant les dernières, elle serait principalement due à une diminution des pluies d'hiver. Le phénomène d'El Nino explique en partie ce déficit surtout pour les années les plus sèches. La pluviométrie et à travers elle la sécheresse est en général un élément difficilement prévisible même pour de courtes échéances. Les prévisions saisonnières qui sont importantes pour la gestion de la ressource en eau et le suivi de la sécheresse sont encore au stade de la recherche. La création d'un lac d'eau douce à Melhir par canal transsaharien pourrait être une solution pour palier au déficit mais seul l'avenir nous renseignera sur l'efficacité de ce grand projet.

BIBLIOGRAPHIE

- BOUSID H., 1999. Le phénomène El Nino et ses conséquences sur l'Algérie. Mémoire d'ingénieur. IHFR, ORAN.
- LATROUS H., 1996. Contribution à l'explication de la sécheresse de l'ouest algérien. Mémoire d'ingénieur. IHFR, ORAN.
- MATARI A et DOUGUEDROIT A., 1995. Chronologie des précipitations et des sécheresses dans l'ouest algérien. 9^e conférence Afro asiatique sur l'irrigation et le drainage. Alger.
- MATARI A. et KERROUCHE M., 1998. Changement climatique. Cas de l'Algérie. Note Interne. IHFR ORAN
- RICARD J L., 1997. El Nino 1997-1998 vers un événement exceptionnel ?
Met Mar(117), pp. 28-32.
- THIRRIOT C et MATARI A . , 1989. Peut-on parler de sécheresse au Sahara ? La houille blanche, numéro spécial, sécheresse.
- MATARI A , 2008. Sécheresse et aridité a travers les données climatologiques. Colloque international sur l'aridoculture. CRSTRA, BISKRA.

LA DESERTIFICATION EN TANT QUE RISQUE MAJEUR

Ahmed Aidoud*

I. INTRODUCTION

La désertification est une crise de l'environnement et son caractère catastrophique et désastreux pour la société est indéniable. A la différence des risques au sens général (cf. exposé introductif d'Yvette Veyret), l'aléa ici se distingue par sa durée plus importante. Cependant, à l'échelle écologique, il a été montré en zone méditerranéenne que les changements occasionnés lors de la dégradation d'un écosystème peuvent être particulièrement rapides. A la différence des aléas localisés et limités dans le temps, la désertification sous climat aride présente le plus souvent une large étendue tant dans l'espace que dans le temps. Il s'agit d'une dynamique dans laquelle la trajectoire que suit un écosystème, peut traverser plusieurs seuils d'irréversibilité (cf. *infra*). Un état dégradé, s'il n'est pas stabilisé ou réparé, est lui-même soumis aux mêmes risques (voire plus graves) que dans la situation préexistante compte tenu de la fragilité souvent plus importante d'un stade dégradé. Ainsi, l'application d'un "remède" visant la régénération du système devient elle-même une action de prévention vis-à-vis d'une aggravation de la dégradation.

La désertification n'est donc pas un phénomène récurrent comme des inondations mais une évolution en spirale parsemée de crises aggravantes (sécheresse, surexploitation...), évolution au cours de laquelle l'état de santé (ou intégrité du système) se dégrade progressivement s'il n'est pas mis fin aux causes.

Comme décrit par de nombreux auteurs, la désertification est un phénomène complexe mettant en interaction un grand nombre de facteurs qui peuvent être naturels ou anthropiques, mais à chaque fois différents.

Pour y remédier, comme en médecine, lorsque les causes du mal sont peu ou pas du tout, connues, il faut placer le patient sous **surveillance**. Cette surveillance (ou monitoring) des écosystèmes, devenue un volet important de l'écologie, est réalisée en stations permanentes à partir desquelles les résultats d'observation et d'expérimentation, sont extrapolés aux systèmes analogues. Il s'agit de suivre un système dans différentes conditions et donc dans différents états.

Un deuxième volet important est celui de l'**évaluation** qui se doit d'intégrer à la fois cette variabilité d'états et l'ensemble des composants pouvant expliquer l'état actuel du système. Il s'agit ici d'identifier l'enveloppe ou domaine de résilience dans lequel le système peut absorber certaines perturbations qu'il s'agit également de reconnaître.

Le but final est celui des **remèdes** qui regroupent toutes opérations ayant pour objectif la durabilité du système, sa restauration s'il est dégradé ou sa transformation. Toutes ces opérations relèvent de ce qui est devenu l'ingénierie écologique, un autre domaine crucial de l'écologie.

Dans cet exposé, ces différents paradigmes, retenus pour leur intérêt appliqué et pratique, seront passés en revue en prenant comme repère et illustration, l'exemple des écosystèmes steppiques.

II. DEFINITION ET IMPACTS

La convention des Nations Unies¹ (UNCCD) définit la désertification comme "la *dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines*". Cette définition rendue "officielle" par le cadre dans lequel elle a été émise, est actuellement citée par la plupart des auteurs, marquant par là un arrêt à la pléthore de définitions apparues depuis les années 1970. La multitude de définitions reflète l'extraordinaire complexité du phénomène à la mesure de celle de ses causes, de ses mécanismes et de ses effets.

L'exemple de désertification qui sera pris ici, est celui des steppes du Sud-Oranais, représentées par celles des wilayates de Saïda, de Naama et d'El Bayadh qui couvrent environ 5 millions d'ha au Nord de l'Atlas Saharien. Elles ont subi une dégradation intense et rapide depuis le milieu des années 1980. Cette dégradation a été suivie dans les conditions de milieu et de végétation les plus représentatives.

La désertification a intéressé directement ou indirectement le couvert végétal ou la phytomasse, l'offre fourragère, la biodiversité, le sol et les pratiques d'élevage. Retenons les phénomènes les plus significatifs :

- La **phytomasse** végétale des plantes pérennes est passée, dans les steppes denses d'alfa (fig.1a) par exemple, de près de 10 tonnes MS par hectare à moins de 100 kg.MS/ha de 1980 à nos jours. La phytomasse, comprenant les parties verte et sèche (nécromasse), est un élément essentiel dans la rétention de l'eau dans le système et dans la protection du sol contre l'érosion et la dégradation.



Fig. 1a. Steppe d'Alfa (*Stipa tenacissima* L.) au lieu dit Plateau de Rogassa (Nord d'El Bayadh). Photo J. Touffet, 1976



Fig. 1b. La même steppe après dégradation par surpâturage (1986). Les touffes d'alfa ne vont pas tarder à être déchaussées jusqu'au rhizome, signe d'irréversibilité du dépérissement. Photo A. Aidoud, 1984

¹ Convention internationale sur la lutte contre la désertification dans les pays gravement touchés par la sécheresse et/ou la désertification, en particulier en Afrique.
<http://www.unccd.int/convention/text/pdf/conv-fre.pdf>



Fig. 1c. Ancienne steppe d'alfa (Sud de Bougtob) durant une année sèche. En année humide, la production peut être significative mais n'est assurée que par des espèces annuelles (ou thérophytes) souvent durant une courte période de l'année. A la différence de la fig. 1a, le sol n'est pas protégé contre l'érosion surtout durant les périodes de sécheresse. Photo A. Aidoud, 1986

- L'**offre fourragère** est déterminée par la **production primaire** qui doit d'une part, renouveler annuellement une certaine proportion de la phytomasse sur pied et de l'autre, fournir la part exploitable par les herbivores. Cette production est intimement liée à la variation inter-annuelle de la pluviométrie quand cette dernière est seule ou principale source d'humidité. L'on comprend donc que le prélèvement de matière végétale doit veiller à l'équilibre entre reproduction et exploitation de la phytomasse. A titre d'exemple, la steppe précédente (Rogassa), malgré sa densité, produisait initialement, moins de 500 kg.MS/ha/an (**productivité primaire** annuelle moyenne) avec une grande variabilité interannuelle (*cf infra*). Cette quantité ne doit pas être confondue avec la "production" attribuée au prélèvement d'alfa pour l'industrie papetière qui pouvait atteindre une tonne de matière verte par hectare, et qui, de ce fait, devait être considérée comme une surexploitation par rapport à la production biologique réelle. La quantité de fourrage qui pouvait être extraite de la production initiale était de 140 UF/ha/an. Avec la dégradation, fait important, la baisse de la production primaire n'est pratiquement pas détectable durant les premiers stades de la dégradation ; ceci en raison de processus de compensation (voir par exemple la théorie dite de la perturbation intermédiaire de Grime) qui peut même "améliorer" la production. Avec l'accentuation de la dégradation, elle finit par s'effondrer mais avec une plus grande variabilité interannuelle due à la dominance des annuelles. Elle est évaluée actuellement, dans cette même steppe, de 20 à 60 UF/ha/an mais avec variabilité saisonnière nettement plus élevée qu'initialement. Soulignons qu'avec une telle variabilité croissante, la moyenne perd toute signification dans une optique de planification de gestion.
- La **biodiversité** est modifiée par les changements de milieu. Avec la dégradation du système préexistant, des dizaines d'espèces végétales ont disparu localement. Elles ont été certes remplacées, mais par une flore "banalisée" à large spectre écologique comprenant des plantes dont l'installation est favorisée par la dégradation, soit directement (plantes liées aux activités humaines, espèces synanthropes) soit indirectement (plantes favorisées par les changements de milieu, comme l'ensablement de surface, induits par ces activités). A titre d'exemple, dans la steppe d'alfa du plateau de Rogassa dans le Sud-Oranais, un certain nombre d'espèces "inféodées à l'alfa" et indicatrices écologiques comme *Sedum sediforme*, *Xeranthemum inapertum*, *Scabiosa stellata* ont disparu ont été remplacées par *Hordeum murinum*, *Echinops spinosus*, *Peganum harmala*... que l'on retrouve dans des conditions variées et la plupart du temps dégradées.

- **Dégradation du sol** : la régression du couvert des plantes pérennes est suivie par la dégradation du sol, essentiellement par **érosion** des particules fines (constituants essentiels du complexe argilo-humique) et par diminution de la restitution de matière organique au sol (minéralisation et humification). Ainsi, en une dizaine d'années, le sol de la steppe citée précédemment a enregistré une perte de près de 50% de la matière organique dans l'horizon de surface.
- Les **pratiques d'élevage** traditionnelles initiales dans les steppes, étaient adaptées aux conditions écologiques générales. Dans le Sud-Oranais, ces pratiques étaient par exemple caractérisées par la dominance, dans les troupeaux ovins, de la race "Hamra" bien adaptée à ce milieu et sa végétation dont l'offre fourragère répondait à la majeure partie (plus de 70%) des besoins énergétiques des troupeaux. La régression de cette offre naturelle a déterminé celle de cette race. De plus la généralisation progressive de l'alimentation concentrée a favorisé les races rentabilisant mieux cette nouveau mode de gestion. La race dominante actuellement est la "Berguia" venant de l'Est et plus ou moins apparentée à la "Ouled Djellal".



Fig. 2. La race Hamra autrefois typique des steppes du Sud-Oranais (photo A. Aidoud, 1978)

Bien que les situations peuvent changer d'une région à l'autre en fonction des conditions écologiques locales et l'histoire des usages, les changements exposés ici, (mais non exhaustifs), sont des exemples qui ont été retenus comme les plus marquants et les plus généralisables dans le paysage pastoral steppique.

Afin de répondre à l'objectif de l'atelier ainsi qu'à celui du CRSTRA dans le domaine de la lutte contre la désertification des steppes, deux activités essentielles ont été retenues, parmi les plus recommandées : la surveillance à long terme des écosystèmes et l'évaluation de leur état de santé ou d'intégrité. Ce sont là deux problématiques fondamentales posées à la fois aux scientifiques et aux gestionnaires.

III. SURVEILLANCE ECOLOGIQUE A LONG TERME (SELT)

Sous climat aride, la dynamique des écosystèmes comprend les changements à long-terme et les variations interannuelles à court et moyen termes. Ces deux dynamiques correspondent à deux échelles de temps emboîtés et ce qui est en général perceptible, ce sont surtout les variations à court ou moyen terme dont par exemple, les plus marquantes sont celles de la pluviosité. Les changements modifiant profondément l'écosystème aux plans structurel et fonctionnel (on parle alors de succession) se font à long terme et sont plus difficiles à déceler. C'est comme un coureur dont on ne voit bouger que la tête dans un écran, on ne peut affirmer avec certitude s'il se déplace (changement à long terme) ou s'il fait du "sur-place" (variations ou fluctuations réversibles).

Les perturbations, telles que les sécheresses plus ou moins longues et plus ou moins sévères, ont les effets directs ou indirects qui laissent une trace plus ou moins irréversible ou indélébile dans l'écosystème. L'addition des effets des perturbations donne lieu à des changements plus profonds mais qui demeurent longtemps imperceptibles, ce qui a été décrit comme le « présent invisible ».

Les perturbations, d'origine naturelle ou anthropique, sont des événements imprédictibles et leur étude apparaît comme indispensable en vue de déceler et de prédire les changements à long terme. Analyser une seule perturbation est insuffisant en raison des possibles interactions complexes (positives ou négatives) qu'elle peut avoir avec d'autres perturbations non étudiées (e.g. le surpâturage ne peut être séparé de la sécheresse, l'ensablement, les changements d'usage...). Pour faire face à cette complexité, la prise en compte de la résultante ou « somme » d'un ensemble de perturbations (ou régime de perturbations), seule peut expliquer et faire la part des caractéristiques spatio-temporelles des perturbations, comprenant l'étendue, la forme, la fréquence, la périodicité, l'intensité de ces perturbations et de leurs effets. La connaissance de l'ensemble du régime de perturbation peut aider à comprendre un résultat qui peut paraître *a priori* paradoxal par rapport aux connaissances disponibles. A titre d'exemple, la dégradation voire l'extinction de l'alfa par surpâturage dans une grande partie des Hautes plaines du Sud-Oranais peut surprendre car l'espèce est connue pour ses faibles appétibilité et valeur fourragère. Seuls les résultats de la SELT, en stations permanentes, ont permis de démontrer ces phénomènes et de lever les doutes.

La SELT, plus particulièrement en réseau, est le moyen de mener de telles études pour comprendre une dynamique liée aux perturbations sur le long terme et la situer dans un contexte spatial et temporel plus large. Dans ce cas seulement, la SELT, comme la surveillance météorologique, serait capable d'émettre des signaux ou indicateurs d'alerte précoce.

Différents types de perturbations et à différentes échelles spatio-temporelles.

La surveillance à long terme est un suivi dans le temps par observations régulières en vue :

- d'explorer les changements ou variations pouvant avoir lieu sans prédire de ce qui va être obtenu ;
- de vérifier l'étendue de la variabilité et l'importance de certains paramètres particuliers ;
- de vérifier la conformité de l'évolution de certains paramètres par rapport à des références, standards ou modèles théoriques retenus dans une hypothèse de départ.

Dans ces objectifs qui sont complémentaires, l'accent peut être mis plus sur l'exploration dans les deux premiers et/ou sur l'expérimentation dans le troisième.

Dans le cas des steppes des Hautes Plaines, la variabilité interannuelle des ressources, à commencer par l'eau de pluie, et la faible maîtrise des ressources biotiques et abiotiques (systèmes peu artificialisés) font que toute surveillance doit, d'une part être conçue à long terme afin d'intégrer la variabilité et d'autre part intégrer le plus possible les objectifs à la fois exploratoire et expérimental. Dans l'exemple présenté, pratiquement aucune information n'était disponible au départ, sur le fonctionnement de ce type d'écosystème. Dans les steppes du Sud-Oranais, dans le cadre de la SELT les questions posées vis-à-vis de la production primaire ont été les suivantes :

- quelles variations peut-on observer dans la composition de l'écosystème considéré? (exploration)
- quelle est l'étendue de la variabilité interannuelle de la production primaire, compte tenu de notre objectif qui était l'évaluation des ressources fourragères?
- partant de l'hypothèse que c'est la pluie qui constitue le facteur primordial dans le fonctionnement de cet écosystème, deux questions liées : (1) quelle est son importance sur la production? (expérimentation) et (2) est ce que cette importance est conforme aux modèles existants? (vérification)

Il est évident que d'autres questions pouvaient être posées et dont les réponses pourraient être plus ou moins difficiles à apporter.

Dans la SELT, un élément important est le dispositif d'observation qui doit être à la fois fiable et pérenne. Ce dispositif doit permettre de fournir les informations sur l'évolution des paramètres étudiés sur le long terme et de façon fiable compte tenu des changements pouvant survenir. La pérennité du dispositif correspond au maintien de sa pertinence vis-à-vis du paramètre mesuré ainsi que la validité statistique de variations observées de ce paramètre.

Par exemple, d'après ce qui précède, l'objectif est la mesure de la production primaire. En milieu steppique, comme en milieu prairial, la production peut être valablement évaluée à partir du suivi saisonnier de la phytomasse. Pour cela :

- la végétation doit être coupée (technique destructive), pesée et séchée à 65°C afin d'homogénéiser les résultats ;
- la végétation doit être triée par espèce et celle, pérenne, doit être triée par organe et selon l'état du matériel végétal afin de distinguer la matière verte (biomasse) de la matière sèche (nécromasse) ;
- l'hétérogénéité du terrain doit être prise en compte par l'utilisation de placettes suffisamment grandes qui doivent être :
 - o clôturées pour éliminer le prélèvement par pâturage durant l'année d'observation ;
 - o disposées de façon à prendre en compte les variations terrain (e.g. dispositif en carré latin) afin de minimiser l'hétérogénéité par rapport à la variation dans le temps.
- la pluviométrie, au moins, doit être mesurée localement en maintenant en permanence un appareillage simple afin d'éviter les données manquantes suite aux pannes...

Les figures 2 à 5 illustrent quelques résultats de la surveillance sur 11 années dans les steppes du Sud-Oranais

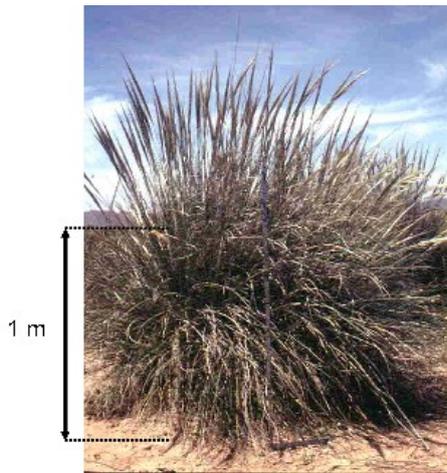


Fig. 2. Alfa (*Stipa tenacissima* L.) plante emblématique des steppes qui formait des "nappes" homogènes ayant pratiquement disparu dans les Hautes plaines d'Algérie. La densité des inflorescences témoigne de la qualité de l'année (photo A. Aidoud 1980).

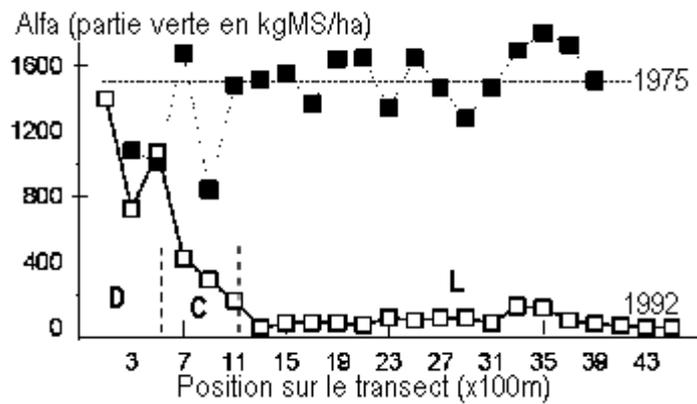


Fig.3. Distribution de la biomasse d'alfa dans le site de Rogassa en 1975 et en 1992. Cette approche ne correspond pas exactement à une surveillance mais plutôt à une comparaison diachronique qui permet de connaître l'étendue du changement par rapport à un état initial. Les mesures ont été réalisées le long d'un transect traversant une parcelle mise en défens (D), une zone de contrôle (C avec une charge de 0.25 unité ovine par ha) et la steppe librement pâturée (L) où la charge a été évaluée à 0.5 à 0.75 uo/ha par enquête en 1990. Voir détail Aidoud et Touffet, 1996 : http://www.john-libbey-eurotext.fr/fr/revues/agro_biotech/sec/e-docs/00/04/21/B9/article.phtml

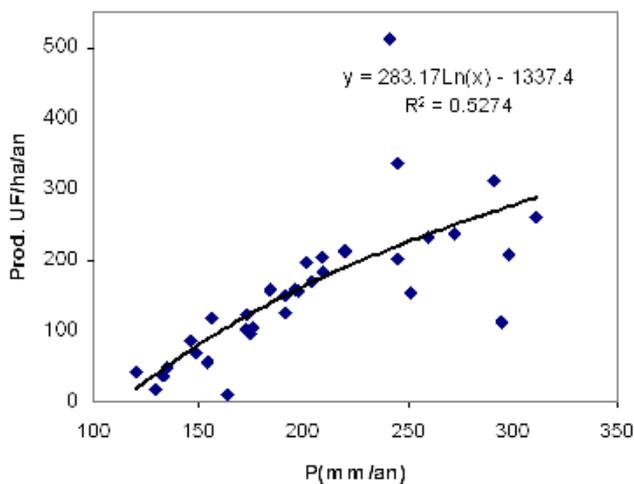


Figure 4. Relation entre l'offre fourragère et la pluviométrie annuelle dans les steppes du Sud-Oranais (Aidoud, 1989).

1 UF = 1 Unité Fourragère = équivalent énergétique de 1 kg d'orge (1650 kCal pour les ruminants).

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

Les mesures ont été réalisées en conditions contrôlées (charge de 1 unité ovine pour 4 ha et soustrait au pâturage durant l'année de mesure). Durant les années sèches ($P < 200$ mm), la relation est nettement plus significative. Durant les années humides, la relation dépend de la répartition saisonnière des pluies, de l'efficacité biotique des différentes espèces ou groupes d'espèces constituant la communauté.

Un tel dispositif très lourd de départ, pour la mesure de la productivité, peut difficilement être maintenu à long terme et devrait donc être simplifié ou remplacé par une technique non destructive utilisant des paramètres de substitution (approche allométrique). Dans ce cas ces paramètres allométriques doivent être mis en corrélation avec le paramètre mesuré durant une période suffisamment longue pour vérifier leur capacité à remplacer valablement le paramètre étudié lui-même.

Le paramètre le plus utilisé dans la végétation steppique est par exemple la fréquence spécifique évaluée par points le long d'une ligne (technique linéaire). Une corrélation significative est en général obtenue entre de telles fréquences et la phytomasse, elle-même corrélée significativement à la productivité. Ainsi, l'évaluation par les fréquences spécifiques (non destructive), peut à terme valablement remplacer celle par mesure de biomasse (destructive) nettement plus coûteuse en temps.

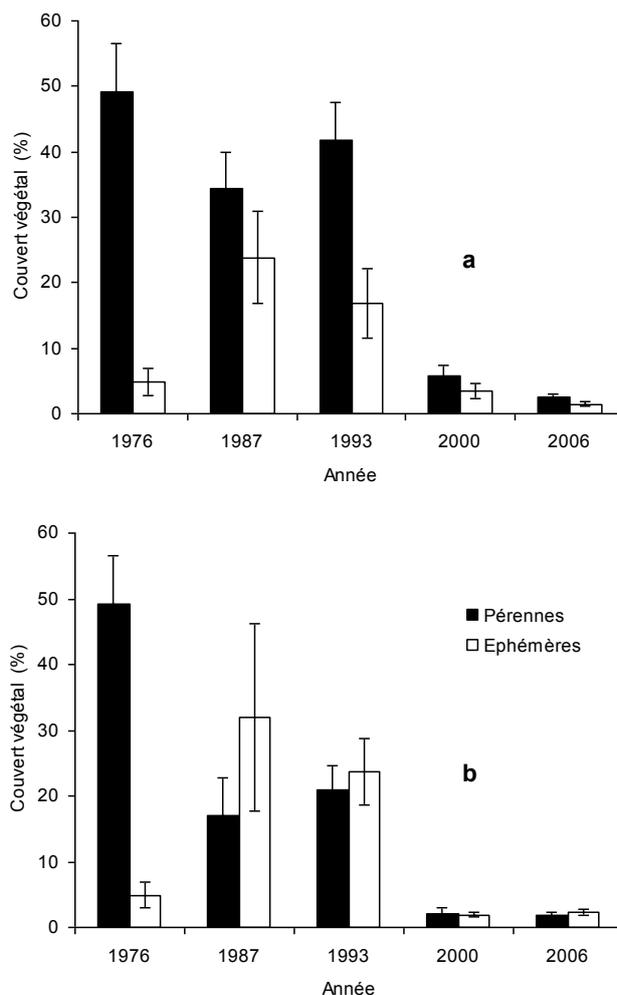


Figure 5. Evolution du couvert végétal dans la steppe d'alfa (Rogassa, Sud-Oranais) entre 1976 et 2006.

5 années représentatives ont été choisies pour illustrer cette évolution à l'intérieur (a) et à l'extérieur (b) d'une parcelle mise en défens. Partant d'une situation identique en 1976, le couvert a beaucoup baissé et les plantes éphémères (annuelles et petites vivaces) deviennent très vite dominantes à l'extérieur (zone pâturée). Cette dominance des annuelles indique une dégradation et une augmentation de la variabilité de l'offre fourragère. Dans la mise en défens, le couvert végétal diminue et devient équivalent à celui de l'extérieur en 2006 ce qui s'explique par la disparition de l'alfa essentiellement par changement édaphique dû à l'ensablement de la parcelle protégée. Cette nappe d'alfa homogène, parmi les plus denses au Maghreb et couvrant en 1976 près de 30000 ha (plateau de Rogassa) a complètement disparu. Le sol dégradé, est surmonté d'un voile sableux sur pratiquement toute sa surface (cf fig. 6).

Tableau 1. Evolution des données édaphiques dans la steppe d'alfa du Plateau de Rogassa. Pour 1976, sont données les moyennes obtenues dans plusieurs échantillons réalisés à travers le plateau. De 1993 à 2006, l'échantillonnage a été réalisé sur un transect (b pâturé à surpâturé) voisin de la parcelle mise en défens (a). L'ensablement de surface, nul au départ, progresse plus vite dans la steppe pâturée mais gagne la parcelle mise en défens qui devient un "piège" à sable. Ces conditions, ajoutées à la sécheresse persistante jusqu'à 2005, rend le sol incapable de supporter le système préexistant. Dans le terrain pâturé, toutes les variations sont hautement significatives ($p < 0.01$) en particulier pour la diminution de la matière organique et des argiles.

	1976	1993	2000	2006	p
a: intérieur de la mise en défens					
Voile sableux de surface (%)	0	0	76.4 ± 9.0	78.4 ± 4.5	< 0.001
Sable textural (%)	66.0 ± 3.8	59.4 ± 4.6	69.2 ± 5.5	67.7 ± 7.8	0.116
Argile (%)	12.9 ± 1.4	13.4 ± 2.4	12.0 ± 5.9	10.5 ± 2.9	0.566
Matière organique du sol (%)	1.8 ± 0.5	1.7 ± 0.2	1.4 ± 0.2	1.4 ± 0.4	0.599
b : extérieur de la mise en défens					
Voile sableux de surface (%)	0	39.3 ± 10.8	84.1 ± 3.8	76.2 ± 2.7	< 0.001
Sable textural (%)	66.0 ± 3.8	79.0 ± 3.1	80.6 ± 6.6	82.1 ± 10.2	0.002
Argile (%)	12.9 ± 1.4	6.4 ± 1.1	6.5 ± 2.1	5.5 ± 4.6	< 0.001
Matière organique du sol (%)	1.8 ± 0.5	1.0 ± 0.1	0.7 ± 0.1	0.7 ± 0.3	< 0.001

IV. REMEDES

Vis-à-vis d'une catastrophe au sens général du terme, les remèdes correspondent à la période de "retour d'expérience" qui suit le moment d'occurrence de cette catastrophe. Dans le cas de la désertification, le remède devient lui-même une action de prévention afin d'éviter une aggravation de l'aléa dont le risque est omniprésent.

Ce remède relève de l'écologie de la restauration qui prévoit trois actions (les trois R) fondamentales (fig. 7) :

- la **Restauration** qui comporte :
 - o la restauration (*sensu-stricto*) qui correspond au rétablissement de la biodiversité, de la structure et du fonctionnement d'un écosystème résilient (i.e. qui n'a pas subi une dégradation irréversible).
 - o la restauration (*sensu-lato*) qui a pour objectif de stopper la dégradation et de placer l'écosystème sur une trajectoire dynamique correspondant à ses potentialités (capacité de résilience). C'est une fonction, ou plusieurs, que l'on cherche à restaurer et non la structure (composition).
- la **Réhabilitation** est une intervention humaine intense pour replacer le système dans une trajectoire favorable.
- la **Réaffectation** est intervention humaine intense pour transformer le système en vue d'un nouvel usage.

L'étendue des steppes dégradées voire désertifiées des parcours pastoraux des Hautes Plaines en Algérie est telle que des travaux de réhabilitation ou de réaffectation, faisant appel à une intervention humaine forte et coûteuse, seraient difficilement envisageables sur toute la surface de ces steppes. Une alternative serait la restauration passive qui consiste à éliminer le facteur qui empêche la régénération de la végétation, ce qui peut permettre, selon les cas, la restauration de la composition et des fonctions (restauration *s.s.*) ou simplement des fonctions du système (restauration *s.l.*). Cette approche est engagée actuellement dans le cadre d'un vaste programme du haut commissariat au développement de la steppe (HCDS).

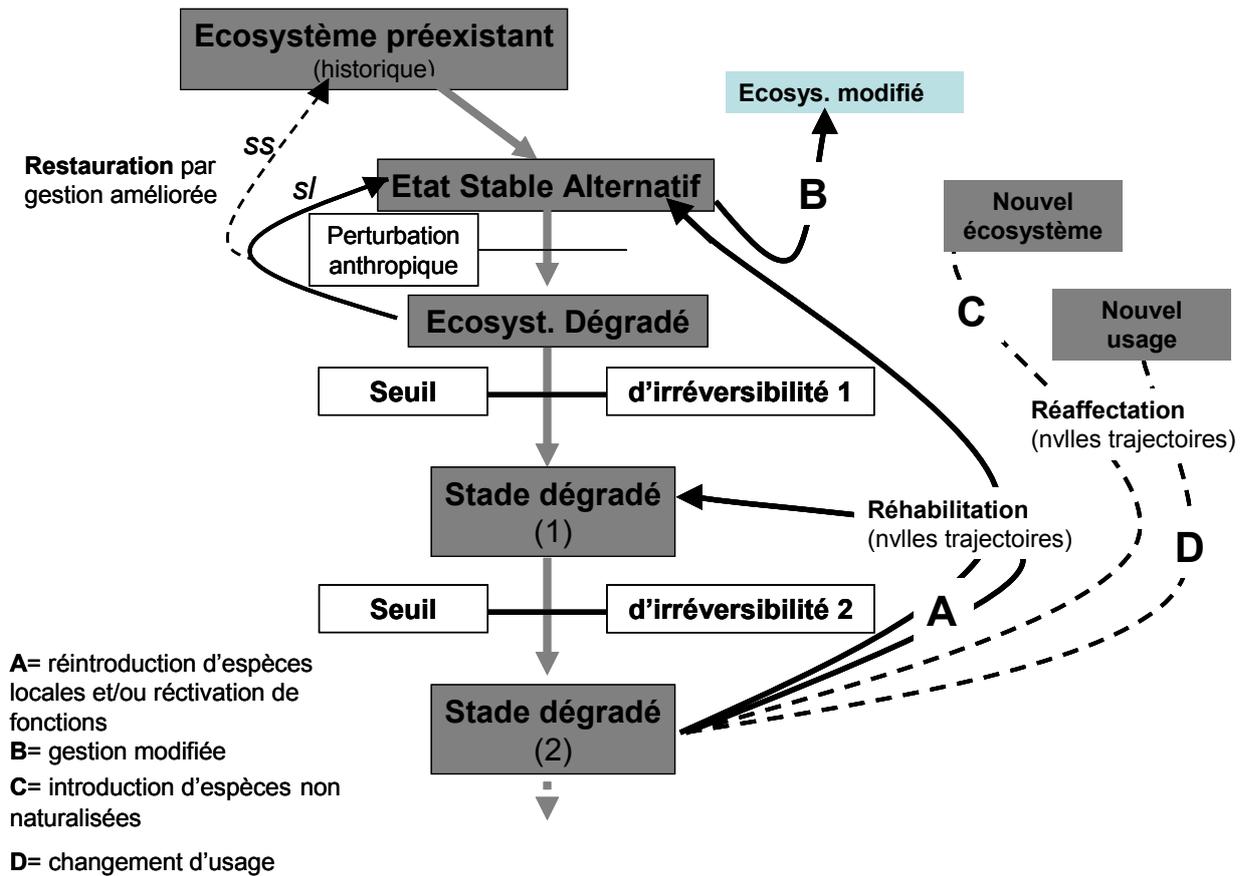


Figure 7. Schéma représentant les différentes actions possibles en vue de restaurer, réhabiliter ou réaffecter un écosystème selon sa position dans une dynamique régressive.

Ces actions s'inscrivent elles-mêmes de l'ingénierie écologique (IE) qui se définit comme la conception de systèmes durables dont la structure et le fonctionnement sont en cohérence avec les principes écologiques (Mitsch and Bergen et al., 1997). Les objectifs de l'IE sont de fournir les moyens techniques pour :

- **gérer durablement un écosystème** : il s'agit de mesures de gestion qui permettent de maintenir le système à son état actuel ou de l'améliorer par une intervention légère (restauration ss ou sl) : par exemple, dans le cadre d'un parcours pastoral, la mise au repos, le contrôle de la charge animale...
- **régénérer un écosystème dégradé** par une intervention soutenue par des techniques permettant l'amélioration du fonctionnement de l'écosystème : plantations d'espèces, aménagements contre l'érosion ou pour une meilleure rétention de l'eau de ruissellement...
- **modifier profondément le système** par intervention lourde dans le cas d'écosystèmes très dégradés ou pour l'améliorer significativement (plantations, amendements, irrigation...)

Dans les deux derniers points, nous retrouvons respectivement la réhabilitation et la réaffectation prévues dans l'écologie de la restauration. L'ingénierie écologique est une discipline jeune qui, dans sa définition, recouvre la notion de restauration.

Les principes de l'ingénierie écologique (IE) peuvent se résumer comme suit :

- 1- L'IE intervient comme "un générateur de choix de système et un facilitateur de la mise en relation du milieu avec l'écosystème; la nature fait le reste", ce qui met en jeu l'auto-organisation de l'écosystème via ses capacités de résilience et de résistance.
- 2- La conception doit être réalisée à une échelle "locale" afin de mieux répondre à la variabilité spatiale et de mieux maîtriser a) la connaissance accumulée sur le site b) les possibilités d'auto-organisation du système c) les potentialités du milieu que le système peut exploiter.
- 3- Le maintien de l'indépendance des besoins fonctionnels en leur gardant des niveaux de "tolérance" les plus larges possibles afin de faire face à la complexité écologique et donc à l'incertitude, souvent irréductible, à l'IE.
- 4- Veiller à l'économie d'énergie et d'information dans la conception, autrement dit tirer un maximum d'avantage de la capacité auto-organisationnelle de l'écosystème: optimisation du flux naturel d'énergie dans le système afin de minimiser l'énergie ajoutée par l'IE (*cf. Odum*).
- 5- Le respect des valeurs et des objectifs qui motivent l'IE principes d'éthique qui doivent guider toute application de résultats de recherche scientifique, en veillant à mesurer ses certitudes. Car *une certitude mal placée est la pire forme de l'ignorance* (Costanza, 1996)

Pour prescrire des remèdes à toute pathologie, il est nécessaire de la diagnostiquer avec un minimum d'incertitude, d'où la nécessité de procédures d'évaluation.

V. EVALUATION DES ECOSYSTEMES

Les écosystèmes sont capables de réaliser des fonctions d'importance pour leur persistance ainsi que pour les besoins de l'homme qui se doit tout en tirant profit des services offerts par ces écosystèmes, de veiller à la durabilité de leurs ressources. Plus que pour d'autres écosystèmes, les steppes arides ont été depuis longtemps exploitées comme des systèmes "miniers" sans restitution. Les dégradations ont altéré les fonctions de la plupart des de ces systèmes. L'attention de plus en plus grande portée à la dégradation et à la désertification de ces systèmes a révélé tout le retard accumulé en matière de connaissance concernant diverses caractéristiques fonctionnelles qui sont à la base de leur gestion durable. C'est dire toute l'importance des outils diagnostics pour l'évaluation de l'état de "santé" de ces systèmes, d'où la nécessité de s'appuyer sur des connaissances fiables mais également disponibles.

Dans une section précédente, il a été question de paramètres de remplacement ou de substitution permettant d'évaluer un phénomène sans avoir recours à des mesures longues et fastidieuses. Il s'agit là du premier principe fondamental de l'"indicateur". Les indicateurs sont très utiles dans l'évaluation des écosystèmes, évaluation nécessaire pour toute opération de

gestion : aménagement, contrôle de production... Les connaissances pluridisciplinaires accumulées sur un site donné (SELT ou autre) peuvent être exprimées sous forme d'indicateurs de performances fonctionnelles.

Dans divers systèmes à travers le monde (e.g. écosystèmes humides), les méthodes d'évaluation ont été organisées sous forme de procédures. Une procédure d'évaluation fonctionnelle (PEF) est ainsi basée sur :

- les fonctions qu'un écosystème est susceptible de réaliser. L'évaluation détaillée des fonctions est une activité longue et coûteuse, mais les pressions sur les écosystèmes sont telles que des décisions de gestion doivent être prises dans des délais souvent courts, eu égard à l'urgence des actions à entreprendre ainsi qu'à la durée de réalisation des fonctions elles-mêmes ;
- la nécessité que ces procédures (PEF) puissent être employées à la fois par des experts et par des non-experts et que l'évaluation puisse être réalisée dans un laps de temps relativement court. Cet objectif devrait être atteint par l'identification d'indicateurs prédictifs efficaces, autrement dit des indicateurs qui peuvent renseigner les fonctions sans passer par une investigation détaillée ;
- la nécessité d'une recherche d'outils en vue d'aider à prendre des décisions appropriées pour la gestion et la protection des écosystèmes. Les PEF, via les fonctions qu'elles évaluent, constituent une base extrêmement utile pour l'appréciation des services offerts par l'écosystème considéré.

Les principes généraux des procédures peuvent être résumés comme suit. Les connaissances acquises sur les structures et le fonctionnement des écosystèmes steppiques fournissent les éléments pouvant diagnostiquer l'état de "santé" d'un système. Connaissant les caractéristiques principales :

- climatiques (moyennes et récentes)
- topographiques et géomorphologiques ;
- édaphiques (principaux caractères) ;
- type de végétation ou habitat ;
- données sur le couvert végétal (distinguer pérennes et éphémères) ;
- pressions anthropiques via les usages : pâturage extensif, agriculture...

Il est possible de les combiner afin de renseigner les différentes fonctions comme la fertilité du sol, la productivité primaire ou la biodiversité.

Chaque fonction peut être subdivisée en processus. Par exemple la fonction biodiversité est subdivisée en plusieurs processus décrivant chacun les conditions plus ou moins favorables à l'installation d'espèces végétales ou animales et d'habitats particuliers.

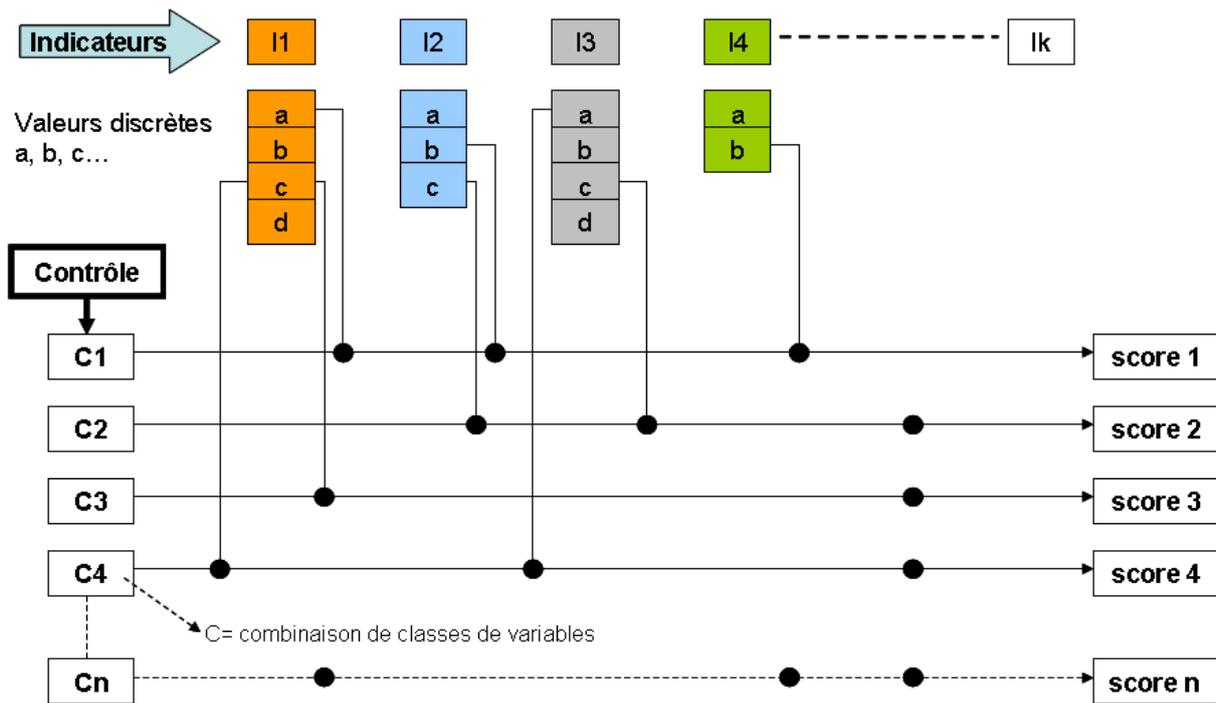


Figure 6. Schéma montrant le principe d'organisation de procédures d'évaluation fonctionnelle. Les k indicateurs sont subdivisés, chacun en un certain nombre de classes (a, b, c...) d'intensité. La procédure, pour un processus donné, passe par une combinaison de classes d'indicateurs qui permet d'attribuer un score à un processus donné dans une unité donnée.

Soit par exemple une unité homogène steppique sur glacis avec un sol de 30 cm de profondeur (indicateur 1), de texture sablo-limoneuse (ind. 2), avec un taux de MO de 2.5% (ind. 3). Ce sont là des indicateurs d'une steppe en "bonne santé". Il est parfois suffisant d'examiner simplement le type de végétaux à travers la liste d'espèces ou même les traits des plantes (groupe fonctionnel) pour avancer un tel diagnostic.

La désertification est un risque majeur mais dont l'aléa est plus sournois. Il est souvent découvert une fois qu'il est presque trop tard. "Le pâturage non contrôlé est pour la végétation steppique ce qu'est le feu pour une maison en bois", c'est l'image donnée par un éleveur pour décrire la désertification par surpâturage.

Il est certain que les écosystèmes steppiques souffrent d'une part d'un manque de connaissances précises sur les fonctions fondamentales et d'autre part des changements profonds qu'ils ont subis durant les dernières décennies. Il est néanmoins urgent d'engager des actions et des recherches pour une gestion durable sans attendre les connaissances précises. Il s'agit dans un premier temps de capitaliser ce qui existe comme connaissances et de l'utiliser comme un "kit" minimum pour l'évaluation de l'état de santé des écosystèmes steppiques en vue de développer des procédures d'évaluation et des techniques de restauration à la mesure de ces connaissances.

TEMPETES DE POUSSIERE ET DESERTIFICATION

Kevin White¹ and Nick Drake²

¹ *Department of Geography, The University of Reading, UK, email k.h.white@reading.ac.uk*

² *Department of Geography, King's College London, Strand, London WC2R 2LS, UK, email nick.drake@kcl.ac.uk*

ABSTRACT

Airborne dust creates hazards both locally, affecting transport and human health, and also globally, due to uncertainties over its role in radiative forcing of climate. There is also concern that high atmospheric dust loadings can suppress rainfall, resulting in a positive feedback process to intensify aridity in dust-producing areas. In order to improve our understanding of the scale of the hazard posed by dust in the atmosphere, we need a better knowledge of sources and transport processes. Satellite remote sensing is now widely used to monitor dust transport in the atmosphere. This paper reviews the main remote sensing techniques for monitoring atmospheric dust and summarises recent findings about the main dust sources in North Africa.

Key words: *Dust, Desertification, Remote Sensing, Hazards*

INTRODUCTION

Dust can be defined as mineral particles with diameters less than 500 micrometers, transported in suspension by turbulent air movements (Livingstone and Warren, 1996). The erosion, transport and deposition of this material creates hazards when it affects human activities. These are manifested at different scales. Locally, dust storms result in low visibility, creating hazards for road and air transport (Buritt and Hyers, 1981). There are also health concerns about the effects of airborne dust (Wheaton, 1992; Leathers, 1981) and the severe environmental impact of dust erosion became evident in the United States following the 'dust-bowl' years of the late 1930's in SW USA (Worster, 1979).

Uncertainties over the role of dust in the radiative forcing of climate (Kaufman *et al.*, 2002) have prompted an increasing amount of research into atmospheric dust; represented by a threefold increase in scientific publications, from an average of 21 refereed papers per year between 1995 and 1997 inclusive to an average of 61 between 2003 and 2005 (Engelstaedter *et al.*, 2006).

Although some advances have resulted from this high level of research activity, both the radiative impact of dust and dust emissions are still characterized by large uncertainties. Dust also has an impact on other ecosystems; for example, the nutrient budget of oceanic ecosystems, by providing a source of Fe to fertilize ocean regions that would otherwise be nutrient-starved (Liss and Turner, 2000).

Estimates of the rate of dust emissions into the atmosphere range between 1,000 and 2,150 Tg yr⁻¹ (Zender, 2004); Tg = terragram, a metric unit of mass equal to 10¹² grams or 1 megatonne (one million metric tons). North Africa has been recognized as the largest dust emitting region in the world, due to the combination of sources rich in deflatable material, energetic wind systems, and a coupling to wind systems that facilitate long range transport (Engelstaedter *et al.*, 2006). Mineral dust in the atmosphere can originate from natural sources, or can result from human activity. Mineral dust from anthropogenic sources originates mainly from agricultural practices (harvesting, ploughing, overgrazing), changes in surface water (e.g., Aral Sea, Owens Lake) and industrial practices (e.g., cement production, transport) (Prospero *et al.*, 2002). Vegetation is known to protect the surface from deflation (Wasson and Nanninga, 1986) and removal of vegetative cover is a documented cause of increased atmospheric dust loading (Leys, 1999). However, the relative importance of human activity versus climate variability in increasing dust flux to the atmosphere is debated (Brooks and Legrand, 2000; Middleton, 1985). Tegen *et al.* (2004) estimated the anthropogenic contribution to mineral dust to be only 5 to 7% of the total atmospheric dust loading. Yoshioka *et al.* (2005) suggested that cultivation in the Sahel region contributes 0 to 15% to the total dust emissions from North Africa.

At the time of the IPCC Third Assessment Report (2001), there was considerable uncertainty about whether atmospheric dust exerted a positive or negative forcing on the climate (Figure 1a). Subsequently, measurements of the optical properties of dust (Tanré *et al.*, 2003; Moulin *et al.*, 2001) indicate that dust is considerably less absorbing in the solar spectrum than previously thought, suggesting that a positive radiative forcing by dust in the solar region of the spectrum is unlikely (Forster *et al.*, 2007). The IPCC Fourth Assessment Report (2007) now suggests that the overall forcing of mineral dust to be negative (i.e. cooling) (Figure 1b).

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

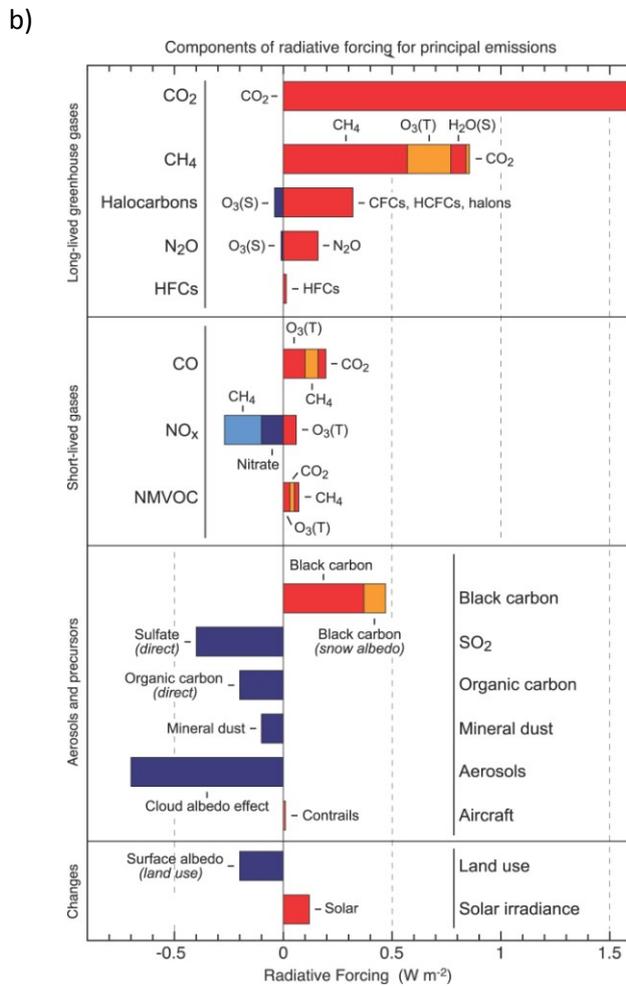
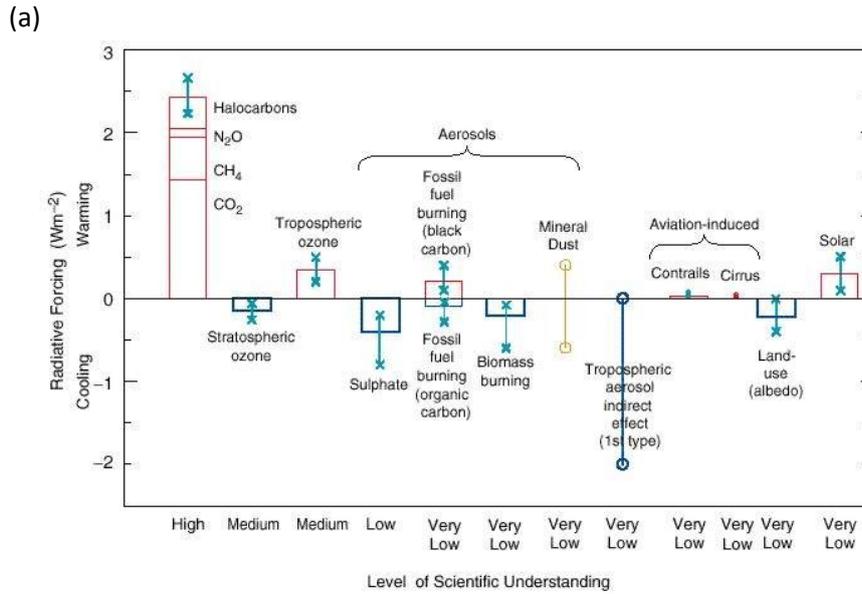
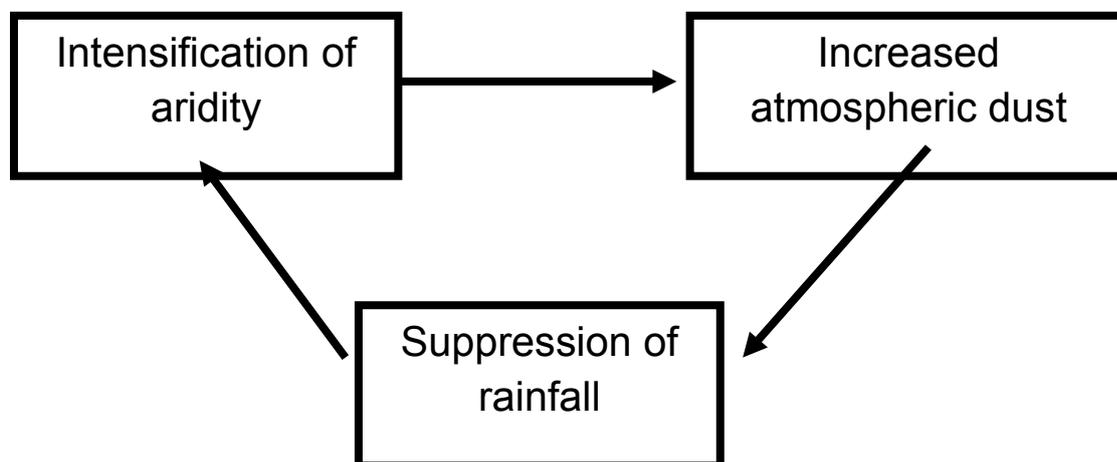


Figure 1: Changes in understanding of the impact of mineral dust on atmospheric forcing between the third (a) and fourth (b) IPCC Assessment Reports. See text for discussion. Source; IPCC, 2001 and Forster et al., 2007.

Atmospheric turbulence is required to lift dust high enough into the atmospheric column to allow large scale transport (Washington and Todd, 2005). Major atmospheric dust events are usually associated with strong seasonal winds (such as the 'Ghibli' or 'Harmattan' in the Sahara), but dry convection can also pick up significant amounts of dust (Cakmur *et al.*, 2004). Surface topography can play a key role in the strengthening of erosive winds by funnelling; e.g. the Tibesti and Ennedi mountains intensify between them the Bodélé Low Level Jet (Washington *et al.*, 2006).

There is some evidence to indicate a link between rainfall variability and dust storm activity, but the relationship is not always clear (Goudie and Middleton, 1992; Middleton, 1986; Middleton *et al.*, 1986). Recent research has indicated that increased dust storm frequency, rather than be a result of decreased rainfall, may actually be its cause, because atmospheric dust may play an important role in suppressing rainfall (Rosenfeld *et al.*, 2001). Satellite and aircraft observations show that clouds forming within desert dust contain small droplets and produce little precipitation by drop coalescence. Measurement of the size distribution and the chemical analysis of individual Saharan dust particles indicate that the resulting smaller raindrop size distribution would mean that gravity will not be able to exceed the tendency of air molecules to keep droplets suspended. The resulting lower rainfall would mean further drying of soils, making them more prone to aeolian erosion and atmospheric dust production. The dust therefore could provide a mechanism for initiating a desertification feedback cycle (Figure 2).



*Figure 2: Positive feedback mechanism proposed by Rosenfeld *et al.* (2001), resulting in increased desertification and dust production.*

A key goal in dust research is the development of numerical models capable of simulating dust emission, transport, and deposition, so that the influence of dust on the climate system can be quantified (Woodage *et al.*, in press; Washington *et al.*, 2006). However, much more detailed understanding of dust sources and processes of entrainment are required before this goal can be achieved (McTainsh, 1999). Remote sensing is proving to be a vital tool, by providing detailed observations of the desert dust cycle (Baddock *et al.*, 2009; Chiapello and Moulin, 2002).

REMOTE SENSING OF ATMOSPHERIC DUST

Satellite remote sensing can provide long time series of observations of atmospheric dust, which can help us evaluate the importance of different sources (Bullard *et al.*, 2008; Washington *et al.*, 2003). Attempts to quantify the global dust budget and characterise the main sources have involved three main remote sensing methodologies; those measuring backscattered solar radiation in the ultraviolet part of the electromagnetic spectrum (e.g. TOMS, OMI), those using scattering in the visible part of the spectrum (e.g. MODIS Deep Blue product), and those using differences in thermal infrared emissions (e.g. Meteosat IDDI).

UV BACKSCATTERING TECHNIQUES

It has taken a concerted effort, involving a number of remote sensing missions, to build up a long-term (since January 1979) archive of UV backscatter observations of the atmosphere. The main instrument for this research has been the Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) instrument, which has been carried on board NIMBUS-7, Meteor 3-5, ADEOS, and Earth Probe missions. However, TOMS has now been replaced by the Ozone Monitoring Instrument (OMI), carried on board NASA's AURA mission.

The first TOMS instrument was carried on board NIMBUS-7, launched on October 24th, 1978. The mission demonstrated the capability that TOMS enabled retrievals of mineral aerosols (atmospheric dust), in addition to its role in monitoring ozone levels (Herman, *et al.*, 1997). The instrument failed in May 1993, but by then a second TOMS instrument had been providing data since 1991 from the Russian/USA mission Meteor 3-5. This also developed problems in May 1993, and failed entirely in December 1994. A third TOMS instrument was carried on board the Japan/USA mission ADEOS, launched on August 17, 1996 into a 830 km orbit. ADEOS failed in June 1997, whereupon a fourth TOMS instrument carried by the Earth Probe launched on July 2, 1996. Earth Probe TOMS mission was planned to be complementary to the ADEOS TOMS mission, by providing higher resolution (i.e. more spatial detail). To this end, the Earth Probe satellite was placed in a 500 km orbit, lower than the originally planned 950 km orbit, in order to decrease the size of the "footprint" of each measurement. The lower orbit precluded full global coverage in the equatorial region (a role taken by ADEOS TOMS mission), but was designed to enable full coverage over the poles for monitoring the Antarctic Ozone Hole, which was a major objective of the Earth Probe TOMS mission. However, when ADEOS TOMS failed in June 1997, the orbit of Earth Probe TOMS was boosted to 740 km and circularized to optimise global coverage. Since January 1, 2006 the Ozone Monitoring Instrument (OMI) has replaced Earth Probe TOMS. OMI is carried on board the Aura satellite, which orbits at an altitude of 705 km in a sun-synchronous polar orbit with an exact 16-day repeat cycle. It is part of the Afternoon-crossing 'A-Train' constellation of satellites.

The TOMS OMI Aerosol Index (AI) compares the wavelength dependence of backscattered UV radiation from an atmosphere containing aerosols, where Mie scattering, Rayleigh scattering, and absorption all occur, to that of a pure molecular atmosphere where Rayleigh scattering dominates (Torres *et al.*, 2002). AI is derived using an aerosol optical thickness retrieval algorithm;

$$AI = 100 \log_{10} (I_{360_meas} / I_{360_calc})$$

An AI >1 is typical of absorbing aerosols such as smoke or dust (Baddock *et al.*, 2009; Torres *et al.*, 2002). Data can be downloaded free from <http://toms.gsfc.nasa.gov/aerosols/>

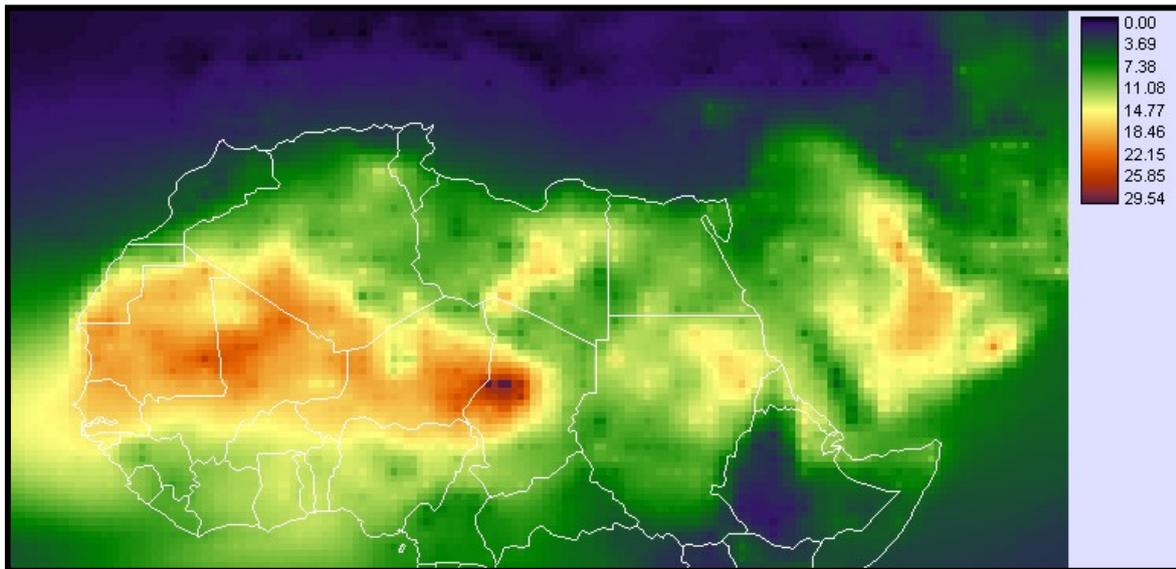


Figure 3: Average Nimbus-7 TOMS Aerosol index for North Africa, 1979-1993. Note major sources in Tchad, Niger, Algeria, Mauritaia and Mali.

Because of the low levels of UV radiation, spatial resolution of AI products is relatively coarse; measurements are binned on the satellite into 13 × 24 km pixels, but global products are usually degraded to 0.25 degree cells or coarser. This still enables the main sources of dust to be determined (Figure 3). In the Sahara, these include Tchad, Niger, Mali, Mauritania and southwest Algeria. However, the resolution of these products is insufficient to pinpoint specific point sources of dust; only the broad regions can be identified.

VISIBLE BACKSCATTERING TECHNIQUES

The benefit of using the visible part of the electromagnetic spectrum is higher spatial resolutions are possible, due to more radiation being present at these wavelengths. This characteristic suggest that remote sensing methods using the visible part of the electromagnetic spectrum should be particularly useful for identifying specific point sources of dust storms (Baddock *et al.*, 2009).

The MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) instrument is carried on board both the Terra and Aqua satellite missions. MODIS has 36 spectral bands, including three in the visible part of the spectrum, and operates at three spatial resolutions (250m, 500m, and 1,000m), much higher than provided by UV and thermal systems. As a result, whereas TOMS and OMI records can only identify regions of high dust transport, MODIS

images can, in principle, identify the specific landforms generating the dust (Bryant et al., 2007). The MODIS Rapid Response System was developed to provide daily 'quick-look' satellite images of the Earth in near real time, primarily for the purpose of monitoring wildfires and biomass burning, but these images also provide a valuable resource for monitoring atmospheric dust (Figure 4). These MODIS images can be downloaded from <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>. These data provide a quick method for checking for dust storm activity, but it is generally only possible to see the atmospheric dust as it blows over dark targets, such as sea (Figure 4). It is usually very difficult to observe dust over the actual desert source areas, because of the high albedo of the desert land surface (Baddock et al., 2009).



Figure 4: Dust storms off Algeria, December 6th 2003, seen in MODIS false colour image.
Source: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>

To overcome the problem of identifying dust over bright desert regions, algorithms using data from the shorter-wavelength (blue) end of the visible part of the electromagnetic spectrum, such as the Deep Blue algorithm, have been applied to SeaWiFS (Sea viewing Wide Field-of-view Sensor) and MODIS data since 2002 (Hsu *et al.*, 2004). Retrieving aerosol properties over bright surfaces is facilitated by using the blue spectral region, since surface reflectance is much darker in this region compared to the red portion of the spectrum (Schepanski, *et al.*, 2009). The Deep Blue algorithm (Hsu *et al.*, 2004) determines Aerosol Optical Thickness (AOT) in several visible wavebands simultaneously. The first step is cloud screening, because the Deep Blue algorithm cannot estimate AOT for cloud-contaminated pixels. The surface reflectance for a given pixel is then determined at different wavebands from a database based upon its location. The calculated radiances at, for example, 412nm, 490nm, and 670nm in the case of SeaWiFS, are then compared to radiances from a lookup table based on the solar, satellite, and azimuth angles, the surface reflectance, aerosol optical thickness, and single-scattering albedo. A maximum-likelihood method is used to match the appropriate values of AOT and single-scattering albedo to the measured radiances (Figure 5). Although MODIS data are recorded at high spatial resolutions, a global Deep Blue product database has been established at 0.1° by 0.1° resolution (Hsu *et al.*, 2004; 2006), but this still provides more spatial detail than that offered by UV and most thermal methods.

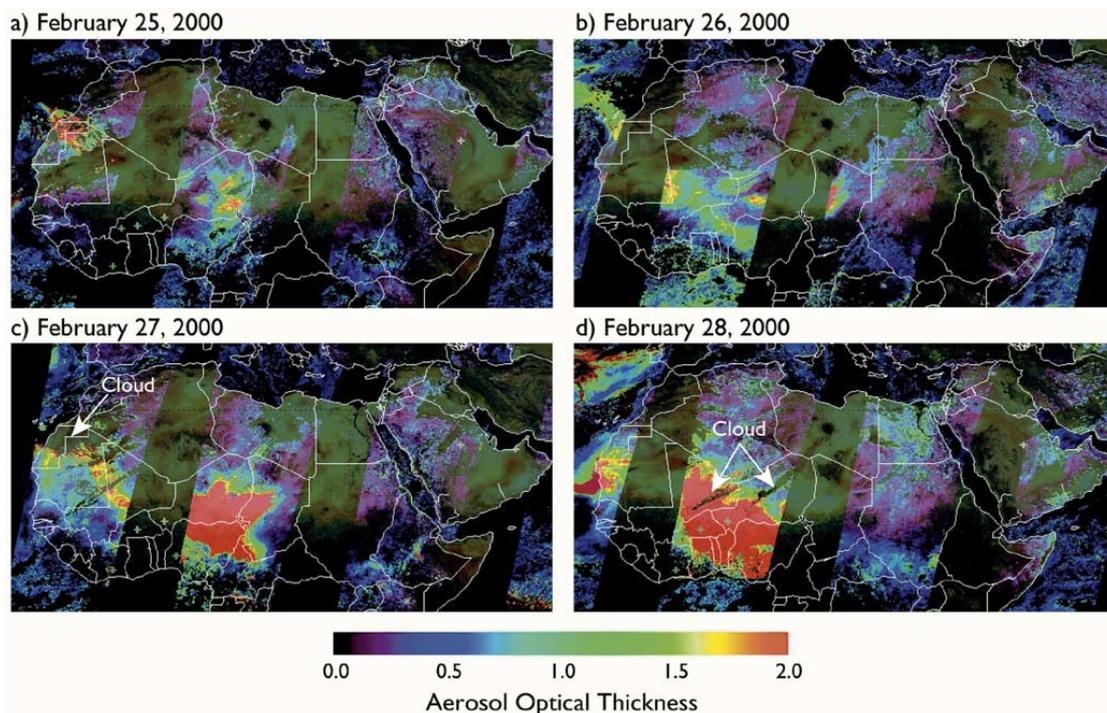


Figure 5. Example of Deep Blue aerosol optical thickness at 490nm retrieved from SeaWiFS data over the Sahara Desert during February 25–28, 2000. Source: Hsu *et al.*, 2004.

THERMAL INFRARED TECHNIQUES

An early attempt to exploit the thermal infrared for detecting atmospheric dust was based on METEOSAT data, from which, an Infrared Difference Dust Index (IDDI) (Legrand *et al.*, 2001; Leon and Legrand, 2003) can be calculated. The Infrared Difference Dust Index dataset was developed at the Laboratoire d'Optique Atmosphérique at the Université des Sciences et Technologies de Lille, France (Legrand *et al.*, 1994). The Index characterises the reduction in the measured infrared brightness temperature of the atmosphere from that which would result from a dust-free atmosphere. Brightness temperature values are retrieved from Meteosat infrared channel data collected at approximately midday. The maximum brightness temperature over a 15 day period is used to represent dust-free atmospheric conditions, and the daily brightness temperatures are subtracted from this, following masking out of cloudy pixels. The resulting index values are resampled to a 1 degree by 1 degree grid (Figure 6). The IDDI signal results from the reduction in the temperature of the underlying land surface by reduced solar insolation, and also the attenuation of the outgoing longwave radiation by the aerosol layer. As a result, the IDDI method can only provide data over land areas. There are also problems associated with the different radiative behaviour of dust particles of different sizes (coarse dust particles work best, fine dust is more problematic), and there are also problems associated with confusion with aerosols produced by biomass burning. Despite these limitations, the IDDI provides a useful semi-quantitative estimate of atmospheric dust loadings over the Sahara (Brooks and Legrand, 2000).

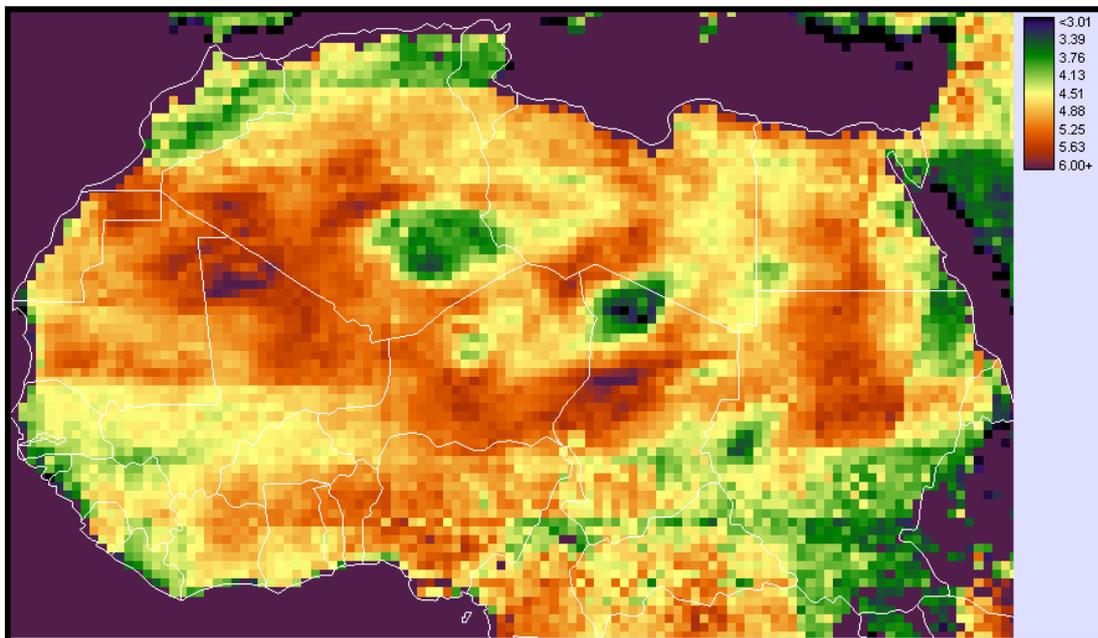


Figure 6: Average Meteosat Infrared Difference Dust Index (IDDI) over North Africa, 1984-1993. Source: Brooks, 1999.

Many other dust indices have been proposed, based on Brightness Temperature differences determined by a split-window technique. For example the Ackerman (1997) technique is based on brightness temperature differences among the three thermal infrared spectral channels $BT_{11\mu\text{m}} - BT_{12\mu\text{m}}$ and $BT_{8\mu\text{m}} - BT_{11\mu\text{m}}$. Negative differences in $BT_{11\mu\text{m}} - BT_{12\mu\text{m}}$ indicate dust storms (Baddock *et al.*, 2009).

A product specifically designed for discriminating between atmospheric dust and meteorological clouds has been implemented using data from the SEVIRI instrument, carried on board Meteosat Second Generation (MSG) geostationary satellites. The product is called Dust RGB and near real-time images can be downloaded from <http://oislab.eumetsat.org/IPPS/html/MSG/RGB/DUST/>. The Dust RGB is created by assigning the Brightness Temperature difference between the 12 μm channel and the 10.8 μm channel to control the intensity of red, the Brightness Temperature difference between the 10.8 μm channel and the 8.7 μm channel to control the intensity of green, and the 10.8 μm channel Brightness Temperature to control the intensity of blue on the display device. In the resulting colour composite images, dust clouds can be distinguished from other types of meteorological cloud by their pink colour (Figure 7). Images for the whole Earth disk seen below Meteosat 0 Degrees (positioned above where the Greenwich Meridian crosses the Equator) are produced every hour, allowing tracking of individual dust events to examine the development of storms. For example, the frontal storm over Tunisia shown in Figure 6 has liberated dust from two regions in Algeria; from a series of sources along the plains south of the Aurès Massif, and a broad fan-shaped arc across the south of the country.

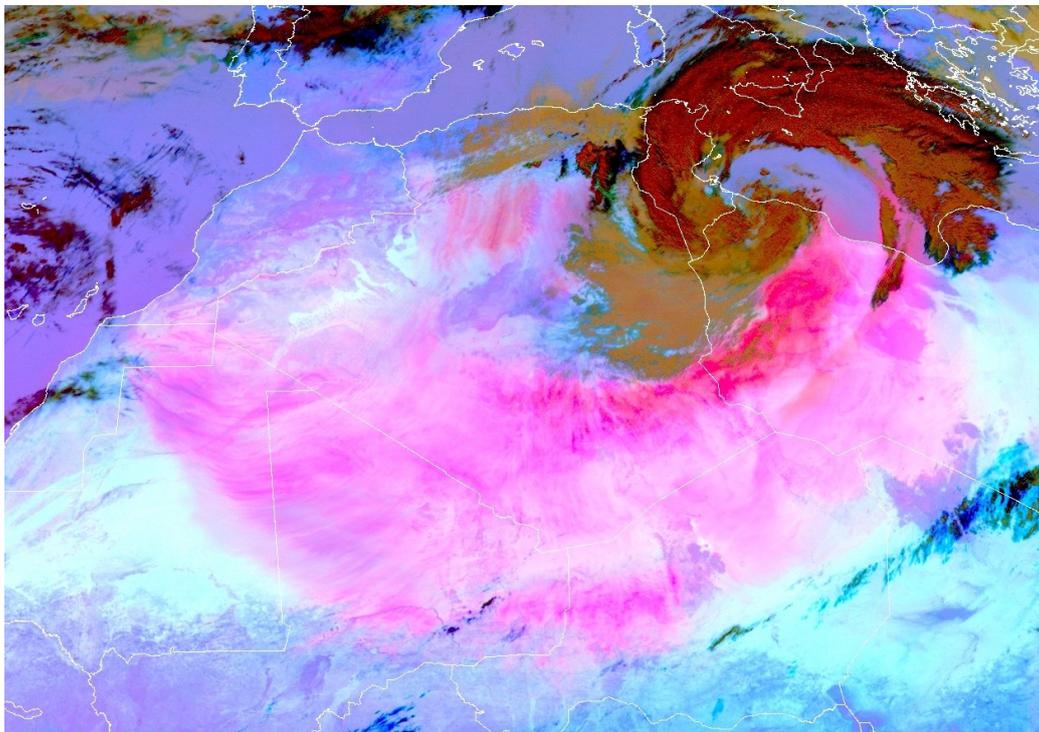


Figure 7: Large dust storm over North Africa seen by SEVIRI DUST RGB product, 9th March 2007. Red = 12.0 μm - 10.8 μm , Green = 10.8 - 8.7 μm , Blue = 10.8 μm . Pale pink colour indicated atmospheric dust. Dark red and brown colours indicate thick cloud over Tunisia. Copyright: EUMETSAT, 2009

Some techniques for remote sensing of dust combine elements of visible/Near infrared and thermal infrared methods. The Miller (2003) technique uses different method for retrievals for observations over sea and for observations over land. Over sea, the Miller method uses only visible/near infrared bands, assigning various combinations to control the red, green and blue colour intensity on a computer screen to produce a colour composite to highlight atmospheric dust. However, over land, Brightness Temperature differences in the 11-12 μ m range are added to the colour composite technique to aid discrimination of atmospheric dust.

MAIN SOURCES OF DUST IN NORTH AFRICA

Thus remote sensing provides several important tools for detecting and monitoring atmospheric dust. Replication studies have suggested that no one methodology alone can be expected to perform optimally in all conditions (Baddock *et al.*, 2009) inferring that any detailed analysis of dust storm activity should include synergistic use of several remote sensing methods, with coarse resolution UV or thermal remote sensing systems being used for routine monitoring for storm events, followed up with a high resolution study using visible or thermal remote sensing methods when storms are detected, in order to identify sources and detailed trajectory information.

Analysis of the long time series of TOMS and OMI observations has highlighted the major global dust sources. The Sahara is by far the biggest source of dust, but other significant sources include the Middle East, Taklamakan, southwest Asia, central Australia, the Etosha and Makgadikgadi basins of southern Africa, the Salar de Uyuni (Bolivia), and the Great Basin (United States). Within the Sahara, two major source areas are identified (Figure 2), firstly the Bodélé depression and, secondly, an area covering eastern Mauritania, western Mali and southern Algeria (Middleton and Goudie, 2001).

Analysis of Digital Elevation Model data has demonstrated that these global major dust sources are in internal (endoreic) drainage basins (Prospero *et al.*, 2002; Washington *et al.*, 2003). Many of these are periodically inundated following episodic heavy rainfall events (Bryant *et al.*, 2007), but many of the basins held much larger lakes during humid climate intervals in the Quaternary (Armitage *et al.*, 2007), and it is this material which is eroding to produce the dust (Washington *et al.*, 2006). These Quaternary palaeolake sediments tend to be fine grained, poorly indurated and easily deflated (Goudie, 1999). The Ahnet-Mouyder basin in southwest Algeria is a good example; this basin contained a large palaeolake during the Last Interglacial (Causse *et al.*, 1988) and continues to be a significant source of atmospheric dust.

Remote sensing studies have consistently identified the Bodélé Depression in Tchad as the dustiest place on Earth (Washington and Todd, 2005). This was once part of Lake MegaTchad (Drake and Bristow, 2006), and consists of soft diatomite sediments, easily deflated by aeolian erosion. Recent work undertaken as part of the Bodex experiment (2005) has revealed that these friable sediments are affected by a strong erosive wind called the Bodélé low level jet, which coincides with the exit gap of north Easterlies between the Tibesti and Ennerdi mountains (Washington and Todd, 2005). The Bodex field experiment found that the most prolific mechanism of dust production is the breakdown of saltating diatomite flakes as they collide with each other and with the surface. Large barchan dunes on the palaeolake surface act as 'dust mills' causing disturbance of air flow, particularly turbulence and convergence on their "horns". Thus dust production is localised within the main exposure of diatomite to places where there are the most dunes, as on the eastern and northern fringes of the exposure (Warren *et al.*, 2007).

CONCLUSIONS

Remote sensing is an important tool for monitoring dust storm hazards. Three main remote sensing methodologies have been used; those using UV (e.g. TOMS, OMI) those using visible (eg. MODIS Deep Blue product), and those using Thermal infrared (e.g. IDDI, MSG Dust RGB product) parts of the electromagnetic spectrum. No one technique appears optimal in all conditions, and synergistic use of coarse resolution systems for routine monitoring, followed up with higher resolution studies when storms are detected, in order to identify specific sources and trajectories of dust storms, provides the most robust methodology for detailed analysis of storms. These data have been instrumental in identifying the major sources of dust. In North Africa, these are mainly endoreic drainage basins, many of which were occupied by lakes during more humid climate intervals in the Late Quaternary. The residual palaeolake deposits have a fine particle size distribution and are easily entrained by aeolian erosion. Turbulent winds then carry this material high into the atmospheric column, where it can be exported long distances, such as across the Atlantic Ocean (Prospero et al., 1983).

REFERENCES

- Ackerman, S. A. 1997. Remote sensing aerosols using satellite infrared observations. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 17069–17080.
- Armitage, S.J., Drake, N.A., Stokes, S., El-hawat, A., Salem, M.J., White, K., Turner, P. and McLaren, S.J. 2007. Multiple phases of North African humidity recorded in lacustrine sediments from the Fazzan basin, Libya Sahara. *Quaternary Geochronology*, **2**, 181-186.
- Brooks, N. 1999. Dust-climate interactions in the Sahel-Sahara zone of northern Africa, with particular reference to late twentieth century Sahelian drought. Unpublished Ph.D. Thesis, University of East Anglia.
- Brooks, N., and Legrand, M. 2000. Dust variability and rainfall in the Sahel. In: McLaren, S. and Kniveton, D. (Eds.) *Linking climate change to land-surface change*, Kluwer Academic Publishers, Dordrech, 1–25.
- .Bryant, R.G., Gigg, G.R., Mahowald, N.M., Eckardt, F.D. and Ross, S.G. 2007. Dust emission response to climate in southern Africa, *Journal of Geophysical Research*, **112**, D09207, doi:10.1029/2005JD007025
- Bullard, J. E., Baddock, M. C., McTainsh, G. H., & Leys, J. F. 2008. Sub-basin scale dust source geomorphology detected using MODIS. *Geophysical Research Letters*, **35**(15), L15404. doi:10.1029/2008GL033928
- Bullard, J.E. and White, K. 2005. Dust production and the release of iron oxides resulting from the aeolian abrasion of natural dune sands. *Earth Surface Processes and Landforms*, **30**, 95-106, DOI: 10.1002/esp.1148
- Buritt, B. and Hyers, A.D. 1981. Evaluation of Arizona's highway dust warning system. *Geological Society of America Special Paper*, **186**, 281-292.
- Cakmur, R.V., Miller, R.L., Torres, O., 2004. Incorporating the effect of small-scale circulations upon dust emission in an atmospheric general circulation model. *Journal of Geophysical Research*, **109**, D07201, doi:10.1029/2003JD004067
- Causse, C. Conrad, G. Fontes, J-C. Gasse, F. Gibert, E. Kassir, A. 1988. Pleistocene du Sahara nord-occidental daterait de 80-100,000 ans. *C. R. Acad. Sci. Paris. t.* **306**, 1459-1464.

- Chiapello, I., and Moulin C. 2002. TOMS and METEOSAT satellite records of the variability of Saharan dust transport over the Atlantic during the last two decades (1979– 1997), *Geophysical Research Letters*, **29**, 1176, doi:10.1029/2001GL013767.
- Drake, N. and Bristow, C.S. 2006. Shorelines in the Sahara: geomorphological evidence for an enhanced monsoon from palaeolake Megachad. *Holocene* **16** (6), 901–911.
- IPCC 2001. Climate Change 2001. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge.
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz M. and Van Dorland. R. 2007. Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: Solomon, S., D. Q., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor M. and Miller H.L. (Eds.) *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Ganor, E., and Mamane, Y. 1982. Transport of Saharan dust across the eastern Mediterranean, *Atmospheric Environment*, **16**, 581-587.
- Goudie, A.S. 1999. Wind erosional landforms: yardangs and pans. In: Goudie, A.S., Livingstone, I., and Stokes, S. (Eds.) *Aeolian Environments, Sediments and Landforms*, Wiley, Chichester, 167-180.
- Goudie, A.S., and Middleton, N. J. 1992. The changing frequency of dust storms through time. *Climatic Change*, **20**,197–225.
- Goudie, A. S., and Middleton, N. J. 2001. Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-Science Reviews*, **56**,179-204.
- Herman, J. R., Bhartia, P.K., Torres, O., Hsu, C., Sefstor, C. and Celarier, E. 1997. Global distribution of UV-absorbing aerosols from Nimbus 7/TOMS data. *Journal of Geophysical Research*. **102**, 16911–22.
- Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D., & Herman, J. R. 2004. Aerosol properties over bright reflecting source regions. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **42**, 557–569
- Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D., & Herman, J. R. 2006. Deep Blue Retrievals of Asian Aerosol Properties During ACE-Asia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, **44**, 3180-3195.
- Kaufman, Y. J., Tanré, D. and Boucher, O. 2002. A satellite view of aerosols in the climate system. *Nature*, **419**, 215-223.
- Kaufman, Y. J., Koren, I., Remer, L.A., Tanré, D., Ginoux, P. and Fan, S. 2005. Dust transport and deposition observed from the Terra-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) spacecraft over the Atlantic Ocean, *Journal of Geophysical Research*, **110**, D10S12, doi:10.1029/2003JD004436.
- Leathers, C.R. 1981. Plant component of desert dust in Arizona and their significance for man. *Geological Society of America Special Paper*, **186**, 191-206.
- Legrand, M., N'Doume, C. and Jankowiak, I. 1994. Satellite-derived climatology of the Saharan aerosol. In Lynch, D.K. (Ed.) *Passive Infrared Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere II*. Proceedings of SPIE 2309, 127-135.

- Legrand, M., Plana-Fattori, A. and N'Doume, C. 2001. Satellite detection of dust using the IR imagery of Meteosat: 1. Infrared difference dust index, *Journal of Geophysical Research*, **106**(D16), 18,251–18,274.
- Leon, J. F., and Legrand, M. 2003. Mineral dust sources in the surroundings of the north Indian Ocean, *Geophysical Research Letters*, **30**(6), 1309, doi:10.1029/2002GL016690.
- Leys, J. 1999. Wind erosion on agricultural land. In: Goudie, A.S., Livingstone, I. and Stokes, S. (Eds.) *Aeolian Environments, Sediments and Landforms*. Wiley, Chichester, 143-166.
- Liss, P.S. and Turner, S.M. 2000. The influence of iron on ocean biology and climate; insights from the IronEx studies in the Equatorial Pacific. In: Hanson, R.B., Ducklow, H.W. and Field, J.G. (Eds.), *The Changing Ocean Carbon Cycle, A Midterm Synthesis of Joint Global Ocean Flux Study*. Cambridge, Cambridge University Press.
- Livingstone, I. and Warren, A. 1996. *Aeolian Geomorphology*. Longman, Harlow
- McFadden, L.D., Wells, S.G. and Jercinovich, M.J. 1987. Influences of eolian and pedogenic processes on the origin and evolution of desert pavements. *Geology*, **15**, 504-508.
- McTainsh, G. 1999 Dust transport and deposition. In: Goudie, A.S., Livingstone, I. and Stokes, S. (Eds.) *Aeolian Environments, Sediments and Landforms*. Wiley, Chichester, 181-211.
- Middleton, N.J. 1985. Effect of drought on dust production in the Sahel. *Nature*, **316** (6027), 431–35.
- Middleton, N.J. 1986. Dust storms in the Middle East. *Journal of Arid Environments*, **10**, 83-96.
- Middleton, N.J., Goudie, A.S. and Wells, G.L. 1986. The frequency and source areas of dust storms. In: Nickling, W.G. (Ed.) *Aeolian Geomorphology*, Boston, Allen and Unwin, pp. 237-260.
- Middleton, N.J. and Goudie, A.S. 2001. Saharan dust, sources and trajectories. *Transactions of the Institute of British Geographers* **26** (2), 165–181.
- Miller, S. D. 2003. A consolidated technique for enhancing desert dust storms with MODIS. *Geophysical Research Letters*, **30**, 20 (art.no.2071).
- Moulin, C., Gordon, H.R., Banzon, V.F. and Evans, R.H. 2001. Assessment of Saharan dust absorption in the visible from SeaWiFS imagery. *Journal of Geophysical Research*, **106**(D16), 18239–18249.
- Prospero, J.M., Glaccum, R.A. and Nees, R.T, 1983. Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America. *Nature*, **320**, 570-572.
- Prospero, J.M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S., and Gill, T. 2002. Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Rev. Geophys.*, **40**, 1002. doi:10.1029/2000RG000095
- Rosenfeld, D., Rudich, Y. and Lahev, R. 2001. Desert dust suppressing precipitation: A possible desertification feedback loop. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, **98**(11), 5975–5980, doi:10.1073/pnas.101122798
- Schepanski, K., Tegen, I. and Macke, A. 2009. Saharan dust transport and deposition towards the tropical northern Atlantic. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **9**, 1173–1189.

- Tanré, D., Haywood, J., Pelon, J., Léon, J. F., Chatenet, B., Formenti, P., Francis, P., Goloub, P., Highwood, E. J. and Myhre, G. 2003. Measurement and modeling of the Saharan dust radiative impact: Overview of the Saharan Dust Experiment (SHADE). *Journal of Geophysical Research*, **108**(D18), 8574, doi:10.1029/2002JD003273
- Tegen, I., Werner, M., Harrison, S.P. and Kohfeld, K.E. 2004. Relative importance of climate and land use in determining present and future global soil dust emission. *Geophysical Research Letters*, **31**, L05105, doi:10.1029/2003GL019216.
- Torres, O., Bhartia, P.K., Herman, J.R., Sinyuk, A. and Holben, B. 2002. A long term record of aerosol optical thickness from TOMS observations and comparison to AERONET measurements, *Journal of Atmospheric Science*, **59**, 398-413.
- Warren, A., Chappell, A., Todd, M.C., Bristow, C.S., Drake, N.A., Engelstaedter, S. Martins, V. M'bainayel, S. and Washington, R. 2007. Dust-raising in the dustiest place on earth, *Geomorphology*, **92**, 25–37, doi:10.1016/j.geomorph.2007.02.007
- Washington, R. and Todd, M.C. 2005. Atmospheric controls on mineral dust emission from the Bodélé Depression, Chad: The role of the low level jet. *Geophysical Research Letters*, **32**, L17701, doi:10.1029/2005GL023597
- Washington, R., Todd, M.C., Engelstaedter, S., Mbainayel, S., and Mitchell F. 2006. Dust and the low-level circulation over the Bodélé Depression, Chad: Observations from BoDEX 2005, *Journal of Geophysical Research*, **111**, D03201, doi:10.1029/2005JD006502
- Washington, R., Todd, M., Middleton, N.J. and Goudie, A.S. 2003. Dust-Storm Source Areas Determined by the Total Ozone Monitoring Spectrometer and Surface Observations. *Annals of the Association of American Geographers*, **93** (2), 297–313.
- Washington, R., Todd, M.C., Lizcano, G., Tegen, I., Flamant, C., Koren, I., Ginoux, P., Engelstaedter, S., Bristow, C.S., Zender, C.S., Goudie, A.S., Warren, A. and Prospero, J.M. 2006. Links between topography, wind, deflation, lakes and dust: The case of the Bodélé Depression, Chad. *Geophysical Research Letters*, **33**, L09401, doi:10.1029/2006GL025827
- Wasson, R.J. and Nanninga, P.M. 1986. Estimating wind transport of sand on vegetated surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms*, **11**, pp. 505-514.
- Wheaton, E.E. 1992. Prairie dust storms, a neglected hazard. *Natural Hazards*, **5**, 53-63.
- White, K. and Eckardt, F.D. 2006. Geochemical mapping of carbonate sediments in the Makgadikgadi basin, Botswana, using moderate resolution remote sensing data. *Earth Surface Processes and Landforms*, **31**, 665-681, DOI: 10.1002/esp.1289
- White, K., Livingstone, I., Gurney, S., Dearing, J. and Bateman, M. 2002. Post-processing of mineral mixture maps for mapping surficial materials: the example of the Matmata loess, southern Tunisia. *International Journal of Remote Sensing*, **23**, 3091-3106, DOI:10.1080/01431160110104674
- Worster, D. 1979. *Dust Bowl; the southern High Plains in the 1930s*. Oxford University Press, Oxford.
- Yoshioka, M., Mahowald, N., Dufresne, J.L. and Luo, C. 2005. Simulation of absorbing aerosol indices for African dust. *Journal of Geophysical Research*, **110**, D18S17, doi:10.1029/2004JD005276
- Zender, C.S. 2004. Quantifying mineral dust mass budgets: terminology, constraints, and current estimates. *Eos*, **85**, 509–512.

FIGURE CAPTIONS

Figure 1: Changes in understanding of the impact of mineral dust on atmospheric forcing between the third (a) and fourth (b) IPCC Assessment Reports. See text for discussion. Source; IPCC, 2001 and Forster *et al.*, 2007.

Figure 2: Positive feedback mechanism proposed by Rosenfeld et al (2001), resulting in increased desertification and dust production.

Figure 3: Average Nimbus-7 TOMS Aerosol index for North Africa, 1979-1993. Note major sources in Tchad, Niger, Algeria, Mauritaia and Mali.

Figure 4: Dust storms off Algeria, December 6th 2003, seen in MODIS false colour image. Source: <http://rapidfire.sci.gsfc.nasa.gov/>

Figure 5. Example of Deep Blue aerosol optical thickness at 490nm retrieved from SeaWiFS data over the Sahara Desert during February 25–28, 2000. Source: Hsu *et al.*, 2004.

Figure 6: Average Meteosat Infrared Difference Dust Index (IDDI) over North Africa, 1984-1993. Source: Brooks, 1999.

Figure 7: Large dust storm over North Africa seen by SEVIRI DUST RGB product, 9th March 2007. Red = 12.0 μ m - 10.8 μ m , Green = 10.8 - 8.7 μ m , Blue = 10.8 μ m. Pale pink colour indicated atmospheric dust. Dark red and brown colours indicate thick cloud over Tunisia. Copyright: EUMETSAT, 2009

**PREVENTION ET LUTTE CONTRE LES FEUX DE FORET
EN ALGERIE
ABBAS Mohamed D.G.F**

INTRODUCTION

L'incendie de forêts est un aléa majeur qui affecte particulièrement et fortement les pays du bassin méditerranéen où l'on enregistre annuellement une superficie parcourue par le feu qui dépasse les 700.000 hectares. Que ce soit en Europe, ou dans la partie Nord de l'Afrique où la désertification menace, l'incendie met en danger les équilibres économiques, écologiques et sociaux des pays méditerranéens. Pour cela, protéger les biens et le milieu naturel suppose d'adapter et d'optimiser les stratégies et les moyens de prévention et de lutte.

Les feux de forêts dans le contexte méditerranéen

Contrairement aux autres parties du monde, où un certain nombre de feux est d'origine naturelle, le bassin méditerranéen se caractérise par la prédominance de feux provoqués exclusivement par l'homme.

Il faut également savoir que les feux de forêts dans le bassin méditerranéen représentent une part importante des incendies de la planète. On recense en moyenne 60.000 feux par an dans les pays à risque d'incendie de la zone méditerranéenne. Dans certains pays méditerranéens, on enregistre plus de 20.000 feux de forêt par an. Ces feux détruisent chaque année jusqu'à 700.000 ha de forêts en région méditerranéenne et le plus souvent ces incendies éclatent durant la saison sèche.



En plus des conditions météorologiques particulières qui sont enregistrées en période estivale, principale cause des incendies, la négligence humaine (barbecue allumé en forêt, randonneurs mal intentionnés, mégots de cigarettes...) et les « pyromanes » sont les causes directes de la récente hausse du nombre des feux de forêts à travers l'ensemble des pays du pourtour méditerranéen.

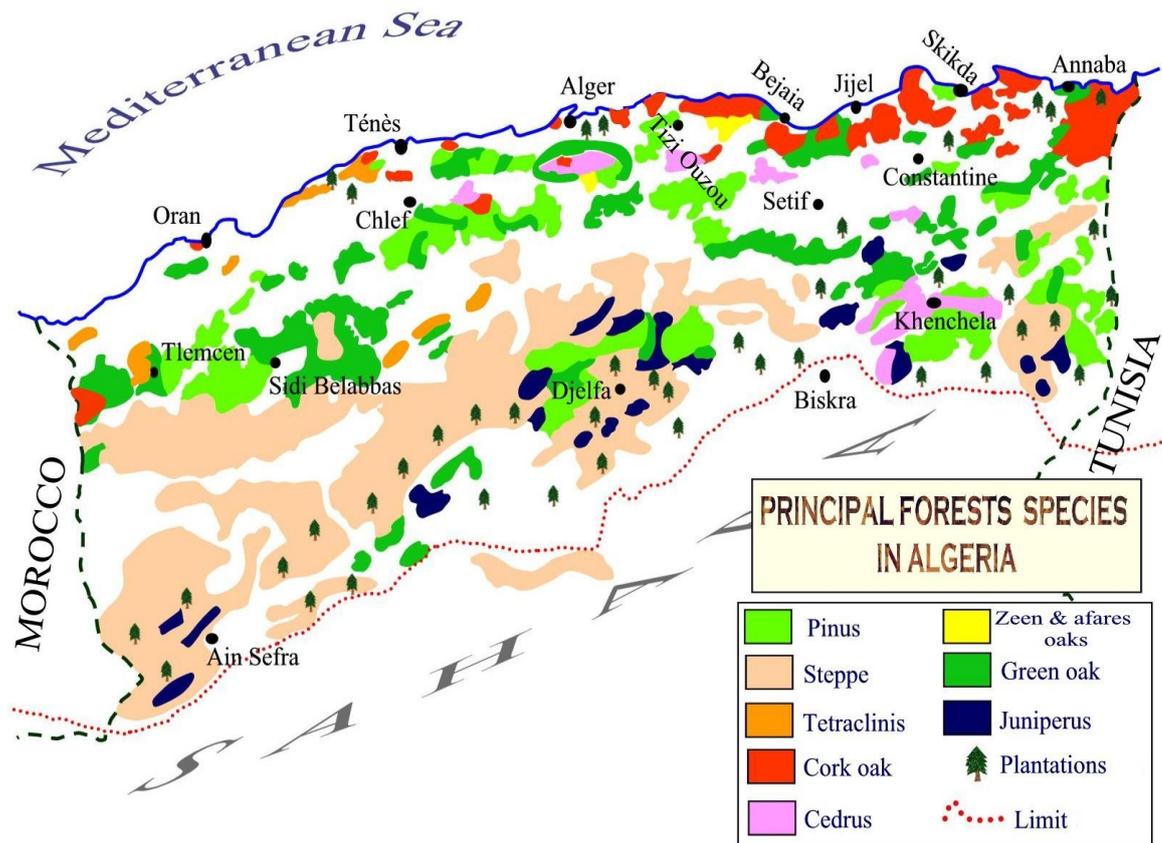


Données générales

En Algérie, le patrimoine forestier, estimé à 4,1 millions d'hectares de forêts et de maquis, représente un taux de boisement de 11%, en ne considérant que le nord du pays. Cependant, ce taux ne reflète pas de manière homogène l'ensemble des wilayas dont certaines ont un taux supérieur à 35% comme El Tarf, Jijel, Skikda, Annaba et Bejaia .

Il est réparti comme suit :

- forêts naturelles : 1 million 427 000 ha
- maquis : 1 million 662 000 ha
- reboisements : plus de 800 000 ha
- vides : 240 000 ha
- 91 % sont des forêts publiques (3M 700 000 ha)
- 9 % de forêts privées (350 000 ha).
- Les principales essences composant nos forêts naturelles sont par ordre d'importance :
 - Le pin d'Alep : 881 000 ha
 - Le chêne liège : 230 000 ha
 - Les chênes zeen et Afares : 48 000 ha
 - Les Eucalyptus : 43 000 ha
 - Le pin maritime : 32 000 ha.
 - Le cèdre de l'Atlas : 16 000 h

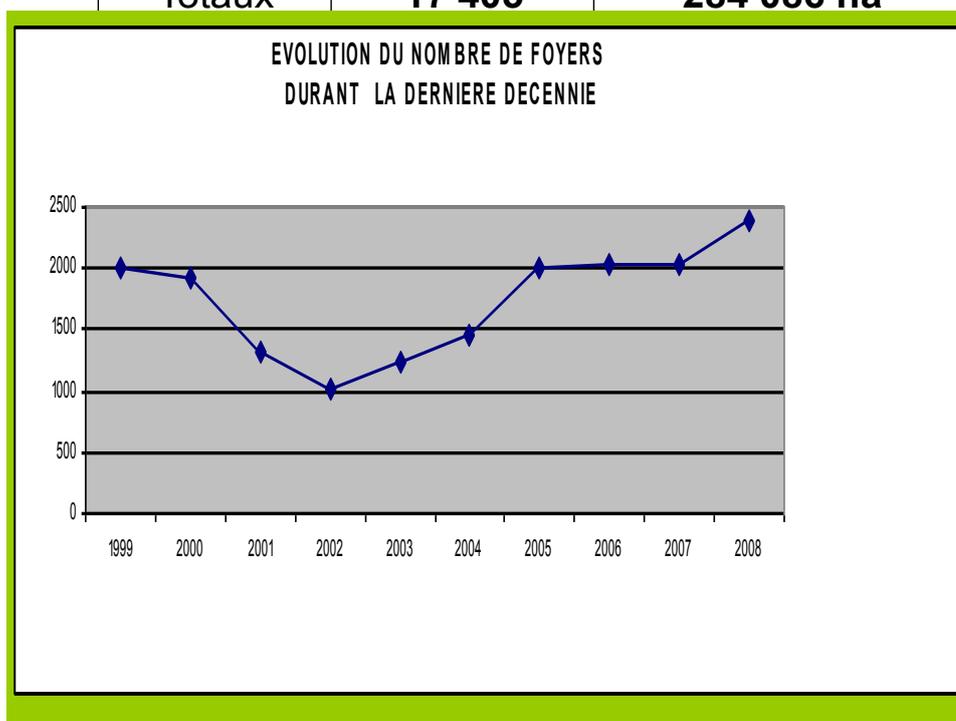


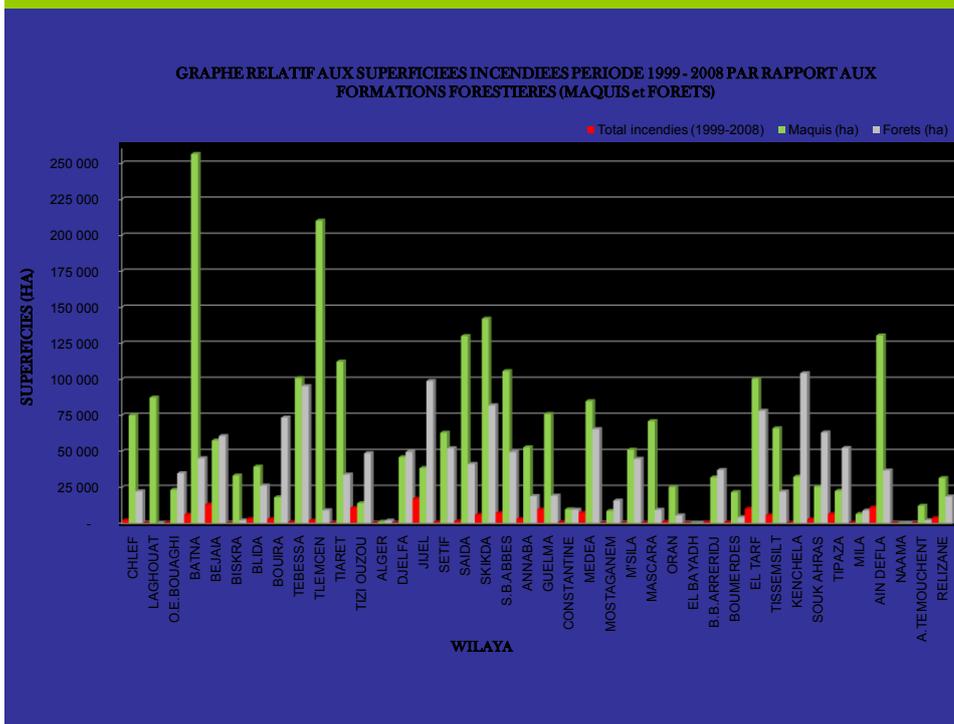
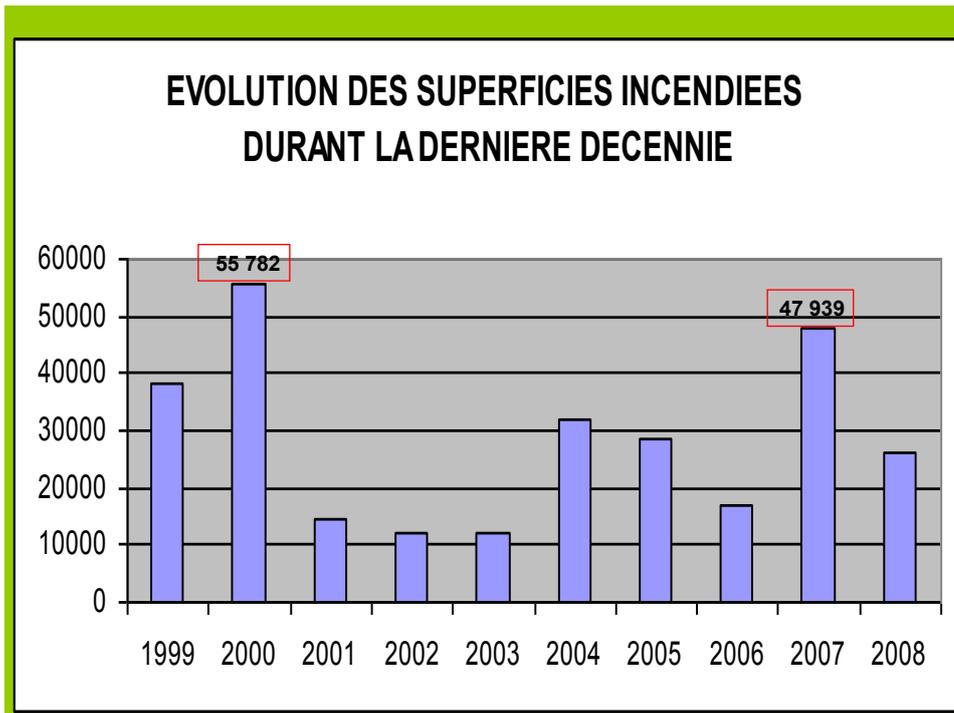
Les feux de forêts en Algérie durant la dernière décennie

- En Algérie, la superficie totale parcourue par le feu durant la dernière décennie est de 284.085 ha pour 17.405 foyers, soit une moyenne de 15,20 ha par foyer ;
- La superficie moyenne incendiée par année durant la décennie est de 28.408 ha, alors que le nombre moyen de foyers est de 1.741 ;
- La « forêt » demeure la formation la plus touchée par le feu, soit 144.280 ha représentant 51 % du total de la décennie. En seconde position, viennent les maquis avec 78.942 ha représentant 28%, suivis par les broussailles avec 49.174 ha représentant 17%.
- La situation enregistrée durant la campagne 2009 se rapproche de la moyenne annuelle de la décennie considérée, en ce qui concerne les superficies parcourues par le feu (26.183 ha) et sensiblement moins en ce qui concerne la superficie par foyer qui est de 11 ha/foyer.
- Le nombre de foyer enregistré en 2009 est nettement supérieur à la moyenne de la décennie.

Feux de forêts de la période 1999-2008

ANNEE	Nbre de foyers	Superficie parcourue par le feu
1999	2 018	38 462 ha
2000	1 910	55 782 ha
2001	1 327	14 378 ha
2002	1 008	12 217 ha
2003	1 233	11 998 ha
2004	1 468	31 999 ha
2005	2 013	28 380 ha
2006	2 029	16 916 ha
2007	2 026	47 939 ha
2008	2 378	26 015 ha
Totaux	17 405	284 086 ha

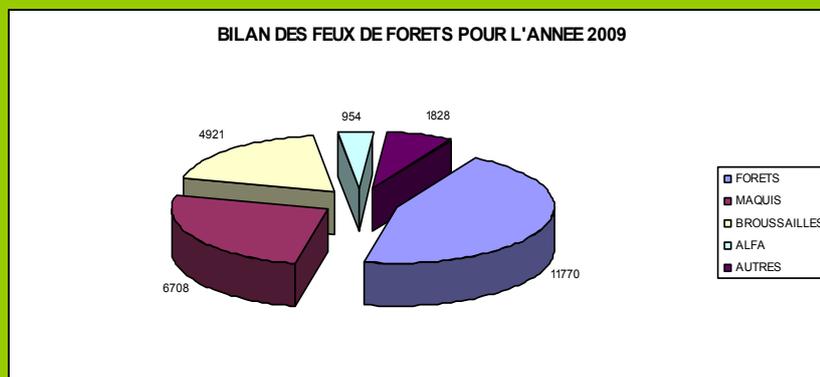






BILAN DES FEUX DE FORÊTS
CAMPAGNE 2009

- Il a été enregistré durant l'année 2009, **2.358 foyers**, ayant parcouru une superficie totale de **26.183 ha** dont **11.770 ha** en forêt (soit **45%** du total), avec un ratio de **11 ha/foyer**.



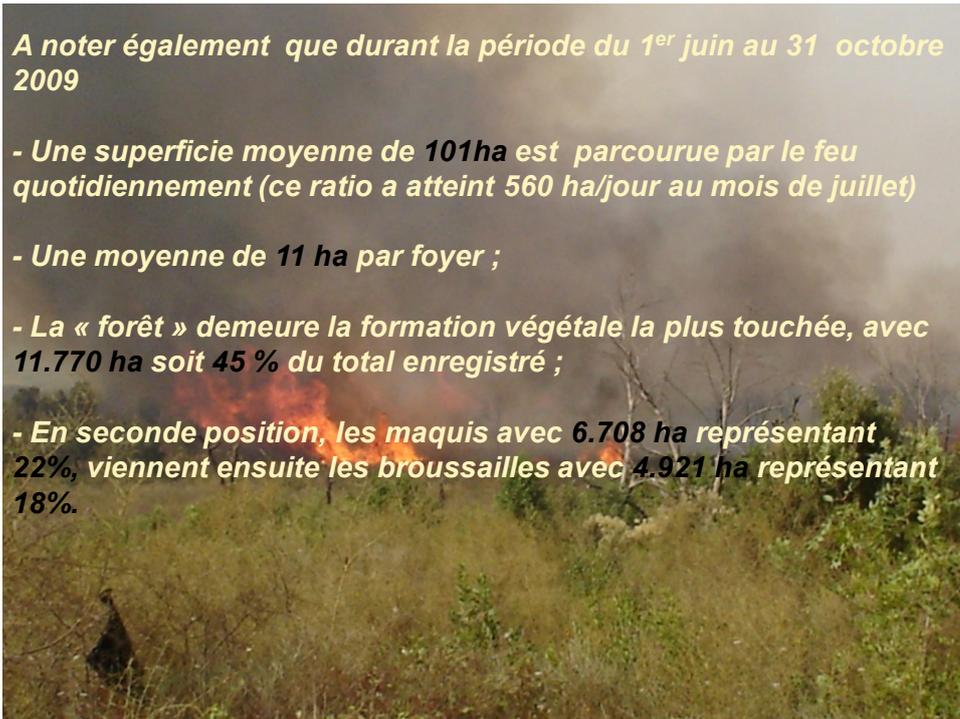
A noter également que durant la période du 1^{er} juin au 31 octobre 2009

- Une superficie moyenne de 101ha est parcourue par le feu quotidiennement (ce ratio a atteint 560 ha/jour au mois de juillet)

- Une moyenne de 11 ha par foyer ;

- La « forêt » demeure la formation végétale la plus touchée, avec 11.770 ha soit 45 % du total enregistré ;

- En seconde position, les maquis avec 6.708 ha représentant 22%, viennent ensuite les broussailles avec 4.921 ha représentant 18%.

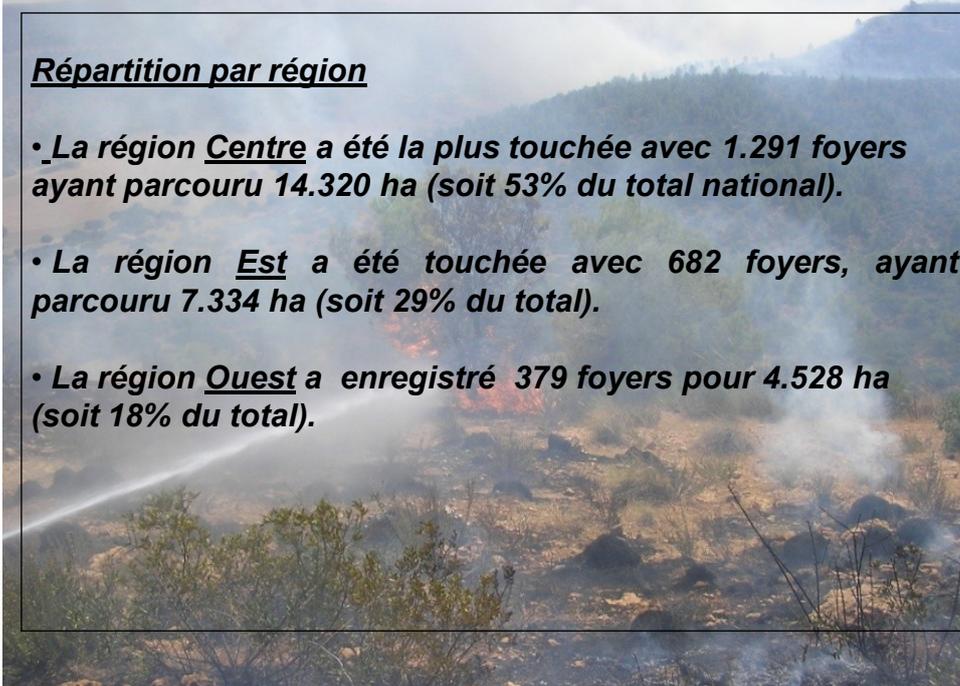


Répartition par région

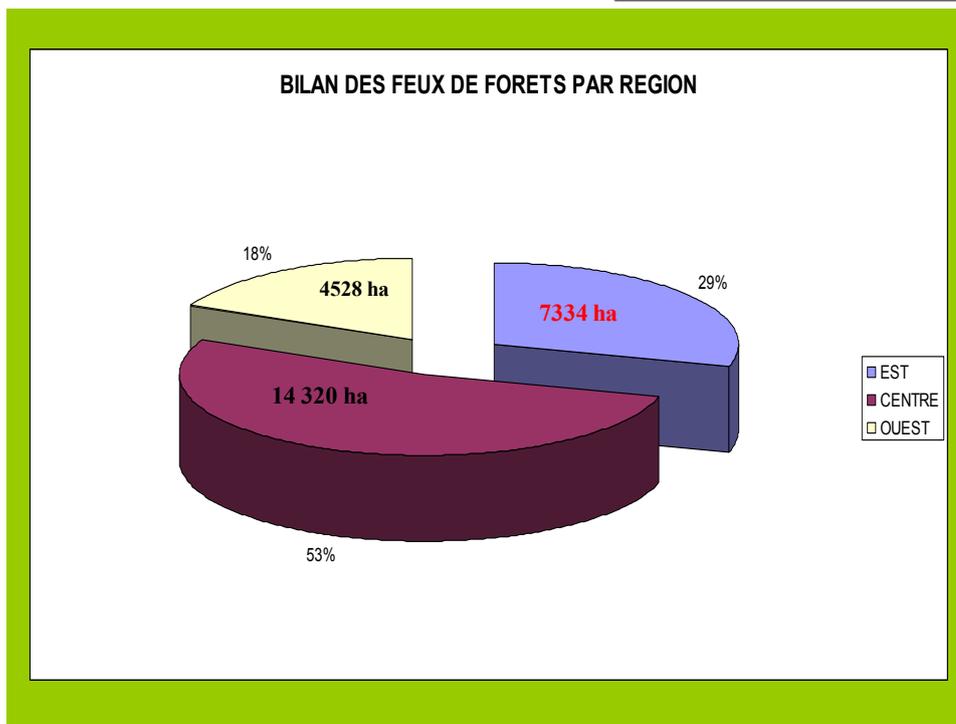
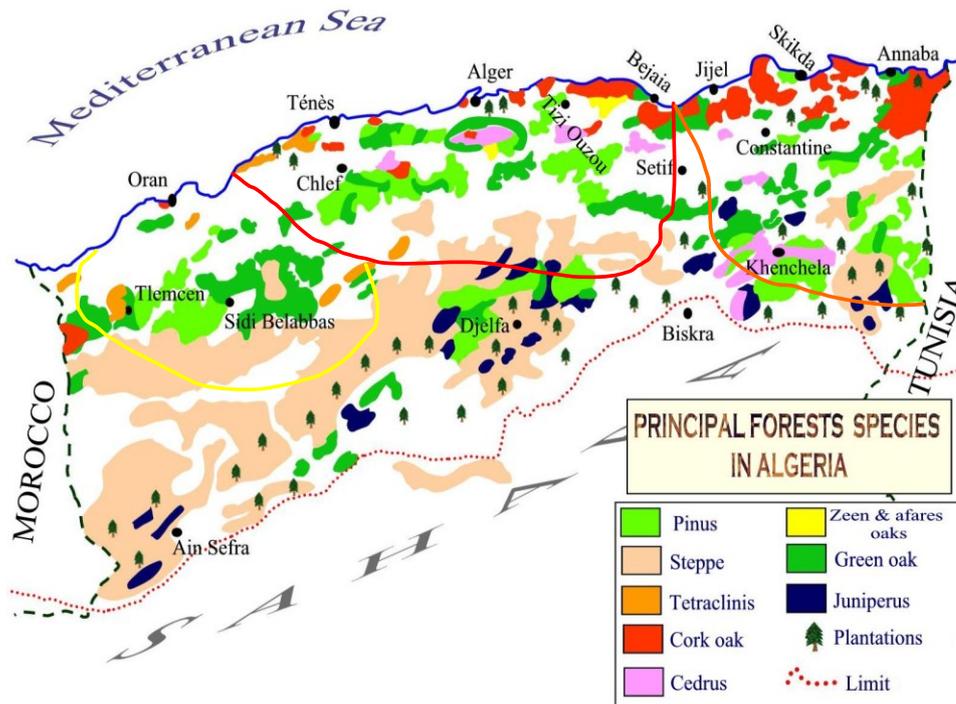
• La région Centre a été la plus touchée avec 1.291 foyers ayant parcouru 14.320 ha (soit 53% du total national).

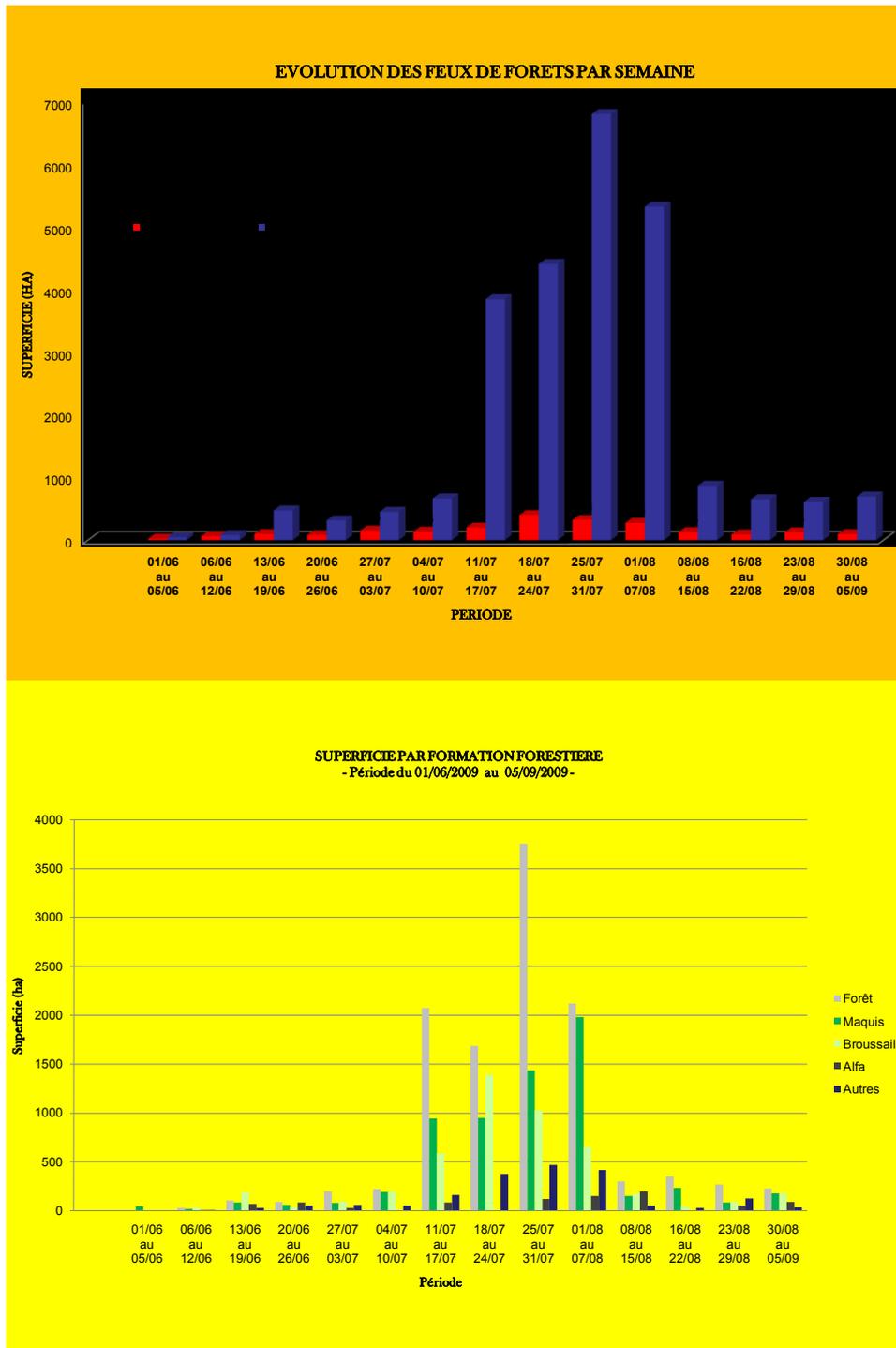
• La région Est a été touchée avec 682 foyers, ayant parcouru 7.334 ha (soit 29% du total).

• La région Ouest a enregistré 379 foyers pour 4.528 ha (soit 18% du total).



Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles
Stratégies de prévention et de protection





CONSEQUENCES DES FEUX DE FORETS

Les grands effets de destruction et de régressions forestières, sont l'œuvre des incendies de forêts comme nous venons de le voir, dans la présentation du bilan de 2009. Cet état de fait n'est pas sans conséquences sur la vie économique et sociale. En effet les déboisements, en plus de la perte du couvert végétal qui recèle un intérêt économique, causent des catastrophes écologiques sans commune mesure, et présentent aussi des incidences négatives sur :

- la préservation des nappes phréatiques, qui une fois le sol mis à nu, s'évaporent plus facilement, ce qui nuit aux capacités de leur stockage;
- la capacité de stockage des barrages (l'érosion hydrique qui cause par charriage des particules du sol mis à nu l'envasement des barrages);
- le gonflement des crues, par des éléments solides, entraînent aussi des inondations avec de graves incidences sur la vie de la population et de leurs biens matériels;
- l'atteinte aux vies humaines et la destruction de leurs biens (populations vivants enclavées dans les forêts).
- la biodiversité (faune et flore)



Le dispositif de prévention et de lutte contre les feux de forêts

Eu égard à la vulnérabilité de nos forêts aux feux, de par leur composition floristique fortement inflammable et au nombre important de foyers d'incendies, constatés au cours des années écoulées, la Direction Générale des Forêts met en place chaque année un dispositif opérationnel s'articulant autour des axes suivants : Sur le plan de la sensibilisation, L'animation de conférences/débats dans les établissements scolaires et culturels ;

L'organisation d'expositions et journées portes ouvertes sur des thèmes de protection de l'environnement et des forêts;

L'animation et la participation à des émissions radiophoniques dans les chaînes nationales et locales pour la sensibilisation du grand public ;

La participation à des émissions télévisées;

La mise en place de panneaux de sensibilisation dans les zones forestières les plus fréquentées.



Sur le plan réglementaire

La Direction Générale des Forêts, en collaboration avec les autres organismes traditionnellement concernés, met en exécution chaque année, les dispositions législatives et réglementaires des textes suivants :

- la loi 84/12 du 23 juin 1984, portant Régime Général des forêts qui, en application de ses articles 19 et 20, rend nécessaire la participation des différentes structures de l'Etat dans la lutte contre les feux de forêts. Comme elle fixe les obligations de certains organismes pour l'exécution des travaux préventifs nécessaires ;
- le décret 80-184 du 19 juillet 1980 portant mise en place des organes de coordination des actions de protection des forêts;
 - le décret 87-44 du 10 février 1987 fixant les règles et les normes de prévention contre les feux de forêts dans le domaine forestier national et à proximité ;
 - Le décret 87-45 du 10 février 1987 portant organisation et coordination des actions en matière de lutte contre les feux de forêts dans le domaine forestier national ;
 - La loi 04-20 du 25 décembre 2004 relative a la prévention des risques majeures et a la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.
- Sur le plan organisationnel, l'installation des comités opérationnels de wilaya;
- l'installation des comités opérationnels de daïra;
- l'installation des comités opérationnels communaux;
- la constitution des comités de riverains qui jouent un rôle important dans la prévention et l'intervention contre les feux de forêts;

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

- Sur le plan de la prévention,



L'aménagement et l'entretien de tranchées par feu;

L'assainissement et le débroussaillage au niveau des forêts;

L'ouverture et l'aménagement de pistes forestières ;



L'entretien, par les services des travaux publics et des collectivités locales des accotements des routes traversant les massifs forestiers;

La confection de tournières autour des exploitations agricoles limitrophes aux forêts ;

L'entretien, par la SONELGAZ, de tranchées sous lignes électriques;

L'entretien par la SNTF des accotements de voies ferrées traversant les massifs forestiers;

La réalisation et l'aménagement des points d'eau;



2.5- Sur le plan de l'intervention,



- la mise en place des postes de vigie (dont la norme arrêtée sur la base de la carte de visibilité est de 1 poste de vigie pour 9.000 ha) ;

- la constitution de brigades mobiles de première intervention (norme admise 5.000 ha/ brigade) et leur positionnement à proximité des massifs forestiers les plus sensibles

- La mise en place de chantiers forestiers, mobilisables en cas de nécessité;



- le recensement des points d'eau situés en forêts ou à proximité, pour l'approvisionnement en eau des moyens d'intervention (la norme admise étant de 01 point d'eau pour 2.000 has)

- La mise en exploitation du réseau radioélectrique pour l'alerte rapide et la coordination des équipes d'intervention.

- La mise en place de moyens aériens de surveillance des feux de forêts en guêt armé





Intervention conjointe avec la Protection civile

Etude du risque d'incendies à l'aide d'un S.I.G.
Cas de la forêt de Ksenna (w. Bouira).

Etude du risque d'incendies dans la foret de ksenna

Méthode de la représentation cartographique

Le modèle de calcul de l'indice du risque d'incendie intègre trois sous-indices, IC, IM et IH.

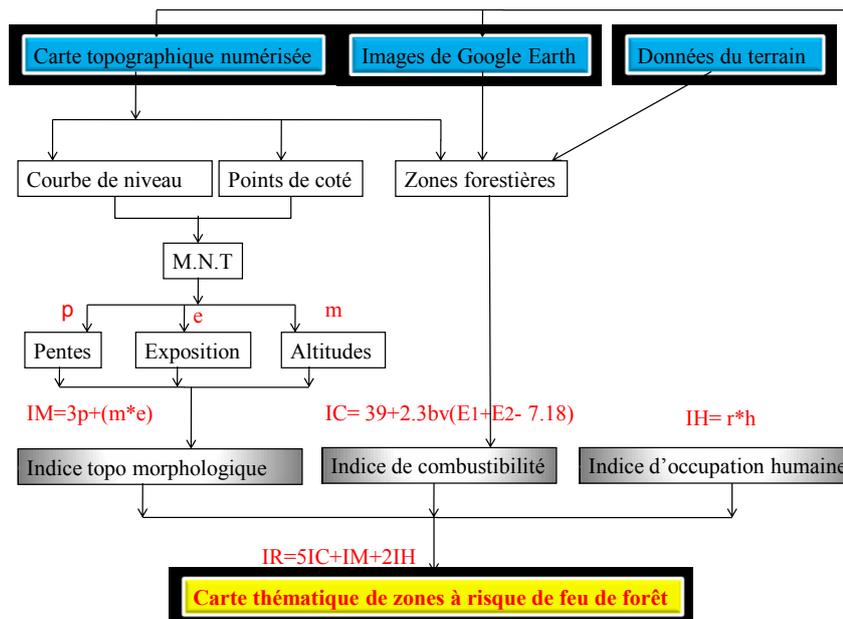
$$IR = 5 IC + IM + 2 IH$$

(DAGORNE et DUCHE, 1990)

$$IC = 39 + 2.3bv(E1 + E2 - 7.18)$$

$$IM = 3p + (e * m)$$

$$IH = r * h$$



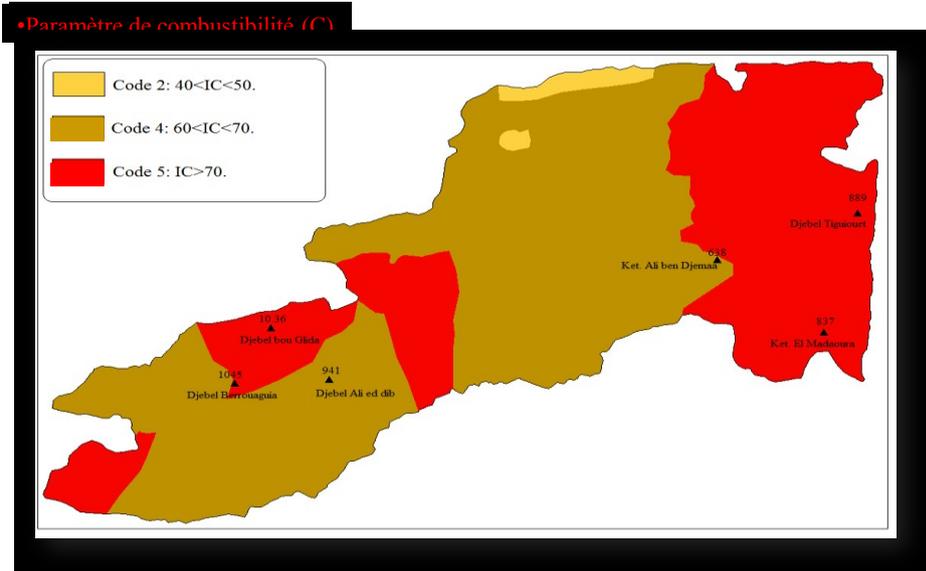
Cartographie du risque de feu de forêt

La réalisation de la carte des risques de feu de forêt s'effectue en superposant les couches représentant les différents paramètres.

Le système d'information géographique (S.I.G) a été utilisé, pour la réalisation de la carte des risques de feu de forêts en prenant l'indice des risques comme modèle.

La base de données géographique représente les différents paramètres classés selon les caractéristiques tels que:

- la combustibilité.
- les pentes.
- la position du versant.
- l'exposition.
- le réseau routier.
- les espaces fréquentés.

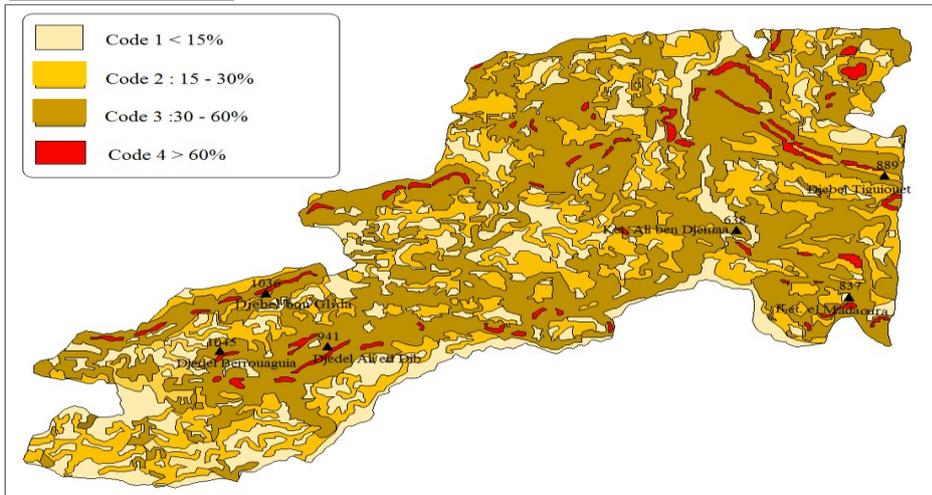


La dominance des classes $60 < Ic < 70$ et $Ic > 70$ (code 4 et le code 5) correspond à une forêt **très inflammable**.

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

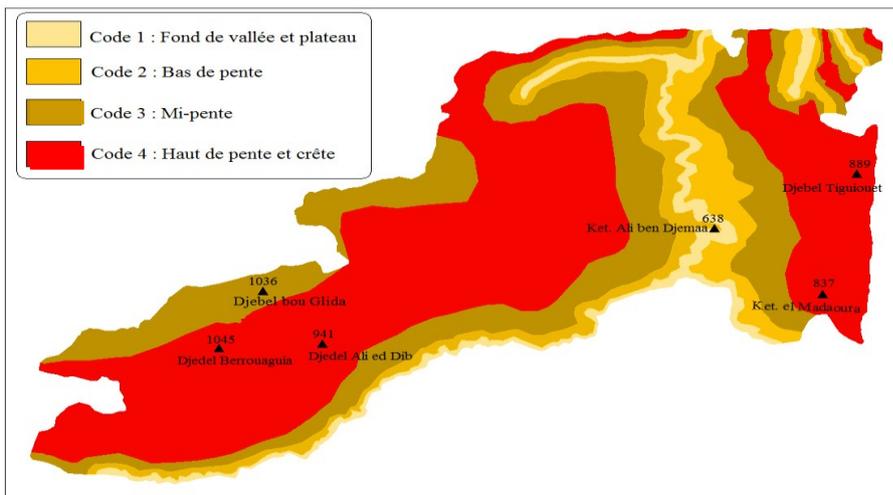
Stratégies de prévention et de protection

•Paramètre de pente



La dominance de classes de 15 à 30% et de 30 à 60% (code 2 et code 3) favorise la propagation d'incendie.

•Paramètre de position dans le versant

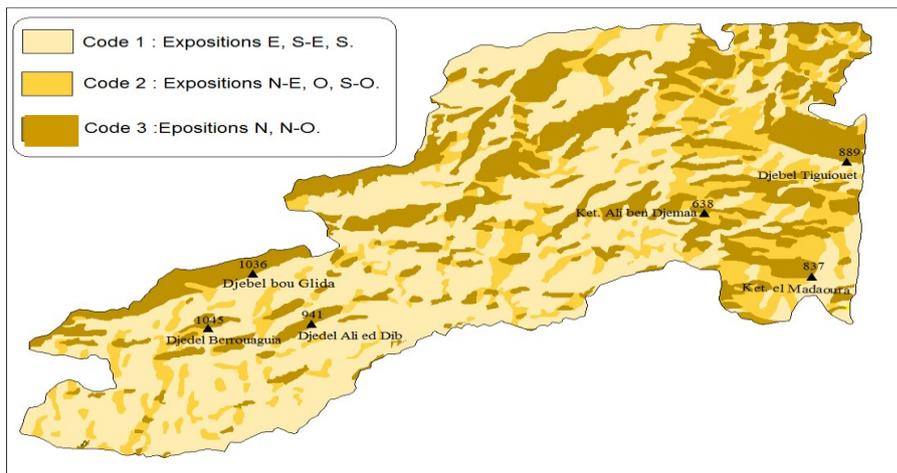


La dominance des classes mi pente et haut de pente et crête (code 3 et code 4) favorise la propagation d'incendie.

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

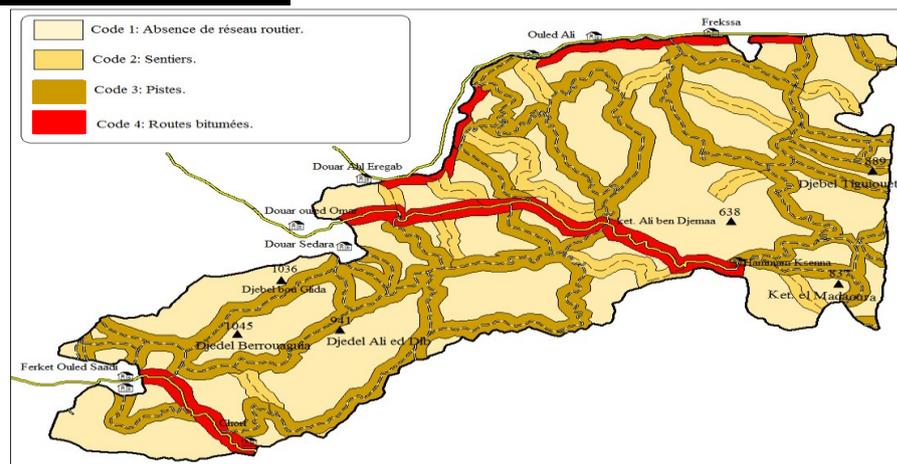
Stratégies de prévention et de protection

•Paramètre d'exposition



Les versants Nord et Nord-ouest (code 3) sont les plus exposés aux vents dominants favorisant le déclenchement et la propagation des incendies.

•Paramètre du réseau routier

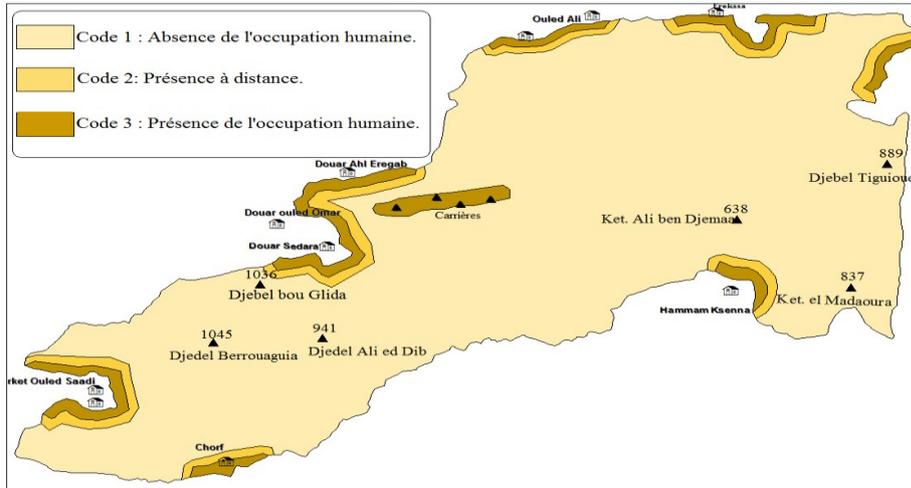


Le réseau routier est très important, avec les pistes (code 3) et les routes bitumées (code 4) qui jouent un rôle important dans le déclenchement des incendies.

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

•Paramètre de fréquentation humaine.

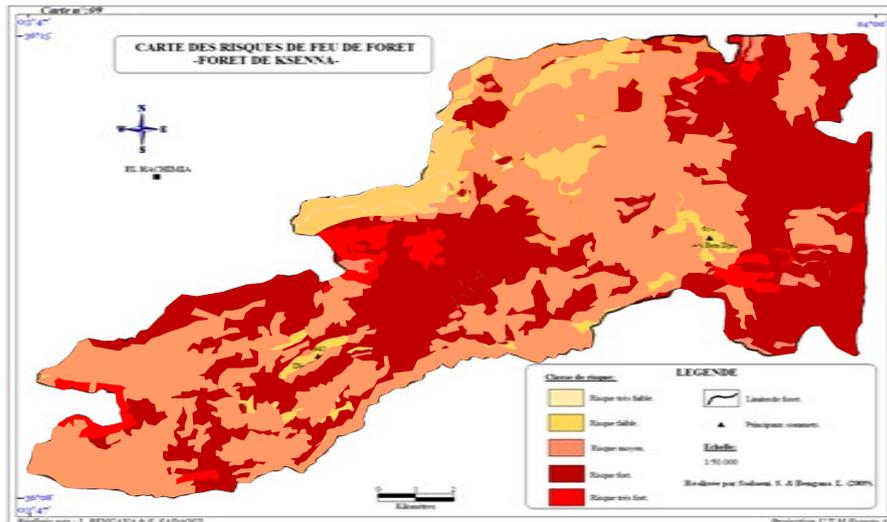


Une forte occupation humaine (code 3), représentée par les villages, qui est un paramètre accélérant le processus de mise à feu.

D'après la formule on obtient un indice de risque qui est utilisé dans la nouvelle base de données, permettant l'élaboration de la carte de l'indice de risque de feu de forêt.

L'indice IR varie entre 10 et 70.

Indice de risque (IR)	Etat du risque
$10 \leq IR < 20.$	Risque très faible
$20 \leq IR < 30.$	Risque faible.
$30 \leq IR < 40.$	Risque moyen.
$40 \leq IR < 50.$	Risque fort.
$IR \geq 50.$	Risque très fort.



- La forêt est caractérisée par la dominance du **risque fort et moyen** (45.01% et 41.79% de la surface de cette forêt) occupant la **partie Est et centre**.
- Le **risque très fort** apparaît au niveau **des carrières** situées sur la route willayale n°97.
- Le **risque faible et très faible** (13%) occupant la partie **Nord-ouest** de la forêt.

Les Feux de Forêts, une calamité naturelle ?

Quelles sont les vraies causes ? Les causes réelles des incendies sont bien connues, mais souvent on accuse la nature d'être à l'origine de ces feux. Pourquoi les incendies sont-ils devenus si nombreux et si fréquents? L'effet de changement climatique est-il responsable de ces incendies de forêts? Quelle est la part de responsabilité de l'homme dans ces incendies ? Que peut-on faire pour éviter une répétition de ces catastrophes environnementales à l'avenir?

CONCLUSIONS

- Les pays concernés et menacés par les feux de forêts pourraient sauver, chaque année, des vies humaines, des grandes superficies de forêts, et faire l'économie des dépenses si les populations étaient mieux informées et formées en matière de prévention et de lutte contre les feux. Les pays européens dépensent, chaque année, des milliards d'euros pour la lutte contre les incendies de forêts et pour les subventions de reboisement.
- La prévention et la lutte doivent impliquer en premier lieu les riverains à proximité des forêts. Investir dans l'information et la formation en matière de lutte contre les feux de forêts réduira aussi bien le nombre de ces foyers ainsi que les coûts de leur extinction. Aussi longtemps que les populations ne réaliseront pas le danger qu'il y a à allumer un feu en pleine forêt sans prendre de précautions, surtout en période sèche, les feux vont continuer à ravager chaque année des grands espaces forestiers de notre planète.
- Le coût d'une campagne d'éducation en matière de lutte contre les feux de forêts est dérisoire comparé aux coûts d'un Canadair. Avec le prix de ce dernier, on pourrait informer et former des millions de personnes en prévention et lutte contre les feux de forêts.

PROBLEMATIQUE DU CRIQUET PELERIN EN ALGERIE.

Belazzougui Mustapha - Département de lutte antiacridienne – INPV.

Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural

Institut National de la Protection des Végétaux

RESUME

Le criquet pèlerin, *Schistocerca gregaria* (Forsk., 1775), est un fléau dont la biologie est bien connue le classant comme le plus redoutable, il constitue une menace permanente, surtout en période d'invasion et les conséquences peuvent être désastreuses pour les pays dont l'économie repose essentiellement sur l'agriculture. L'Algérie, comme tous les pays de la commission de Lutte contre le Criquet pèlerin en Région Occidentale (CLCPRO), a adopté la stratégie de la lutte préventive en période de rémission, qui consiste à surveiller en permanence les aires primaires qui se trouvent dans les régions sahariennes afin de limiter les risques d'invasion ; cas de l'invasion 2004/05.

Mots clés : *Criquet pèlerin, Biologie, Lutte préventive, Invasion 2004/05.*

INTRODUCTION

Le Criquet pèlerin (*Schistocerca gregaria* Forsk. 1775), est un insecte très redouté en raison de l'ampleur des dégâts qu'il peut provoquer, en période d'invasion, aux productions agrosylvo-pastorales et des perturbations socio-économiques qui peuvent en résulter.

Les conséquences de ces invasions peuvent être désastreuses. De plus, les quantités considérables d'insecticides généralement utilisées pour les opérations de lutte peuvent entraîner de graves préjudices à l'environnement.

AIRE DE REPARTITION

✓ Dans le monde

En période d'invasion, l'aire de répartition du criquet pèlerin s'étale sur une trentaine de millions de kilomètres carrés, regroupant une cinquantaine de pays qui se situe au niveau des régions arides et semi-arides s'étendant de la côte-ouest Africaine jusqu'à la frontière Indo-Pakstanaise, divisés en trois zones :

- Zone centrale : régions des bordures Ouest et Est de la mer rouge ;
- Zone orientale : régions frontalières de l'Inde, du Pakistan et de l'Iran ;
- Zone occidentale : régions frontalières Algéro-Nigéro-Malienne et le Centre est de la Mauritanie.

L'aire d'invasion, est beaucoup plus vaste puisque les vols de criquets remontent au nord jusqu'à la méditerranée et même au-delà.

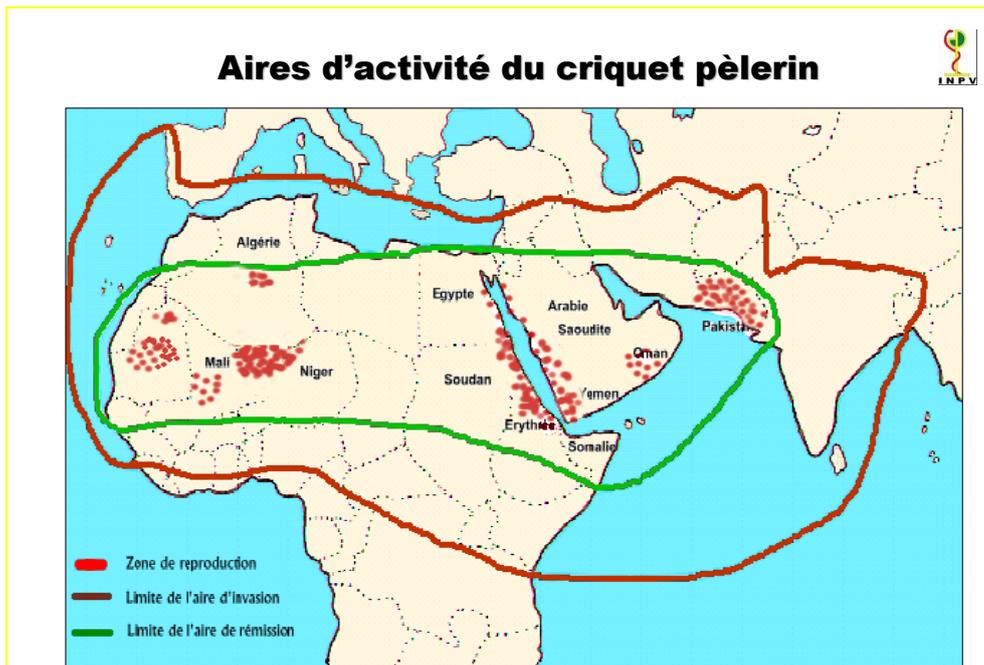


Photo FAO

✓ **Aire d'habitat en Algérie**

L'Algérie, de part sa situation géographique, abrite les zones potentielles de survie et de multiplication du criquet pèlerin, réparties sur tout le Sahara.

Deux types de reproduction sont fréquents en Algérie en période de rémission comme en période d'invasion; la reproduction estivale et la reproduction printanière.

La reproduction estivale concerne toutes les régions du Sahara Méridional, situées au sud de la latitude 24°N. Il s'agit particulièrement des zones d'écoulement et d'épandage des eaux de pluie du sud de l'Ahnet et du Tamesna. La reproduction printanière quant à elle, survient en période de rémission dans les oueds et les maaders du Sahara central.

L'Algérie constitue également lorsque les conditions écologiques sont favorables une zone de reproduction pour les populations allochtones. Ces populations proviennent :

- ✓ Des pays sahéliens limitrophes (Mali et Niger) à la fin de la reproduction estivale ;
- ✓ De la frontière Ouest (Mauritanie et Maroc) en période de reproduction hivernau printanière.

Par ailleurs, il y a lieu de signaler qu'à la fin de la reproduction hiverno-printanière, les populations qui échappent aux traitements, en Algérie, peuvent envahir à leur tour les pays du Sahel (Mali, Niger).



Photo INPV

BIOLOGIE

Le criquet pèlerin est un insecte de grande taille de 6 à 6,5 cm d'envergure, les ailés matures sont connus par la couleur jaune, ainsi que les ailés immatures par la couleur rose.

Le criquet pèlerin se présente sous deux formes ou phases, solitaire et grégaire, le passage entre les deux (solitaire et grégaire) se fait par une phase intermédiaire, la phase transiens, qui se traduit par des modifications profondes de la morphologie, de l'anatomie, de la physiologie et du comportement du criquet.

✓ **Cycle biologique**

Le criquet pèlerin comme tous les acridiens, passe par trois évolutions : œuf, larve et ailé.

Les œufs sont pondus dans un sac l'oothèque, le nombre moyen d'œufs par oothèque varie entre 60 et 80 œufs, chaque femelle peut pondre de 2 à 4 fois au cours de sa vie.

Le développement larvaire du criquet pèlerin se fait par cinq stades (six stades chez les solitaires) pour arriver au stade imaginal (jeune ailé). La durée moyenne de développement larvaire est de 35 à 40 jours :

- Stade 1 : 5 jours
- Stade 2 : 6 jours
- Stade 3 : 7 jours
- Stade 4 : 8 jours
- Stade 5 : 12 jours

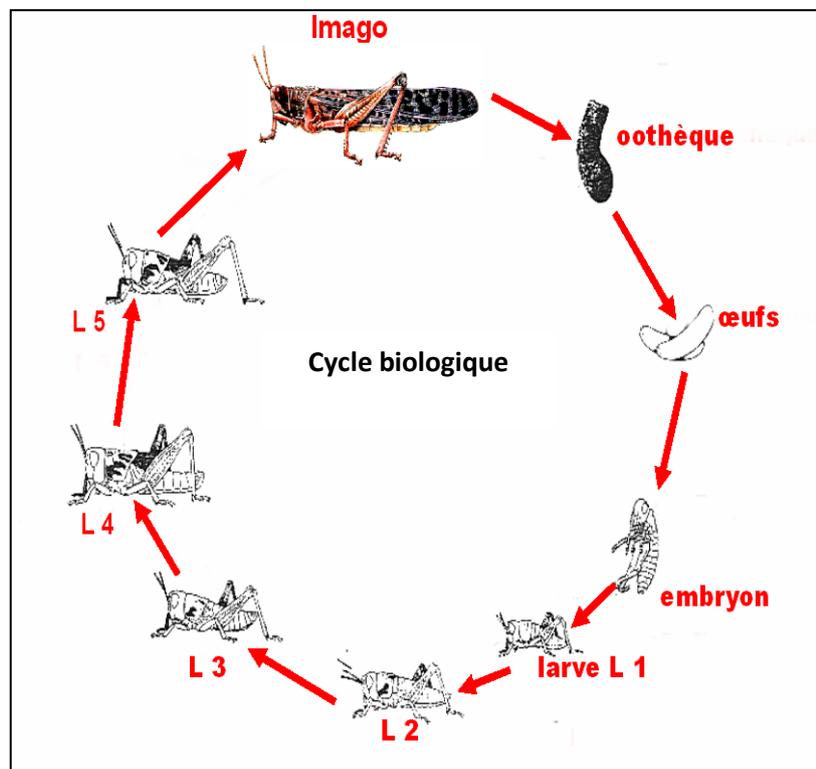


Photo INPV

DEGATS / IMPORTANCE ECONOMIQUE

L'importance économique du criquet pèlerin résulte dans les dégâts considérables causés sur les productions agro-sylvo-pastorales. En effet, un criquet ailé de 2 g, consomme l'équivalent de son propre poids par jour de végétation, dont un essaim moyen contient environ 50 millions d'individus peuvent consommer 100 tonnes de matériel végétal par jour et 3 000 tonnes durant sa vie.

Aussi, une invasion de 50 essaims engendre environ 150 000 tonnes de pertes en matériel végétal.

La stratégie de lutte préventive en période de rémission est un choix raisonnable et incontournable comme dans tous les autres pays de la région, les équipes surveillent en permanence les zones abritant les foyers primaires de multiplication et les détruisent systématiquement, se traduisant comme suit :

Surveiller les conditions écologiques (données météorologiques, existence d'une végétation dans les aires potentielles de reproduction et de grégarisation) ;

- Prospecter les aires devenues potentiellement favorables à la suite de précipitations ;
- Déclencher immédiatement des opérations de lutte adéquate dès que le nombre de criquet dépasse un certain seuil ;
- Protéger prioritairement les zones cultivées au cas où une infestation massive se produit.

L'organisation responsable pour l'application de cette stratégie est L'Institut national de la protection des végétaux est soutenu par d'autres organismes et administrations concernés.

ROLE DE L'INSTITUT NATIONAL DE LA PROTECTION DES VEGETAUX

La lutte antiacridienne, en Algérie, est du ressort du Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural qui a chargé l'Institut National de la Protection des Végétaux (INPV), par l'intermédiaire du Département de Lutte Antiacridienne, de gérer le problème acridien.

Ses missions consistent à :

- ✓ Organiser et conduire en période de rémission les opérations de surveillance et de lutte contre le criquet pèlerin ;
- ✓ Elaborer et Coordonner en période d'invasion les opérations de lutte contre criquet pèlerin et le Criquet marocain.

L'Algérie comme tous les pays de la commission de Lutte contre le Criquet pèlerin en Région Occidentale (CLCPRO), a adopté la stratégie de lutte préventive en période de rémission, qui consiste à surveiller en permanence les aires primaires qui se trouvent dans les régions sahariennes et fonctionnent de manière saisonnière.

- ✓ Sahara Méridional, région sous influence du Front Inter Tropical (FIT), bénéficiant des pluies d'été et où a lieu la reproduction estivale.
- ✓ Sahara Central, soumise aux dépressions provenant du Nord et de l'Atlantique et où a lieu la reproduction hiverno-printanière.

Zones et moyens de prospection « criquet pèlerin »

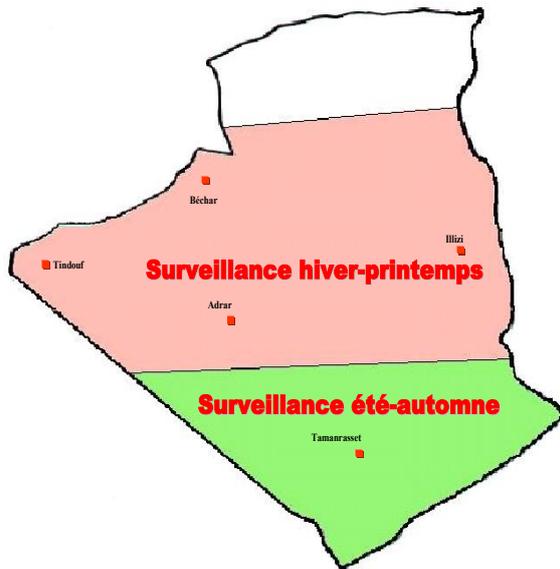
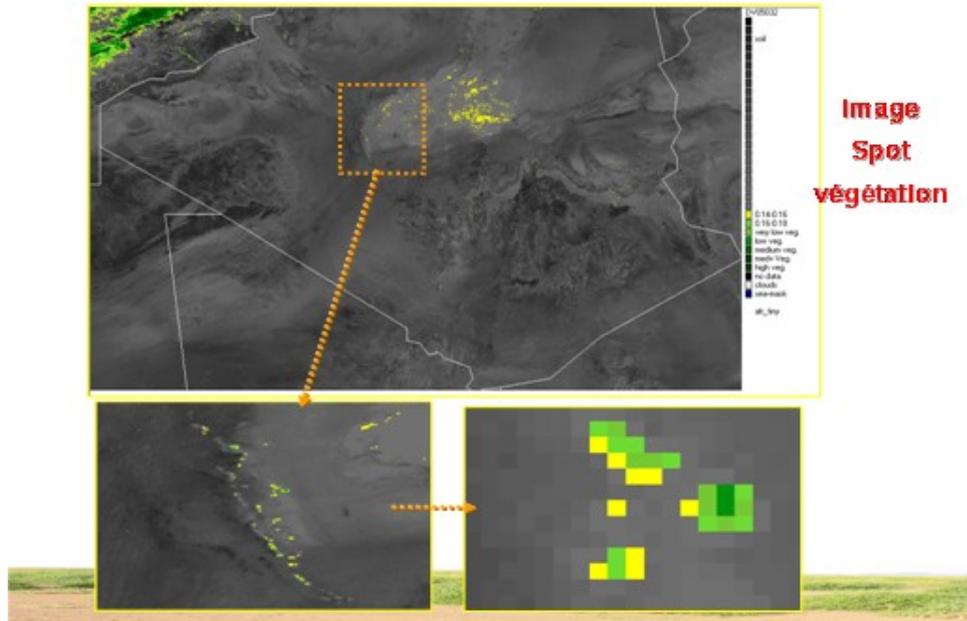


Photo INPV

- La lutte préventive est assurée par des équipes spécialisées de l'INPV qui sillonnent le Sahara au moyen de véhicules légers tous terrains et des véhicules lourds équipés d'appareils de traitement.
- Vu l'immensité du territoire national, notamment le Sahara où se trouvent les zones à criquet pèlerin, l'INPV a mis en place des bases régionales de lutte antiacridienne réparties de telle façon à couvrir les sites potentiels recensés à la suite des précédentes campagnes de surveillance et de lutte). Le matériel roulant et de traitement ainsi que les produits acridicides y sont stockés pour pouvoir être mobilisés rapidement en cas de déclaration d'infestations.
- Le déploiement des équipes de surveillance et de lutte sur le terrain s'opère en fonction des conditions écologiques qui sévissent dans les zones abritant le criquet pèlerin. Pour cela, l'INPV utilise les données météorologiques que lui fournit l'Office National de Météorologie.
- Les renseignements qui parviennent à l'INPV, de la FAO et des pays de la commission contribuent également dans les prises de décisions nationales grâce aux informations régionales sur la situation acridienne.
- Depuis 2002, l'INPV utilise pour les besoins de la lutte antiacridienne des images satellitaires pour la mise en évidence des traces de verdure dans les steppes et dans les dépressions des oueds (type Spot Végétation).



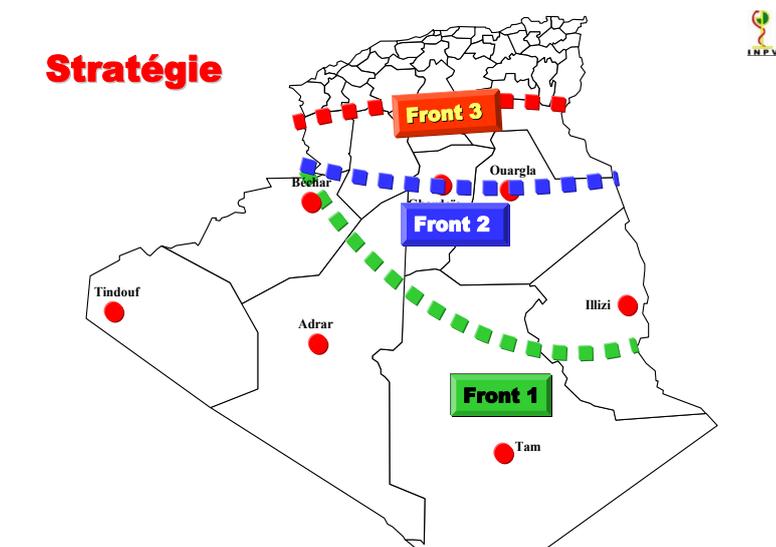
**Image
Spot
végétation**

Photo FAO

Les images satellitaires ont permis à l'INPV de déployer ses équipes au niveau des zones vertes repérées par satellites et pouvant abriter des populations acridiennes.

ORGANISATION DU DISPOSITIF DE SURVEILLANCE ET DE LUTTE LORS DE L'INVASION 2004/05

- L'invasion acridienne a concerné 30 wilayas. Le dispositif a été organisé en trois fronts pour faire face aux mouvements progressifs des essaims.
- Premier front: concerne les 07 wilayas frontalières qui ont été infestées par les premiers essaims infiltrés à partir de la Mauritanie et du Maroc dès la fin du mois de février 2004 ;
- Deuxième front: concerne les 08 wilayas du Sud de l'Atlas Saharien, infestées depuis le mois de mars 2004 ;
- Troisième front: concerne les wilayas des hauts plateaux et les wilayas Telliennes, infestées au mois de mai 2004.



Stratégie

Au niveau de chaque front, des moyens d'intervention ont été mis en place représentés par des véhicules tout terrain de prospection, des véhicules tout terrain de traitements, des quantités importantes de pesticides, des moyens de navigation et des moyens de transmission.

Tout le dispositif national reposait sur plusieurs acteurs relevant de divers services, encadrés par les techniciens de l'INPV qui les accompagnaient en leur assurant des cycles réguliers de formation.



Photo INPV

✓ Bilan de l'invasion:

La campagne de l'invasion acridienne a duré presque deux ans avec près de 4,6 millions d'hectare traités, 30 wilaya touchées.

Les dégâts légers sur vergers en zones steppique et saharienne, nuls en zones agricoles Nord.

CONCLUSION

La lutte préventive reste un choix raisonnable et le plus approprié pour mener à bien cette mission avec un système d'alerte précoce. Il faut améliorer la localisation et la cartographie des biotopes potentiels du criquet pèlerin, et disposer de moyens pour contrôler régulièrement l'évolution des conditions écologiques (pluies, végétation) pouvant favoriser la reproduction, la concentration et la grégarisation des populations acridiennes, pour cela des équipes de prospection doivent être déployées durant toute l'année dans ces aires grégarigènes, afin de limiter les risques d'invasion.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

1. **CHARA B., 1995c** - Eléments sur la biologie et l'écologie du criquet pèlerin *Schistocerca gregaria* (Forskäl, 1775). Stage de formation en lutte antiacridienne. 17 – 27 septembre 1995, Ed. INPV-OADA., El Harrach, Alger.
2. **CHARA B. 1998**, *Organisation de la lutte antiacridienne en Algérie*. Historique et évolution des moyens- CLCPANO : Alger, : 53p.
3. **DURANTON J.-F., LECOQ,M. & RACHADI T., 1995**. - *Stratégies de lutte antiacridienne contre le Criquet pèlerin* : concepts, contraintes, perspectives. - CIRAD-GERDAT-PRIFAS : Montpellier. - 25 p.
4. **INPV, 1988 /2009-** *Bilans de la lutte antiacridienne*. Ed. Institut National de la Protection des végétaux. 12p.
5. **INPV, 2004** – *Stratégie de prospection et de lutte contre le criquet pèlerin*. Ed. Institut National de la Protection des Végétaux, 15p.
6. **MOUMENE K – LAZAR M – CHAOUCH A, 2005** – *Le Criquet pèlerin un redoutable envahisseur*. Rev Inva Agriculture et développement N°1 pp : 07-21
7. **LAZAR M., 2005** – *Zones de reproduction potentielle du criquet pèlerin Schistocerca gregaria (Forsk., 1775) dans le Sud algérien : délimitation et suivi de l'évolution de la végétation aux moyens d'images satellitales*. Thèse Magister scien. agro., Inst. nat. agro., El-Harrach, 76 p.
8. **LECOQ M., 2005**. - Enseignements de la récente invasion du Criquet pèlerin en Afrique - 7^e Conférence internationale sur les ravageurs en agriculture, Montpellier, France, 26-27 octobre 2005. - AFPP-Association française de protection des plantes : Paris. - p. 114
9. **MOUMEN K., 2002** - *Organisation et fonctionnement de la lutte antiacridienne en Algérie*. Ed. Institut national de la protection des végétaux, El-Harrach 10 p.
10. **MOUMEN K., 2005-** L'invasion acridienne 2003/2004 en Algérie : Gestion et moyens pour y faire face. 6^{ème} journ. Protec. Végét. Inst. Nati., 6 mars 2005, El Harrach p.12.
11. **SYMMONS P.M. et CRESMAN K., 2001** –*Directives sur le criquet pèlerin - Biologie et comportement*. Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture, Rome.

I. RISQUES CLIMATIQUES

2- INONDATION

**LE RISQUE D'INONDATION DANS LA VALLEE DU RHONE.
DEMARCHES RECENTES DE
RECHERCHE/COMMUNICATION/GESTION
CONDUITES DANS LE CADRE DU PLAN RHONE**

¹Jean-Paul BRAVARD, ¹ Institut Universitaire de France, UMR 5600 Université Lumière-Lyon 2

²Claire COMBE ² docteur en géographie, ingénieur-consultant

INTRODUCTION

Près une quarantaine d'années caractérisées par un grand calme hydrologique, la vallée du Rhône a connu près de 15 ans de crues sévères (1990-2003). Elles ont motivé des études, une large concertation entre l'Administration, les collectivités territoriales et le public, et l'élaboration d'un plan, le Plan Rhône (2006).

Nous présentons ici des études scientifiques dont la finalité est la gestion du risque d'inondation. Après avoir présenté (1) le contexte (le Rhône et son aménagement par la Cie nationale du Rhône), nous verrons successivement : (2) des méthodes d'étude fondées sur la cartographie historique pour l'étude de la vulnérabilité en milieu urbain et périurbain, (3) un atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône, (4) des méthodes de compensation (les Zones d'expansion des crues et les premières réalisations du Schéma de redynamisation du Rhône), (5) une expertise de conciliation entre les riverains inondés et les gestionnaires du fleuve dans un contexte de revendications fortes, (6) enfin un ouvrage de vulgarisation destiné aux riverains du fleuve : *Le Rhône en 100 questions*.

1. Le contexte

Le Rhône draine un bassin versant de près de 100 000 km² si l'on prend en compte la partie suisse de son cours ; sa longueur en France est de 517 km. Le module de ce fleuve, qui est le plus important de France par l'abondance, passe de 350 m³/s dans son parcours intra-montagnard (Savoie) à 600 m³/s à l'entrée de Lyon, 1000 m³/s à l'aval de la confluence de la Saône et enfin 1700 m³/s à Beaucaire, à l'amont du delta de la Camargue.

Les crues centennales (pour prendre la valeur de référence retenue en France ; il s'agit très souvent de la plus forte crue historique documentée) passent de 2500 m³/s en Savoie, à 5400 m³/s à l'entrée dans Lyon et 14 000 m³/s à Beaucaire.

Ces valeurs sont calculées sur des séries qui ont près d'un siècle d'enregistrement homogène (relations hauteur/débit contrôlés) et près de 150 ans de mesure de hauteur d'eau. La chronique des crues montre cependant une forte variabilité temporelle. Ainsi, après avoir connu de fortes crues en 1944, 1955 et 1957, la moyenne vallée du Rhône n'en a pas connu avant celles de 1993, 1994, 2002 et 2003. Ces crues à répétition ont souligné, dans la vallée du Rhône, le retard de l'application de la réglementation, effet de la lenteur de la mise en œuvre des procédures nationales dans la période 1957-1993, caractérisée par la rareté des crues.

Dès 1995, suite aux crues survenues les deux années précédentes, le Ministre de l'Environnement M. Michel Barnier demandait que soient réalisées à l'échelle du fleuve des études portant sur l'occupation des sols du lit majeur, l'hydrologie et les sédiments du Rhône. Mises en œuvre par l'Institution interdépartementale Rhône-Saône (un établissement public de bassin), ces études achevées en 2000-2002 et connues sous l'expression générique d'Etude Globale Rhône, ont permis de dresser l'état des lieux ; elles ont souligné :

- La stationnarité de l'hydrologie depuis plus d'un siècle, ce qui signifie que la période 1957-1993 n'a pas inauguré une nouvelle hydrologie et que les crues fortes doivent revenir ; les épisodes de 2002 et 2003, qui ont été deux crues cinquantennales en deux ans, l'ont démontré.
- Les limites des actions possibles en matière de réduction des aléas sur les affluents (de nouveaux barrages réservoirs sont impossibles)
- L'évolution du lit du Rhône, qui se produit localement de manière défavorable au passage des crues et aggrave de ce fait les inondations à débit égal.
- Le développement économique (agriculture intensive, commerce, artisanat et industrie) et l'extension de l'habitat en zone inondable, ce qui a sensiblement aggravé la vulnérabilité du lit majeur.

Dès 2003, l'Etat a décidé de mettre en place une nouvelle politique, le Plan Rhône. Il a d'abord lancé une lourde mais nécessaire procédure de concertation en mettant en place les « Commissions territoriales de concertation » réunies à l'échelle de trois territoires rhodaniens identifiés dans les études précédentes (Rhône amont, Rhône moyen à l'aval de Lyon, et Rhône aval). Dans le même temps, trois Régions de programme riveraines du fleuve (Rhône-Alpes, Alpes-Provence-Côte-d'Azur et Languedoc-Roussillon) lançaient une procédure concurrente, celles des Etats Généraux ; cette procédure était motivée par la volonté des élus de récupérer au profit du développement local la « rente » du Rhône, générée par la production hydro-électrique du fleuve². La fusion de ces deux démarches sous l'autorité du Préfet de bassin a permis de proposer une nouvelle politique intégrée, le Plan Rhône, qui a été approuvé en 2006. Les actions de ce plan sont aidées financièrement par l'Europe.

Cette contribution présente une partie des recherches effectuées par les auteurs sur le risque d'inondation dans la vallée du Rhône depuis la dernière crue de 2003, principalement dans le cadre du plan Rhône qui est mis en œuvre par la DIREN Rhône-Alpes, devenue DREAL (Direction régionale de l'Environnement, puis Direction régionale de l'environnement, de l'Aménagement et du Logement).

Depuis 1934, la Compagnie Nationale du Rhône est concessionnaire du Rhône avec la mission de produire de l'électricité d'origine hydraulique et de développer la navigation et l'agriculture. Dès sa création la CNR est une société d'économie mixte à majorité de capitaux publics et de collectivités (départements riverains du Rhône en particulier). La construction des ouvrages s'est étalée de 1937 à 1986, le premier ayant été achevé en 1948 (Fig. 1).

De 1948 à 2002, Electricité de France (société publique) a été l'opérateur des ouvrages de la CNR en vertu de son monopole de production et de mise sur le réseau national. Les redevances versées aux actionnaires constituent la rente du Rhône.

Depuis 2002, c'est-à-dire depuis la mise en application de la libéralisation du secteur énergétique voulue par l'Europe, EDF a perdu le monopole que la loi de nationalisation de 1946 lui avait conféré. La CNR, passée sous le régime de droit privé, a récupéré la production de l'énergie (la CNR appartient au Groupe Suez).

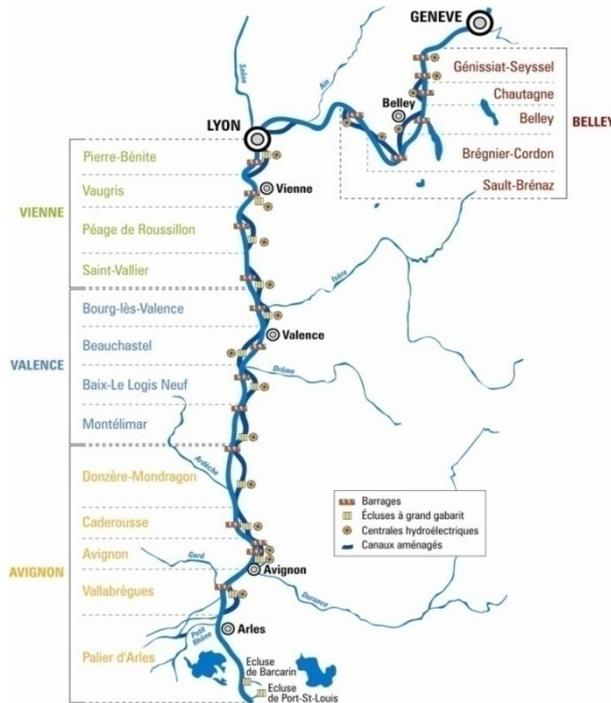


Fig. 1 : L'aménagement du Rhône (source CNR)

2. L'OCCUPATION DES SOLS ET LA VULNERABILITE

2.1. L'approche géohistorique du risque d'inondation et le SIG historique de Lyon

Analyser et gérer le risque en milieu urbain impose de considérer la complexité des phénomènes à l'œuvre, à l'interface nature-société, et de dépasser la lecture traditionnellement admise du binôme aléa/vulnérabilité selon laquelle l'aléa serait une donnée constante – la composante active de l'équation, basée sur l'hydrologie et appréhendée sur des chenaux considérés comme stables - qui s'impose à une société plus ou moins vulnérable en fonction des moyens techniques et financiers dont elle dispose. Il existe en réalité des interactions fortes entre les dynamiques naturelles et sociétales, en particulier en milieu urbain, dont la prise en compte offre une clé de lecture pertinente pour saisir le risque dans toute sa complexité.

Nous synthétisons ici les résultats d'une thèse de doctorat de géographie menée à l'Université Lyon2 (Combe, 2007) à l'échelle du corridor fluvial du Y lyonnais, marqué par l'ancienneté des rapports entre la ville et ses fleuves (depuis l'Antiquité). La croissance de l'agglomération, située au cœur du « Y lyonnais » (fig. 2), entraîne le dépassement des sites primitifs et l'occupation progressive de l'espace alluvial. Le travail a démontré des interactions fortes entre le système fluvial, l'urbanisation et les aménagements suscités par l'agglomération (en lit mineur et en lit majeur) et le risque.



Fig. 2 : Le corridor fluvial du « Y lyonnais »

L'approche combine deux pas de temps :

La longue durée, qui permet une mise en perspective nécessaire pour mieux comprendre le risque et les interactions qui le fondent,

- l'échelle historique et le temps court (les deux derniers siècles). La croissance de la ville de Lyon a motivé la conquête de nouveaux quartiers sur l'espace alluvial à partir de la fin du XVIIIe siècle, qu'on cherche ensuite à protéger contre les inondations. C'est à partir des années 1840 que commence l'essor des grands travaux d'endiguement pour les besoins de la navigation et pour la protection contre les crues. On dispose donc à partir de cette époque d'observations précises et d'une documentation abondante concernant les grandes inondations et leur gestion.

La méthodologie est basée sur la réalisation et l'exploitation d'un atlas constitué de cartes synthétiques et évolutives, obtenues grâce à un SIG historique pris en tant qu'outil d'analyse diachronique et spatial des différentes composantes du risque et de leurs interactions (Combe, 2007 et 2008). Il s'agit de territorialiser le risque, de réinscrire le risque actuel dans un continuum historique, d'identifier et d'expliquer ses permanences et ses évolutions.

Le SIG historique associe des fonds de carte (images raster géoréférencées) à des objets géographiques vectoriels renseignés par une base de données. Il s'appuie sur un corpus de cartes anciennes couvrant l'agglomération lyonnaise sur la période d'observation (tous les vingt à cinquante ans de la fin des années 1830 à l'actuel).

Les tables vectorielles sont constituées des éléments permettant de décrire et comprendre les dynamiques qui conditionnent le risque. Ces données peuvent être regroupées en fonction de plusieurs groupes de critères, en particulier :

- les éléments permettant de mesurer l'aléa et son évolution, qui décrivent les phénomènes de crue et d'inondation historiques et théoriques (modélisation).
- ceux relatifs aux aménagements réalisés dans le corridor fluvial (lit mineur et plaine alluviale) susceptibles d'avoir un impact sur le risque.
- ceux rendant compte de l'occupation des sols et de l'évolution des enjeux de l'inondation, qui renseignent sur la vulnérabilité et sur la dynamique de l'urbanisation de la plaine.

La base de données est alimentée le recoupement et l'analyse critique de sources documentaires écrites, photographiques et cartographiques disponibles. Ce travail d'archives est complété par un travail de terrain et d'enquête auprès des acteurs de la gestion. Les objets spatio-temporels nécessaires à l'étude ont été cartographiés à partir des fonds de cartes anciens géoréférencés.

Le SIG historique permet d'identifier les secteurs où le risque évolue et de mesurer cette évolution. Les cartes obtenues s'accompagnent d'un discours explicatif et permettent de comprendre le risque actuel à la lumière des interactions entre l'hydrosystème et l'aménagement de la plaine suscité par l'urbanisation. Ces héritages jouent un rôle actif dans la configuration actuelle du risque d'inondation ; leur prise en compte peut éclairer les choix de gestion à venir. Nous présentons et commentons ci-après quelques exemples des cartes synthétiques obtenues sur l'agglomération de Lyon.

La démarche constitue un outil d'aide à la gestion fondé sur une analyse globale des phénomènes, qui complète efficacement l'approche de l'ingénieur. Il permet d'évaluer l'impact des politiques de gestion et de territorialiser le risque d'inondation. Les cartes obtenues offrent une base objective et partagée par les différents acteurs, condition essentielle d'une concertation efficace en vue de mettre en œuvre des mesures adaptées à la réalité du risque sur les territoires concernés.

En tant qu'outil de sensibilisation des populations, le SIGéohistorique contribue à recréer et à promouvoir une certaine culture du risque en milieu fluvial urbain et périurbain. A Lyon, il est actuellement exploité à cette fin et en direction du grand public dans le cadre du Plan Rhône. Un des objectifs souhaité par l'Etat est de compléter les dispositifs institutionnels de gestion du risque et de réduire la vulnérabilité individuelle en modifiant les pratiques des riverains potentiellement exposés aux inondations du Rhône.

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles
Stratégies de prévention et de protection

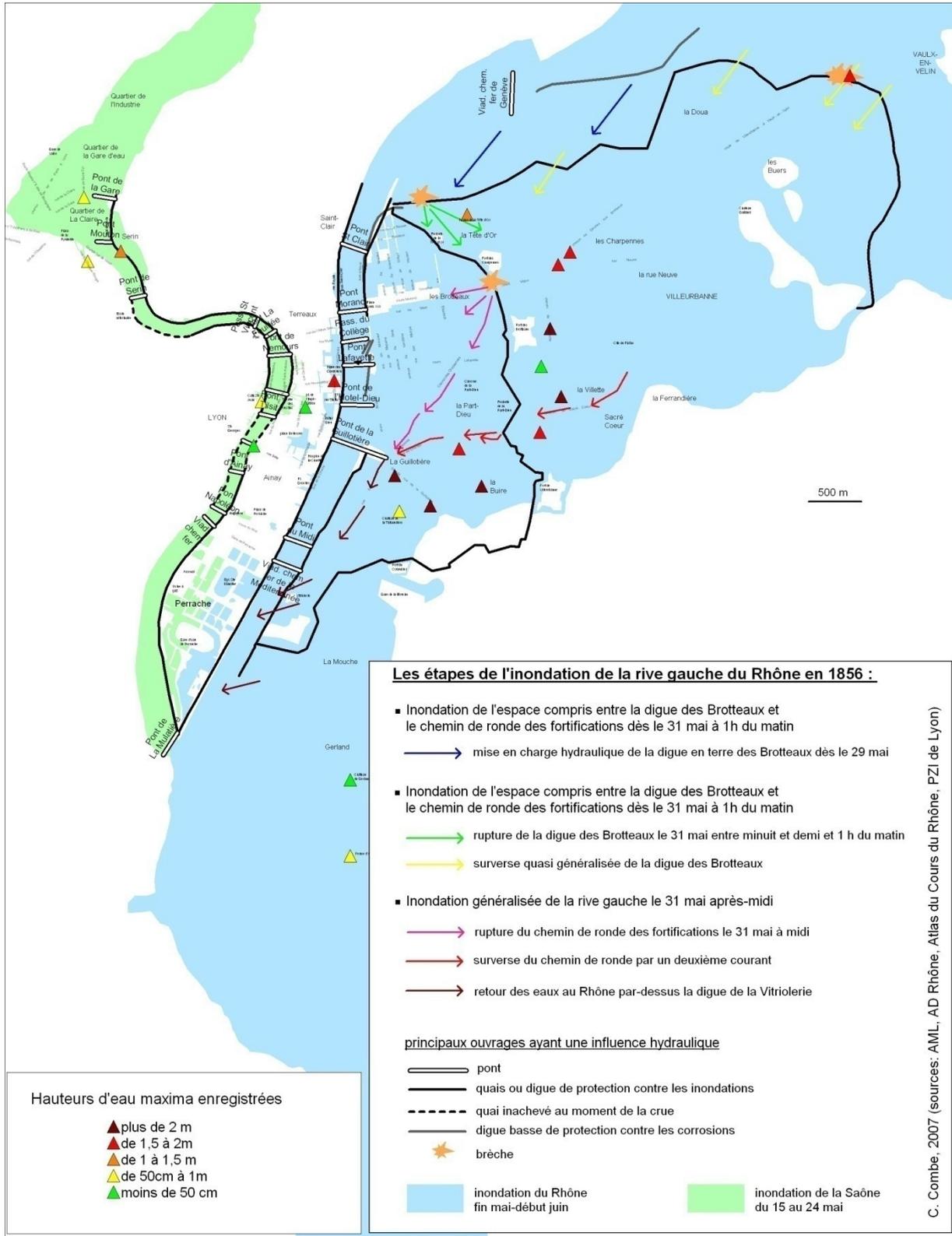


Fig. 3 : L'inondation de la Saône et du Rhône en 1856

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

Commentaire : cartographie des crues historiques

Afin de mieux comprendre les caractéristiques spatiales de l'aléa au milieu du XIX^e, et de pouvoir analyser l'évolution du champ d'inondation en relation avec les aménagements entrepris au cours de la période d'étude, nous avons réuni et cartographié les informations disponibles concernant les événements de 1840 et 1856 dans le « Y lyonnais ». Ces deux crues correspondent respectivement aux maxima historiques de la Saône et du Rhône. Cette cartographie a depuis été reprise par le Service Navigation dans le cadre de la mise à jour de la cartographie réglementaire du risque sur le territoire du Grand Lyon (Plan de Prévention du Risque Inondation élaboré par les services de l'Etat) qui prévoit notamment l'affichage du périmètre inondé par la plus forte crue connue.

La dynamique de l'inondation a été étudiée afin de comprendre la logique de mise en eau de la plaine (reconstitution de la chronologie de l'inondation, analyse de la logique de mise en eau et identification des différents temps de l'inondation : points de débordement, courants principaux, prise en compte des ouvrages de protection et de leur rôle pendant la crue, localisation des points de rupture, cartographie des hauteurs d'eau connues en différents points de la plaine). La figure 3 illustre ce travail de synthèse pour la crue de 1856.

Les crues du milieu du XIX^e s. marquent un tournant dans la politique de gestion des inondations car elles ont précipité la volonté d'affranchir la ville de la contrainte fluviale. L'Etat et la Ville vont tirer les leçons de la catastrophe et unir leurs efforts pour mettre en œuvre un dispositif de défense. La crue de 1856 a montré le rôle stratégique des champs d'inondation dans l'atténuation des niveaux à Lyon. Les ruptures de digues ont prouvé qu'il n'est pas possible d'endiguer complètement un cours d'eau car cela rehausse le niveau des crues et entraîne la ruine du dispositif de protection.

La loi de 1858 instaure une logique amont/aval dans la gestion des inondations: les villes seront protégées par des digues et l'efficacité de l'endiguement sera garantie par la préservation des champs d'expansion des crues à l'amont des centres urbains.

Ces principes de gestion et les aménagements mis en œuvre sont autant d'héritages qui vont durablement influencer le risque d'inondation au sein du « Y lyonnais ».

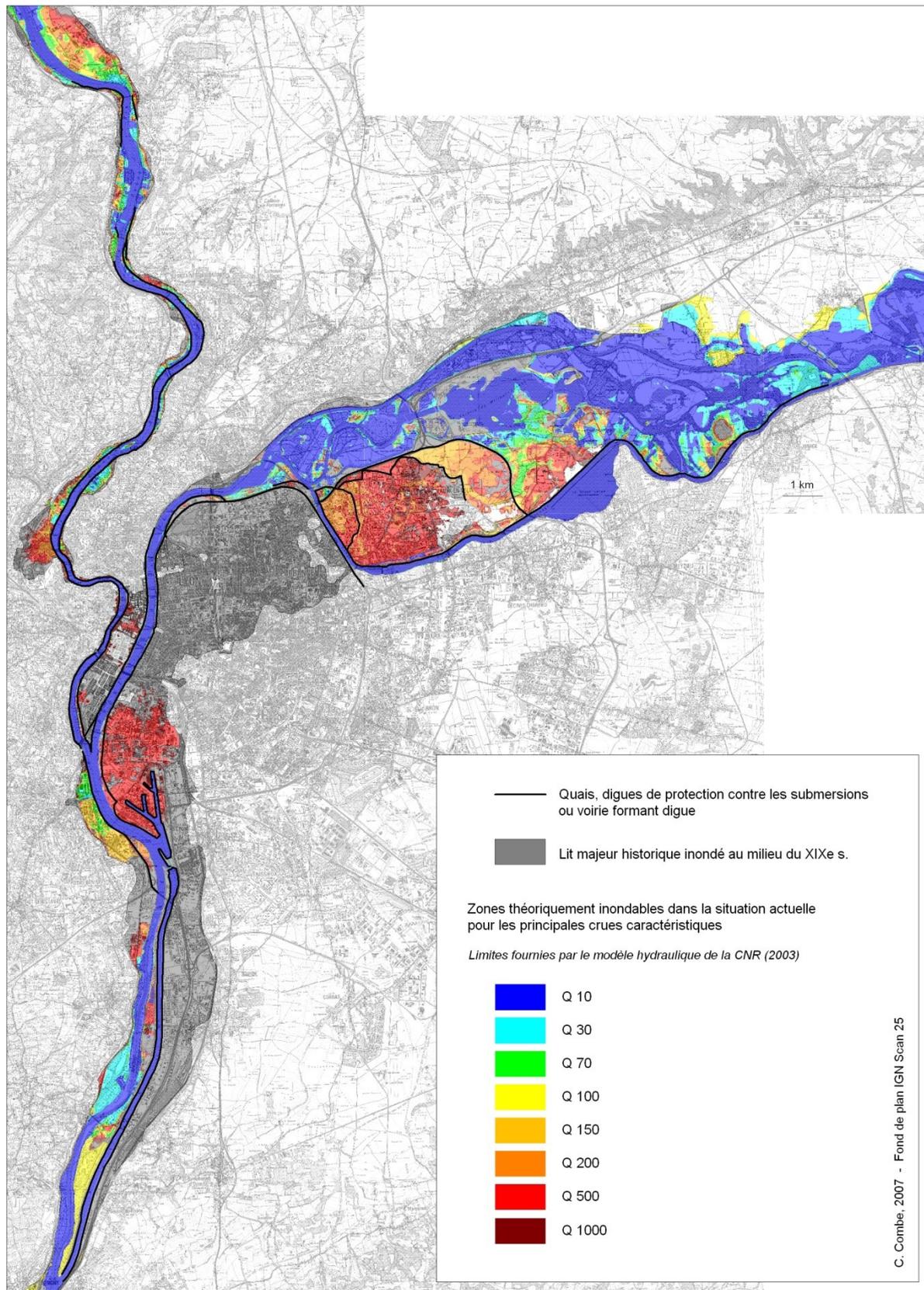


Fig. 4 : Evolution générale des zones inondables dans le « Y lyonnais » depuis 150 ans

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

Commentaire : spatialisation de l'aléa et diagnostic de son évolution

Une étude comparée des zones inondées aux différentes dates (fig. 4) permet un diagnostic de l'évolution du champ d'inondation depuis les grandes crues de 1840 et 1856, qui délimitent le lit majeur historique avant la réalisation de l'essentiel des aménagements et l'enregistrement des impacts sur l'hydrosystème. Pour ce faire, nous avons cartographié les surfaces mises en eau par les crues historiques et par celles calculées dans la situation actuelle pour les différents débits de référence. La plupart des couches sont des « zooms » sur certains secteurs car l'information n'existe pas partout. On trouve certaines informations ponctuelles sur le sens d'écoulement, les hauteurs d'eau, les destructions du bâti, donnant une idée des vitesses, dans la littérature et dans les différentes archives ; l'étude de la presse écrite permet parfois de compléter l'information.

L'analyse de l'extension des inondations est complétée par la prise en compte des hauteurs d'eau et par celle de la logique de mise en eau et de ressuyage des crues. Finalement, l'aléa est appréhendé dans ses quatre dimensions spatio-temporelles : son extension spatiale et dynamique (logique de la mise en eau et périmètre inondé), les hauteurs atteintes par la lame d'eau, sa durée - lorsque l'information existe - et son évolution dans le temps.

Les couches ainsi réalisées permettent de spatialiser l'aléa et de diagnostiquer son évolution. La comparaison du lit majeur naturel et de la situation actuelle montre une nette contraction du champ d'inondation, excepté à l'amont de Lyon, en rive droite du canal de Miribel, où l'aléa a plus que doublé (Combe, 2001 et 2004). Cette évolution est essentiellement due à des causes anthropiques. Elle résulte des actions humaines suscitées par l'urbanisation, qui ont un impact direct et indirect sur le risque.

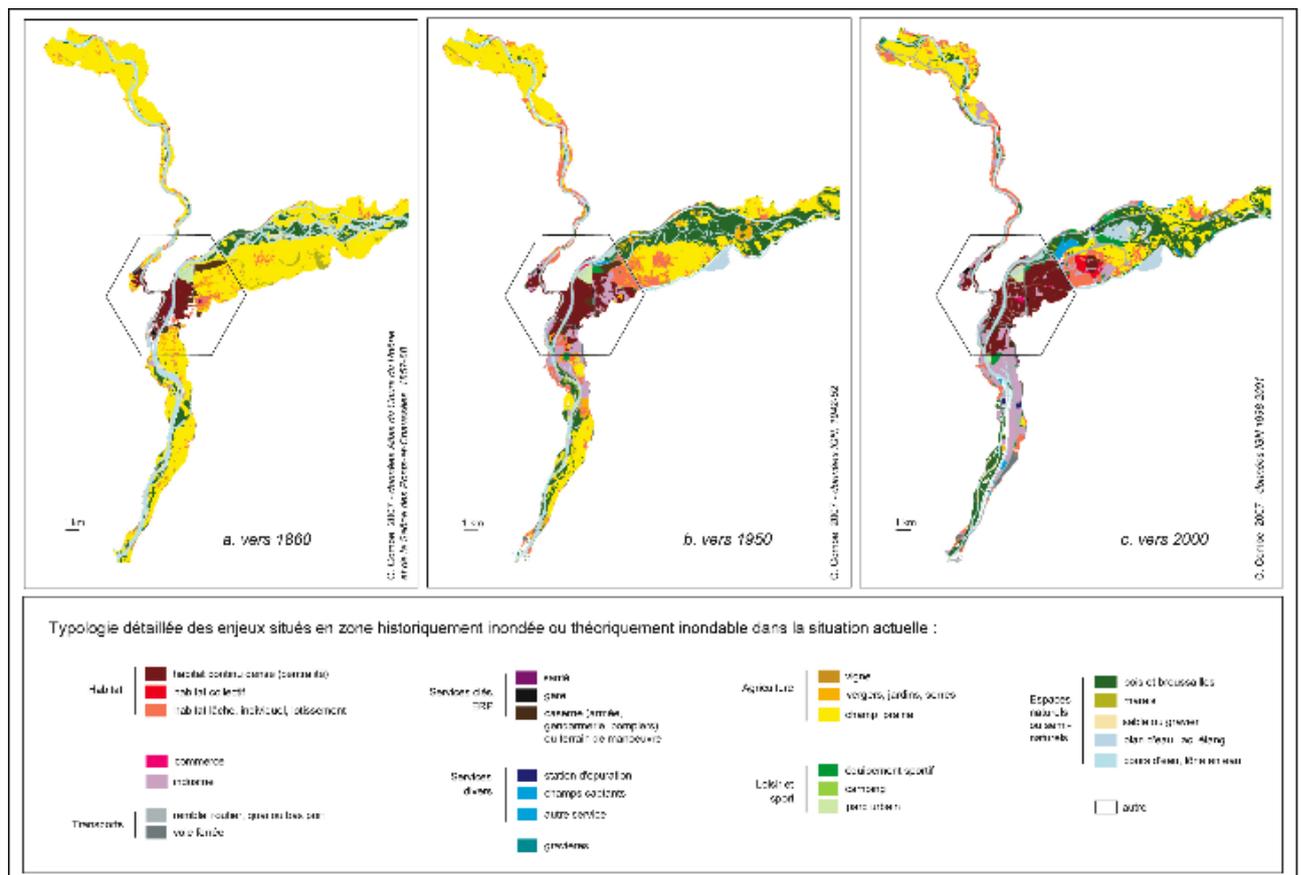


Fig. 5 : Synthèse de l'évolution des enjeux de l'inondation dans le « Y lyonnais » depuis 150 ans.

Commentaire : évolution de la vulnérabilité à travers la cartographie de l'occupation du sol

Au cours du XX^e siècle, on assiste à une aggravation silencieuse du risque dans une période marquée par l'absence de forte crue. L'extension de l'urbanisation et les aménagements qu'elle suscite modifient l'aléa, mais également la vulnérabilité. Afin de pouvoir quantifier l'évolution de l'occupation du sol et d'estimer ainsi l'évolution de l'endommagement matériel potentiel, nous avons réalisé une typologie sommaire des enjeux de l'inondation, sur la base des catégories souvent retenues par les méthodes d'analyse quantitative de la vulnérabilité (Ministère de l'Environnement, 1999).

Les cartes obtenues (fig 5) et leur exploitation permettent une approche territoriale des enjeux socio-économiques de l'inondation et montrent une tendance constante à l'urbanisation du corridor fluvial. Vers 1860, l'urbain se limitait à la ville intra muros tandis que l'essentiel du corridor était marqué par une activité rurale adaptée à la submersion. La carte des enjeux en 1950 montre la croissance de l'agglomération au-delà des limites du milieu du XIX^e siècle ; les activités industrielles se sont développées, et les marges restent encore largement rurales. La situation actuelle montre une forte augmentation et une diversification des enjeux au sein de la plaine dans la deuxième moitié du XX^e siècle. Potentiellement, la ville est donc plus vulnérable du fait de la multiplication et de la diversification des enjeux au sein de la plaine.

2.3. Le concept de l'enveloppe fluviale ajustable et modifiable

L'équation « classique » du risque (R) le met en relation avec l'aléa (A) et la vulnérabilité (V) sous la forme $R = A \times V$. En d'autres termes, on peut réduire le risque en jouant sur A et/ou sur V ; inversement le risque peut s'accroître si l'aléa s'aggrave ou si la vulnérabilité augmente dans un lit majeur. En fait, l'histoire hydro-géomorphologique détaillée d'un fleuve comme le Rhône, très sensible à la dynamique des flux d'eau et de sédiments (voir infra point 3.3 pour un exposé raide de la théorie) dans un contexte de forte énergie, suggère de modifier (complexifier) l'équation du risque (fig. 6 et commentaire).

Le schéma suggère de surveiller attentivement l'évolution morphodynamique de tronçons fluviaux appartenant à des cours d'eau ajustables. A l'échelle de décennies, voire moins, l'enveloppe fluviale est susceptible de se modifier et de changer les conditions de l'aléa et donc de la vulnérabilité. L'exemple de Lyon (ci-dessus), de la vallée du Rhône à l'Holocène (infra : 3.3) et du secteur de Printegarde (ci-dessous : 4) en donnent des illustrations concrètes.

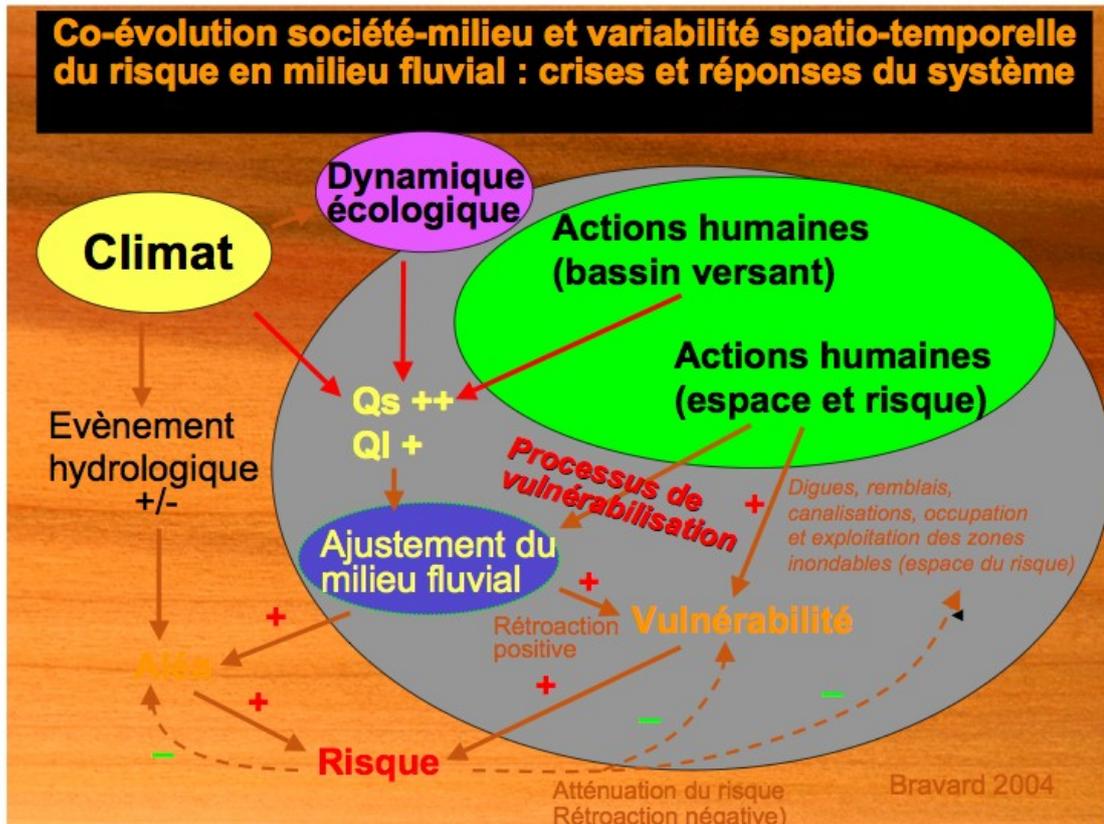


Fig. 6 : Graphe de la co-évolution société-milieu et de la variabilité spatio-temporelle du risque en milieu fluvial

Encadré :

Le climat est une « variable externe » du système ; il contribue à modifier les flux de sédiments grossiers (Q_s) et les flux d'eau (Q_l) produits par un bassin versant ; il est à ce titre une variable essentielle de la dynamique écologique de l'espace. Mais le bassin versant est aussi un territoire soumis aux actions humaines ; le déboisement, la mise en culture affectent la sensibilité des pentes à l'érosion et au ruissellement, ce qui est l'autre possibilité de jouer sur les variables Q_s et Q_l (dans le sens Q_s^{++} et Q_l^+ par exemple). Pour la théorie du système fluvial, voir Schumm 1977³.

Les flux Q_s et Q_l sont elles-mêmes des variables d'entrée du système fluvial. Un excès relatif de flux solides grossiers entrants affecte la charge de fond en transit ; l'évacuation de cette charge peut ne pas être assurée par les flux liquides (en fait les crues formées par les précipitations tombant dans le bassin versant). Le lit s'exhausse, souvent s'élargit : on dit que le système fluvial s'ajuste et recherche un nouvel équilibre. En d'autres termes, la géométrie de l'enveloppe fluviale est un ensemble de variables d'ajustement.

Une telle évolution du lit aggrave l'aléa hydrologique (le niveau de la crue), donc le risque pour les sociétés riveraines (c'est une rétroaction positive). A l'échelle de la société, toute action exercée dans le lit mineur ou le lit majeur du cours d'eau peut modifier la dynamique des flux Q_s et Q_l , donc provoquer un ajustement fluvial porteur d'une aggravation du risque d'inondation.

³ SCHUMM S.A., 1977: *The Fluvial System*. J. Wiley and Sons, New-York.

3 – VERS UN « ATLAS DE REFERENCE DU RHONE » OU LE FLEUVE ET SA MEMOIRE DU RISQUE

Dans le cadre du Plan Rhône, la DIREN de bassin a souhaité construire un outil de connaissance détaillé à l'échelle des territoires de la vallée.

3.1- Eléments de politique générale pour un atlas du risque dans la vallée du Rhône
La Délégation de bassin Rhône-Méditerranée (DREAL) a souhaité se doter progressivement d'outils de connaissance du territoire à l'échelle de la vallée, en complément des résultats acquis dans le cadre de l'Etude Globale Rhône (cf supra). « La responsabilité de l'Etat dans le domaine des inondations repose en premier lieu sur l'information des populations, la maîtrise de l'urbanisation dans les zones inondables, la préservation des zones naturelles d'expansion des crues et la gestion de crise ». L'établissement d'une cartographie des zones inondables a été considéré comme une démarche prioritaire. « La constitution à l'échelle des bassins hydrographiques d'un document de référence sur les phénomènes d'inondation contribue à développer la conscience du risque chez les populations exposées. Il favorise une approche plus globale des phénomènes de submersion et de la répartition des enjeux ou des aménagements concernés. Il sera essentiel pour fournir de l'information sur les secteurs à risque, pour permettre de mieux saisir les opportunités de développement en dehors des zones inondables et aider à une prise de conscience du risque chez les populations exposées. C'est la bonne échelle pour appuyer les différents choix d'aménagement ou de priorités d'action effectués dans le domaine de la gestion des risques pour les personnes, les biens ou l'environnement » (DREAL, Délégation de bassin).

L'« Atlas des zones inondables de la vallée du Rhône » a pour objectif de :

- Comprendre les évolutions du cours d'eau, qu'elles soient d'origine naturelle ou anthropique, de leurs interactions et de leurs conséquences sur la morphologie du fleuve. Cette connaissance de l'histoire du fleuve et de sa vallée est jugée « primordiale » car elle doit contribuer à entretenir « une conscience du fleuve »
- Qualifier l'aléa : crues de référence, historiques, exceptionnelles. Il s'agit notamment d'améliorer la compréhension du fonctionnement actuel de la plaine alluviale.
- Evaluer et quantifier dans l'espace les enjeux,
- Informer le public sur la localisation des zones inondables
- Fournir une information globale et homogène sur tout l'espace alluvial. Est soulignée la pertinence des « porter à connaissance » dans l'information fournie et dans l'assistance aux collectivités pour mener leurs réflexions sur un développement du territoire qui intègre le risque
- Valoriser et développer une connaissance déjà très riche

Ce futur atlas du Rhône comprendra les cartes suivantes :

- *Des cartes d'aléa* : limites des crues significatives, tirées des modèles de l'Etude Globale Rhône après validation, pour différentes occurrences (crues fréquentes, rares exceptionnelles) ; cartes des zones soumises à submersion marine.
- *Des cartes historiques* : recueil classiques des phénomènes et données d'archives ; limite des crues historiques connues (notamment 1840, 1856, 1944, 1990, 1993, 1994, 2002, 2003) ; cartes des évolutions diachroniques du lit, de ses annexes et des aménagements, telles que celles établies d'après les méthodes d'analyse de la dynamique fluviale.
- *Des cartes des enjeux et des niveaux de risque* : volet occupation du sol et enjeux : analyse de l'espace comprenant la délimitation des espaces urbanisés et non urbanisés, grands équipements publics, infrastructures, espaces stratégiques,

ouvrages de protection, ZEC, cartographie des dommages 2003... ; volet sur les indicateurs : population résidente en zones à risque, ratios concernant les surfaces exposées... ; volet sur les structures sensibles : recueil et cartographie des points sensibles et stratégiques en cas de crue : cette approche est à envisager avec les services liés au secours et à la sécurité civile ; volet sur les enjeux naturels : zones d'intérêt particulier, zones humides, Natura 2000, sites majeurs, paysager ou faisant l'objet d'une gestion particulière.

- *Un volet « cartographie réglementaire »* : état des procédures, etc...

Comme le souligne encore la Délégation de bassin (à qui nous empruntons les éléments de cette sous-partie 1.2), le préalable à toute action est de travailler à la connaissance du fleuve :

- Avant aménagement : quel est l'état de référence ? quelles sont les évolutions morphologiques encore réparables ?
- Pendant les grandes phases d'aménagement : comment le fleuve a-t-il réagi à chaque phase d'aménagement ? comment en garde-t-il les traces ?
- Après les aménagements et avec l'extension progressive de l'occupation du sol : extension urbaine, équipements divers....

Ce document, purement informatif, ne se substituera pas à la cartographie réglementaire issue des Plans de Prévention des Risques d'Inondation.

3.2 – La méthode « officielle » : les cartes « hydrogéomorphologiques » de l'Atlas des Zones inondables

Le MEDD (Ministre de l'Environnement et du Développement Durable) a lancé la réalisation d'une série d'Atlas des Zones inondables (AZI) à l'échelle du territoire français. Leur volet "hydrogéomorphologique" fait l'objet d'une méthodologie qui permet de préciser les limites des zones inondables en associant la démarche géomorphologique (photo-interprétation, investigations de terrain...) et l'analyse des crues historiques. C'est une méthode qui ne nécessite pas de modèle mathématique. Les limites des zones inondables données par cette méthodologie ne sont pas liées à des périodes précises de retour de crue. Elles fournissent en revanche les limites physiques naturelles du champ d'expansion des crues. Cette méthode retient les définitions suivantes :

- Lit mineur : espace inondé en totalité par une crue fréquente annuelle ou bisannuelle
- Lit moyen : espace inondé en cas de crue moyenne, de fréquence généralement inférieure à 10 ans ;
- Lit majeur et exceptionnel : espace inondé par les crues les plus rares ou exceptionnelles ;
- Limite de la plaine alluviale : enveloppe maximale des crues (= zone inondable au sens géomorphologique). Elle peut être, selon les cas, très nette et placée avec une grande précision (présence d'un talus net, bas de versant franc) ou imprécise (talus peu nets, fonds de vallon en berceau).
- Les AZI prennent également en compte d'autres éléments : secteurs inondables par accumulation de ruissellement (urbain, agricole ou naturel) ; éléments naturels ou anthropiques susceptibles d'influencer le fonctionnement hydraulique du cours d'eau (digues, remblais, seuils, zones végétalisées).

3.3 - L'Atlas du paléoenvironnement de la plaine alluviale du Rhône

La Zone Atelier Bassin du Rhône, fédération de recherche créée en 2001 à l'initiative du CNRS (Centre national de la recherche scientifique), s'est vue confier ce premier volet de l'Atlas de référence du Rhône, dont la réalisation a été effectuée en 2006-2007. Il s'agit de l'Atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône qui innove au plan méthodologique par rapport à l'atlas hydrogéomorphologique dont les éléments principaux viennent d'être rappelés ci-dessus (1.2). L'équipe de recherche a associé des laboratoires de géographie de l'université Lumière-Lyon 2, de l'Université de Provence et de l'Université Paris 7-Diderot. Un article de synthèse a été tiré de l'étude (Bravard et al., 2008).

La réalisation de l'atlas du paléo-environnement est basée sur *la méthodologie opérationnelle suivante* :

- La surface couverte est celle de la plaine alluviale du Rhône au sens large, ou plaine façonnée à l'Holocène (les limites sont les versants et les terrasses pléistocènes) sur une longueur de 550 km.
- L'existence d'une crue de référence très bien connue, celle de la crue centennale de mai 1856, donne l'espace en théorie inondable ; les cartographies réglementaires actuelles se fondent sur cette limite.
- L'atlas identifie des unités géomorphologiques dont la définition est basée sur leur genèse (voir ci-dessous), et non pas sur leur hauteur relative vis-à-vis des crues inondantes. Ces unités ont une altitude relative par rapport au fleuve, ce qui conditionne leur sensibilité à l'inondation.
- La cartographie est élaborée en fonction de l'état des lieux vers 1860, au moment où débute l'aménagement du fleuve et de la vallée ; le document de base qui a permis de réaliser l'atlas est un excellent atlas du fond de vallée au 1/10 000^e réalisé entre 1857 et 1866 par les Ponts et Chaussées. L'atlas porte les cotes de la crue de 1856.
- L'échelle retenue est le 1/25 000^e (fond de plan IGN et photogrammétrie). Lyon, site à enjeux particuliers, est cartographiée au 1/10 000^e (zoom). Une vision d'ensemble de la vallée est fournie au 1/300 000^e. L'atlas est élaboré sous SIG (Système d'information géographique), en l'espèce Arcinfo.

Le principe théorique de construction des unités géomorphologiques, de nature génétique, est basé sur le concept de dynamique du système fluvial. Le style fluvial d'un fleuve comme le Rhône présente une variabilité temporelle pendant l'Holocène puisque des périodes de style à méandres (lit unique sinueux) a alterné plusieurs fois avec le style à tresses (chenaux multiples). Le premier est la réponse du système à des flux sédimentaires réduits par rapport aux flux liquides qui assurent leur évacuation; les seconds sont la réponse du système à des flux solides (charge de fond) importants que les flux liquides ne parviennent pas à évacuer. Ces variations de style, qui touchent le linéaire de manière hétérogène, dépendent du climat et de l'état du bassin versant commandé par l'occupation du territoire. Les différentes phases hydrodynamiques de l'Holocène ont laissé leurs marques dans l'espace du fond de vallée alluvial. Depuis 3000 ans, se sont succédé une phase de crise (2800-2400 BP), une phase de calme hydromorphologique entrecoupée de crises secondaires (2400-600 BP) et une phase de crise, le PAG (600-150 BP).



Photo. 1 : Des méandres fluviaux: le Danube en Bavière



Photo 2 : Des tresses sur le cours aval de la Drôme, un affluent du Rhône (Ph. J.-M. Faton)

Encadré:

Ces styles fluviaux fonctionnels caractérisent la géomorphologie de deux rivières dans leur état actuel. Or un même tronçon fluvial peut connaître une "métamorphose" qui est la succession dans le temps de ces styles fluviaux très différents l'un de l'autre.

La carte de l'état de la plaine alluviale en 1860 met en relation le style fonctionnel du chenal actif et les unités de la plaine alluviale construites par ce style (par exemple un tronçon à méandres et une plaine construite par la migration de ces méandres; ou un chenal en tresses et la plaine adjacente formé d'anciennes bandes de tressage abandonnées ou de marais tourbeux

formés en contrebas de tresses en cours d'exhaussement). Les unités spatiales construites antérieurement au XIX^e siècle font l'objet d'une analyse géomorphologique fondée sur la topographie, la stratigraphie si elle est disponible et les données géoarchéologiques ou le radiocarbone pour la datation absolue). La fig. 7 représente un secteur amont de la plaine du Rhône (Chautagne-Lavours), dans la zone montagneuse. En 1860, la totalité de l'espace était occupée par des tresses actives (en bleu foncé), des tresses abandonnées surtout par l'effet de digues construites depuis le XVIII^e siècle (en bleu clair), et des « arrière-marais » (en vert). Cette géomorphologie est alors conditionnée par la phase climatique du Petit Âge Glaciaire qui provoque un fort exhaussement de la « bande active » en tresses, large de 2 à 3 km. Les marais, tourbeux, sont en contrebas de 1 m par rapport à la bande de tressage, donc inondés sous des hauteurs d'eau supérieures à ce que l'on attendrait d'une unité du lit majeur. Le secteur de Chautagne-Lavours est relativement simple puisque seul est identifié le binôme tresses/arrière-marais. Des études de paléo-environnement ont montré qu'un style à méandres a existé au Moyen-Âge, avant le XIV^e siècle, mais l'exhaussement du PAG a recouvert ces reliques (Bravard, 2009).

D'autres secteurs de la plaine alluviale du Rhône présentent une complexité plus grande. La plaine alluviale peut juxtaposer des unités héritées du fonctionnement de méandres et des unités issues du style à tresses (héritées et actives). La fig. 8 représente les unités de la plaine du Rhône dans la région de Lyon (voir commentaire dans la légende de la figure).

Selon la nature de ces unités, les inondations ne se propagent pas de la même manière (cf la nature des paléo-chenaux), ont des hauteurs de submersion et des durées variables.

Une étude complémentaire, destinée à vulgariser les résultats, a été commandée par la DREAL (2009-2010). Prenant acte de la complexité (forte mais réelle) du fond de la vallée du Rhône, celle-ci a souhaité un outil de valorisation de cette cartographie. Plusieurs secteurs représentatifs permettant de balayer l'ensemble des configurations sont l'objet d'animations multimédia retraçant la construction de la plaine alluviale et expliquant l'incidence de cette histoire sur l'aléa inondation. La méthodologie innovante qui en découle doit servir à des actions de concertation (sensibilisation des habitants et des élus aux héritages dans lesquels s'insèrent les crues actuelles) et à la formation des techniciens de l'Etat en charge de la mise en œuvre de la cartographie réglementaire du risque et de l'affichage de ce dernier (atlas de zones inondables).

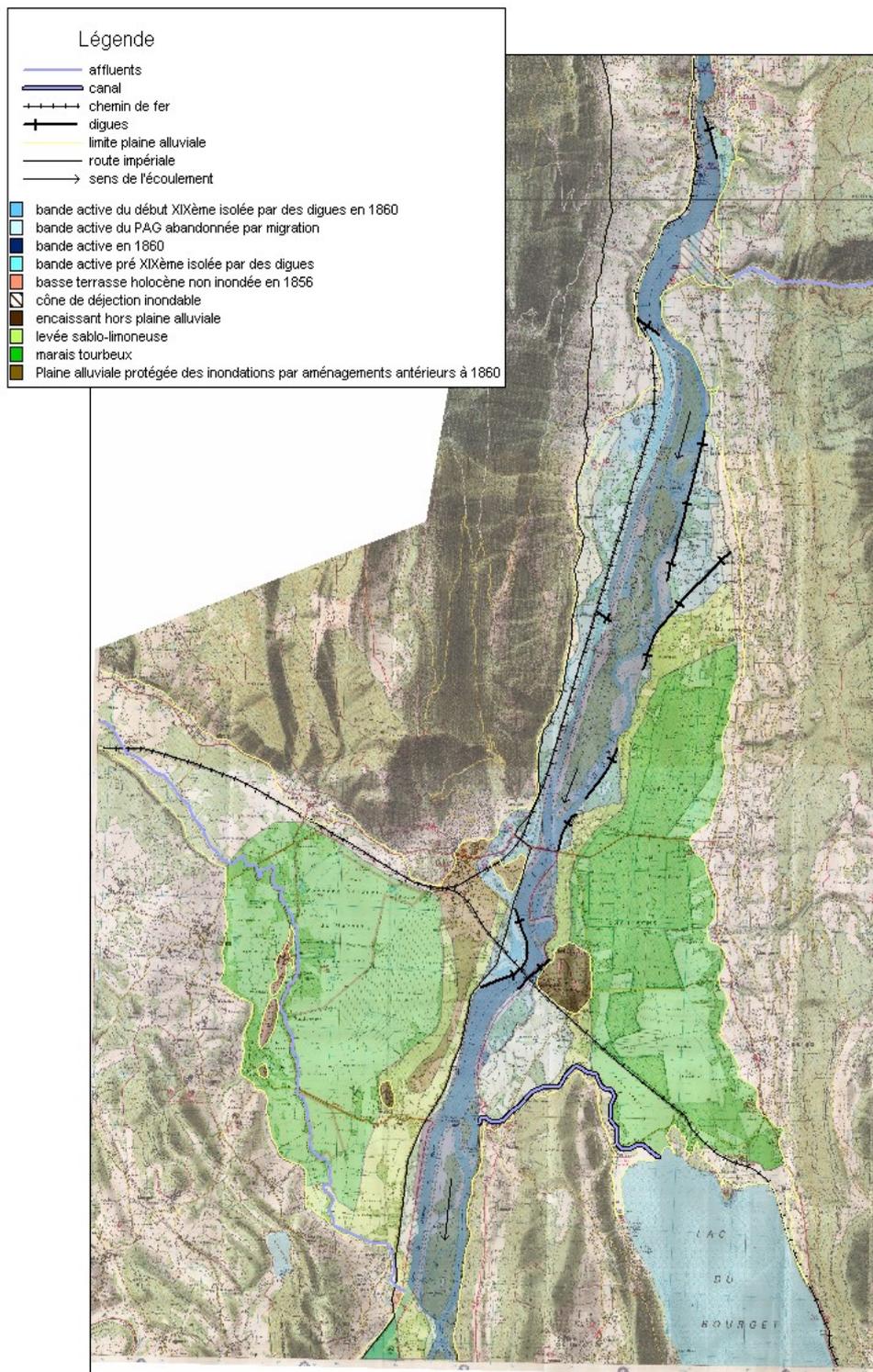


Fig. 7 : Une planche de l'atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône. Le secteur de Chautagne-Lavours (linaire de 10 km)

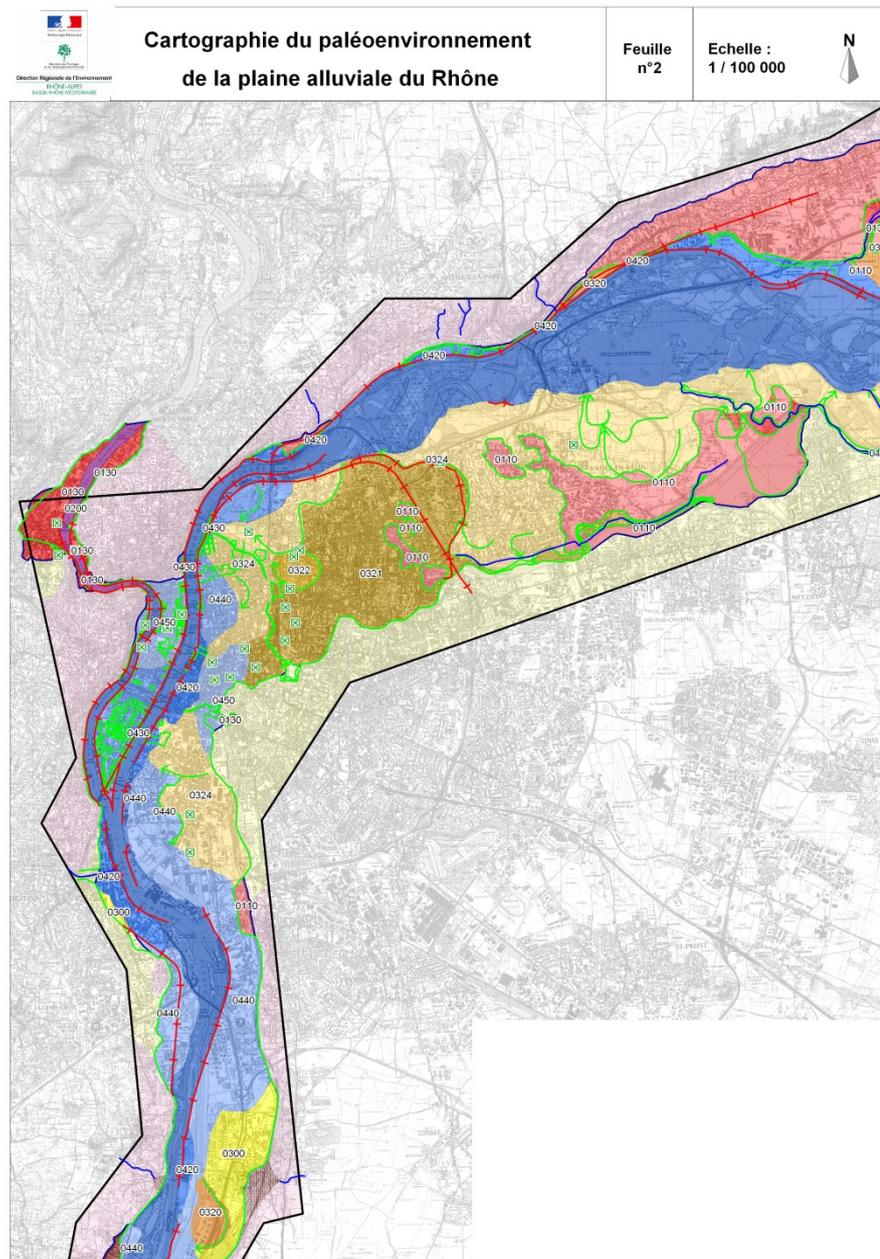


Fig. 8 : Une planche de l'atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône. Le secteur de Lyon (linéaire de 30 km).

- En rose, des unités qui ont été inondables et qui ne le sont plus (enfoncement relatif du fleuve)
- En jaune, des unités façonnées par des méandres du Rhône
- En bleu, unités façonnées par le Rhône en tresses (au moins à trois époques de l'Holocène).

4. LES METHODES DE COMPENSATION

4.1. Les Zones d'Expansion des crues (ZEC) et la « surinondation » des plaines du Rhône aval (exposé de la politique de la Délégation de bassin)

Les zones d'expansion des crues (ZEC) sont des secteurs du lit majeur non urbanisés ou peu urbanisés et peu aménagés, et où la crue peut stocker un volume d'eau important. Les zones

inondables non urbanisées sont toutes des ZEC. Dans le cadre de l'élaboration de la doctrine pour les Plans de Prévention du Risque d'inondation (PPRI) du Rhône, une liste des principales ZEC a été établie. La fig. 9 donne une image de l'extension des ZEC de l'aval du Rhône à l'amont du delta.

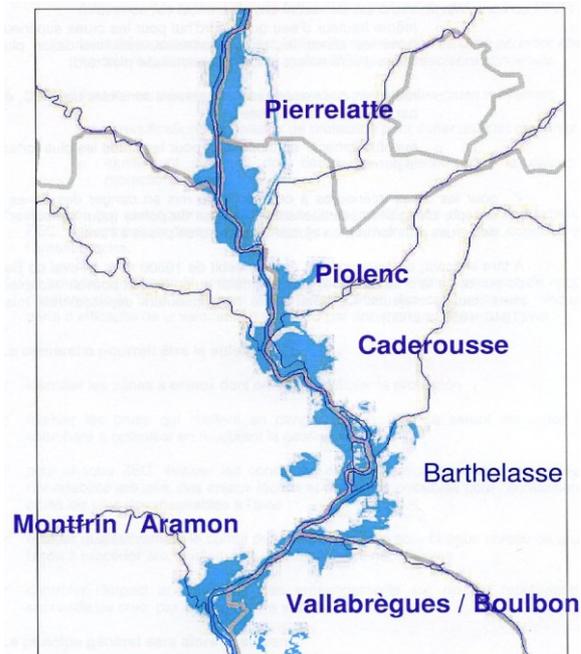


Fig. 9 : Les surfaces couvertes par les ZEC du Rhône aval (source Plan Rhône)

Les principes de gestion des ZEC sont les suivants :

1) Préserver les ZEC, surtout quand elles ont un rôle essentiel pour le laminage des débits de pointe.

- Par le passé, les ZEC du Haut-Rhône ont été plutôt bien préservées lors des divers aménagements et notamment ceux de la CNR. Très peu de digues ont été construites, ce qui respecte la loi de 1858 sur la protection des grandes villes françaises (cette loi précise qu'il n'est pas permis d'empêcher l'inondation par la construction de digues).

- Pour le présent, les outils réglementaires existent, auxquels la gestion des ZEC doit se conformer : doctrine PPRI, nomenclature « loi sur l'eau » pour contrôler les remblais en zone inondable, Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE).

- Le plan Rhône en fait une orientation fondamentale : « *préserver les zones d'expansion des crues et optimiser leur gestion ; en reconquérir certaines* »

2) « Optimiser » la gestion des ZEC

Trois méthodes ont été recommandées par le bureau d'étude SOGREAH et ont été retenues dans le Plan Rhône :

- La modification des mécanismes d'entrée, de stockage et de sortie des eaux. Les seuils des déversoirs qui permettent aux crues du Rhône d'entrer dans les casiers inondables sont surélevés. Les crues débordantes sont donc moins fréquentes, et les fortes crues, qui peuvent pénétrer dans la ZEC, sont mieux écrêtées (fig. 10),

- L'intervention sur le moment du stockage (si possible pendant la pointe),

- La surveillance des impacts négatifs éventuels.

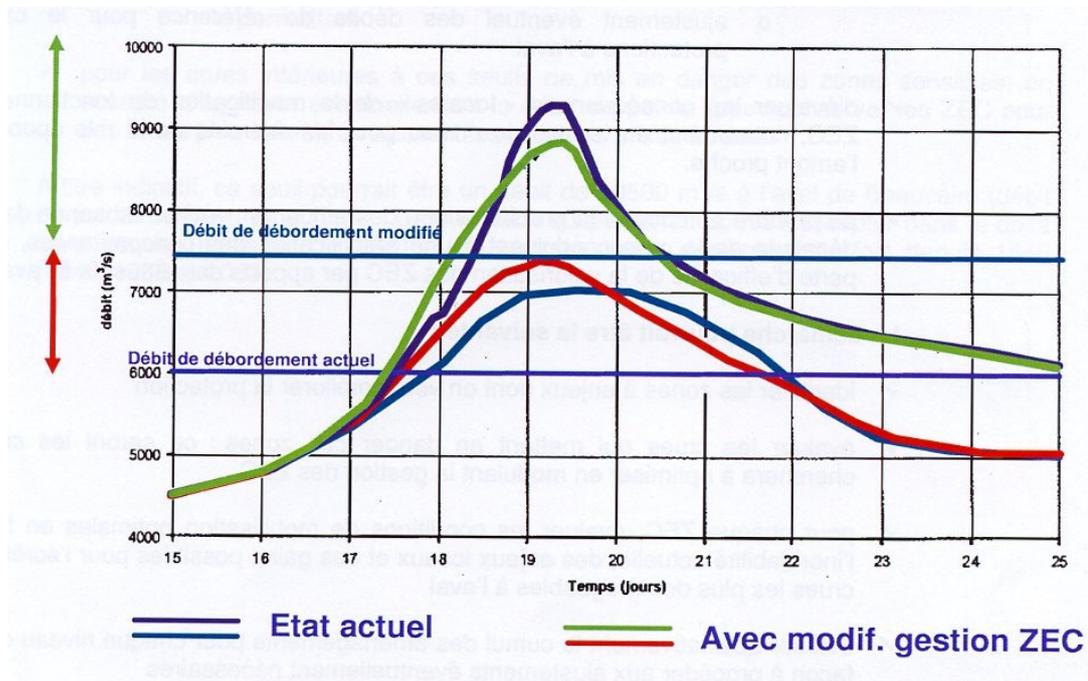


Fig. 10 : Les effets hydrologiques de la gestion « optimisée » des ZEC (source SOGREAH).

Commentaire de la fig. 10 :

- Avant aménagement du déversoir de la ZEC (« état actuel »), deux crues de force inégale sont représentées (en bleu) ; les crues débordent à partir du débit de 6000 m³/s. Les casiers sont donc remplis assez tôt et jouent un rôle limité vis-à-vis des fortes crues (ils sont pleins).
- Le déversoir est relevé pour ne pas rendre possible la mise en eau pour un débit inférieur à 7500 m³/s. Les crues moyennes (en rouge) ne sont plus écrêtées, sont plus précoces et un peu plus hautes. En revanche, les crues fortes et débordantes (en vert) sont écrêtées par rapport à l'état antérieur, ce qui est bien le but recherché.

4.2. La « redynamisation » des berges du Rhône

L'Etude Globale Rhône a montré l'évolution inquiétante des « marges » du Rhône qui ont tendance à s'exhausser du fait du dépôt, par les crues débordantes, de sédiments issus de suspensions. Les marges en question sont localisées sur chaque rive des vieux Rhône qui sont les tronçons fluviaux court-circuités par les canaux usiniers (leur longueur totale approche les 150 km). La fig. représente le vieux Rhône de Montélimar (fig. 11 & ph. 3 ; localisation sur la fig.1), long de 8 km, celui où les études ont été menées dès 2003 dans le cadre d'une collaboration entre la CNR, Lyon 2 et la ZABR. Le canal usinier, ou « Rhône navigable », détourne le débit jusqu'à 1850 m³/s, le vieux Rhône ayant un débit réservé (très réduit) de 10 m³/s. Au-delà du débit usiné, le débit excédentaire est déversé dans le vieux Rhône au niveau du barrage ; il inonde progressivement la plaine alluviale, mais dépose des sables et limons sur les rives.

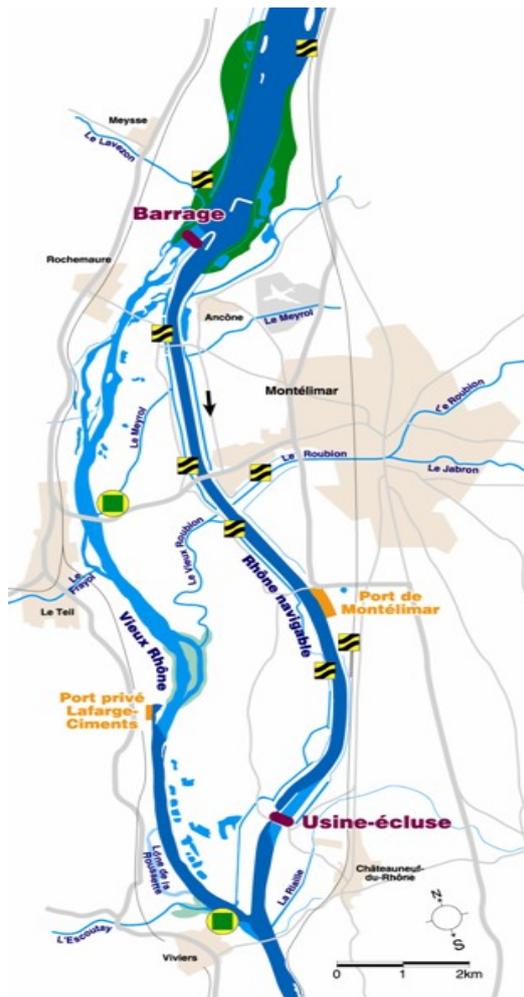


Fig. 11 : Le vieux Rhône de Montélimar. Schéma hydraulique

Ph. 3 : Vue aérienne partielle depuis l'aval ; le débit réservé permet de voir une partie des fonds de l'ancien chenal (source CNR)

L'évolution des marges ne doit pas qu'aux processus naturels liés au débordement de la crue. Elle est aussi influencée par les aménagements réalisés sur les rives. Il s'agit en premier lieu de levées de terre construites par les riverains au début du XIX^e siècle pour se protéger des courants débordants, sans toutefois empêcher l'inondation. A partir du milieu du XIX^e siècle, des digues sont construites en limite du lit mineur pour le forcer à se creuser et améliorer les conditions de la navigation. Une méthode originale a été élaborée pour organiser les opérations de gestion, c'est-à-dire de restauration partielle du chenal afin de réduire le niveau atteint par les crues (Bravard et al., 2008).

En premier lieu, les « marges » ont été délimitées ; dans ce but, la notion de « bande active historique » a été proposée ; cette dernière correspond à la surface occupée par l'ancienne bande de tressage du XIX^e siècle, délimitée sur cartes anciennes. La fig. 12 montre tout d'abord l'évolution de l'occupation des sols entre 1860 et 2003 à partir d'un travail d'analyse de cartes et de photo-interprétation.

Evolution de l'occupation des sols dans la BAH

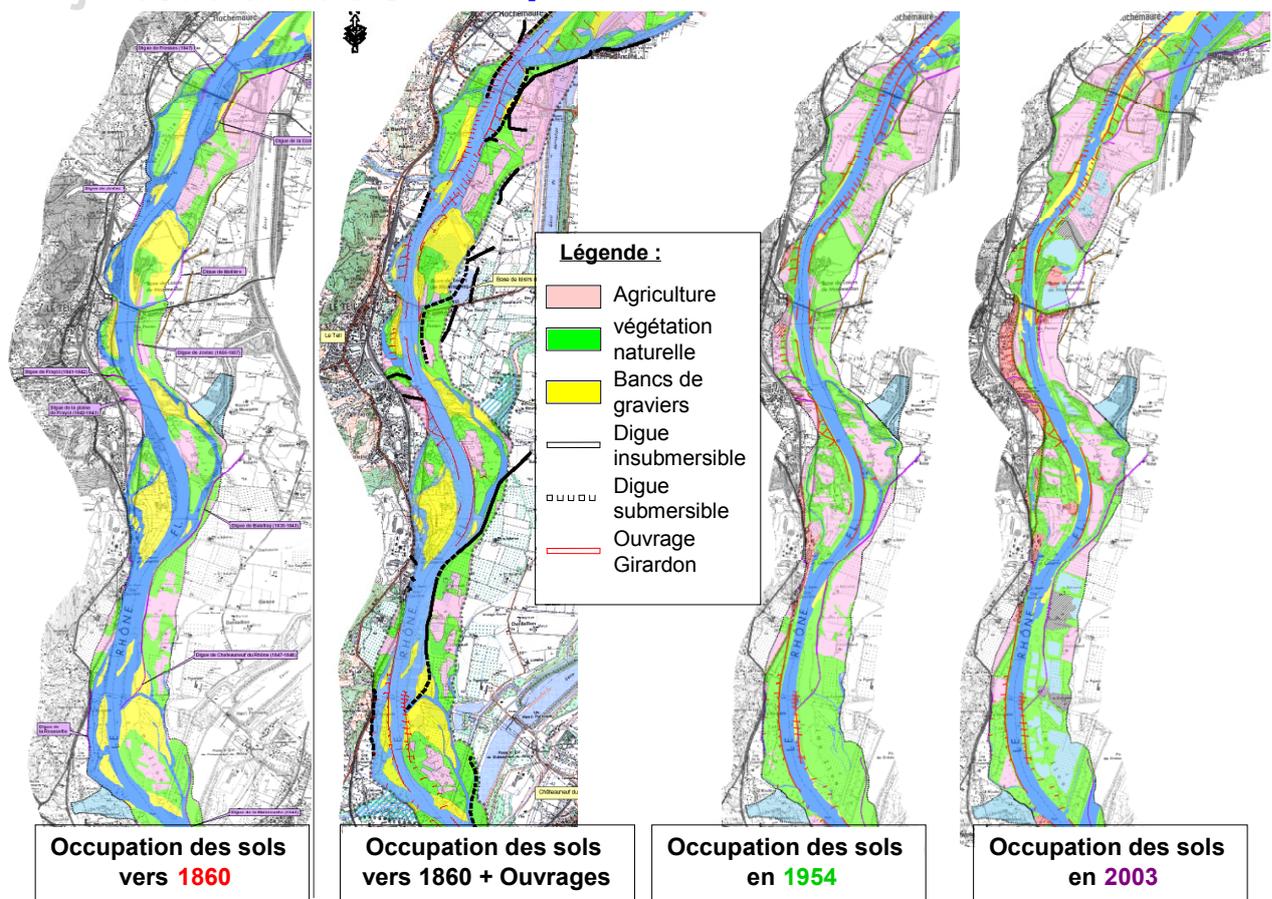


Fig. 12 : Evolution de l'occupation des sols dans la « bande active historique » du vieux Rhône de Montélimar entre 1860 et 2003 (source Université Lyon 2 – CNR).

En 1860, le fleuve tresse encore ; la deuxième image montre que les levées ont permis le début de la colonisation agricole (en rose). En 1954, le fleuve est « chenalisé » par les aménagements dits « ouvrages Girardon ». Le lit est comprimé, les bancs de galets disparaissent, les sables se déposent en arrière des digues qui cassent la vitesse du courant ; l'agriculture et la forêt alluviale occupent cet espace favorable qui piège les MES. En 2003, les gravières en eau se sont fortement développées.

La question est ensuite de délimiter les unités spatiales où les courants de crue pourront reprendre en charge les sédiments fins si les digues sont déposées et la forêt coupée. A dire d'expert, les marges ont été découpées en « casiers de sédimentation » homogènes en fonction de leur sensibilité à l'inondation qui est elle-même fonction de la protection assurée par les digues plus ou moins hautes (« submersibles ») et de l'orientation du courant de crue (fig. 13).

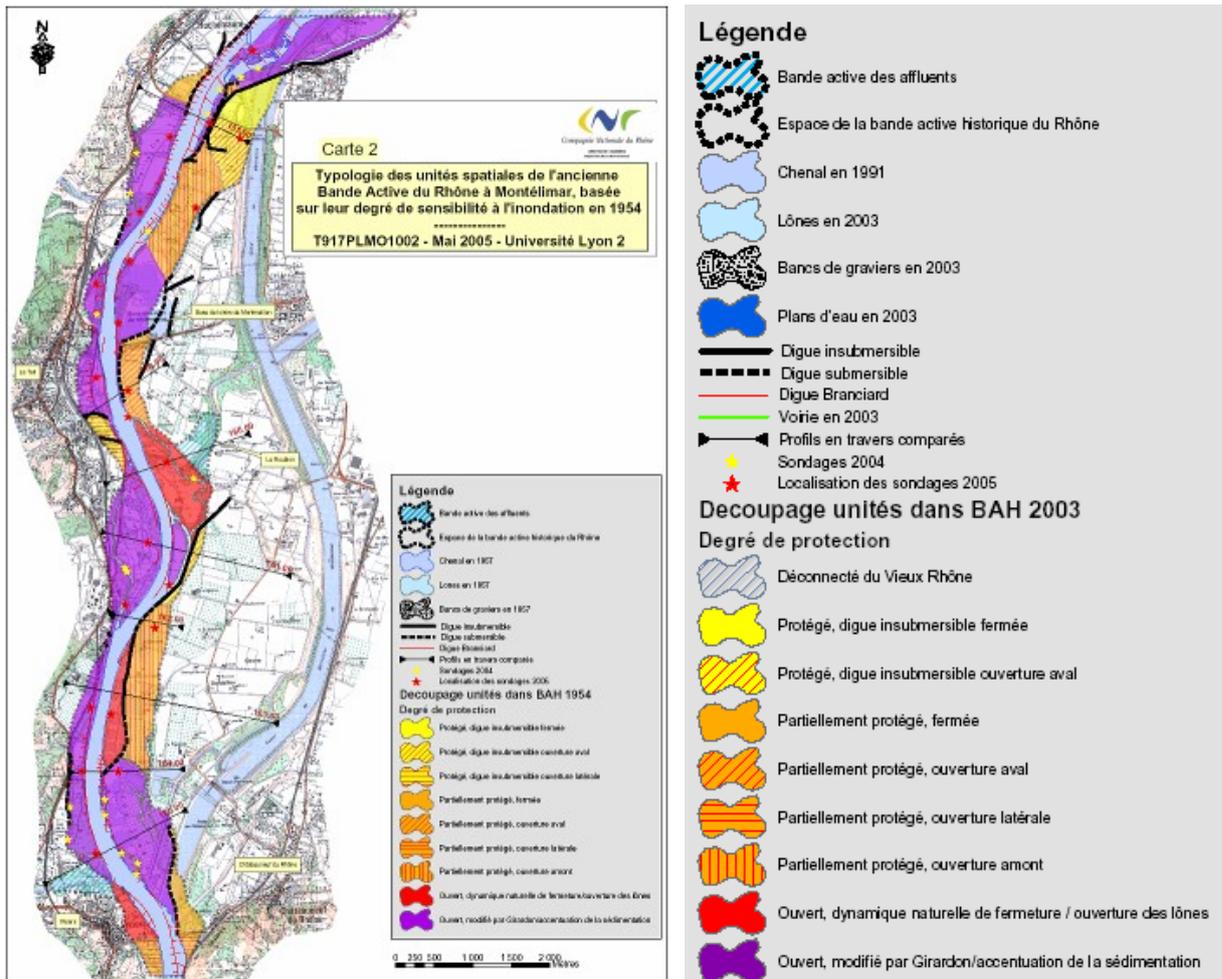
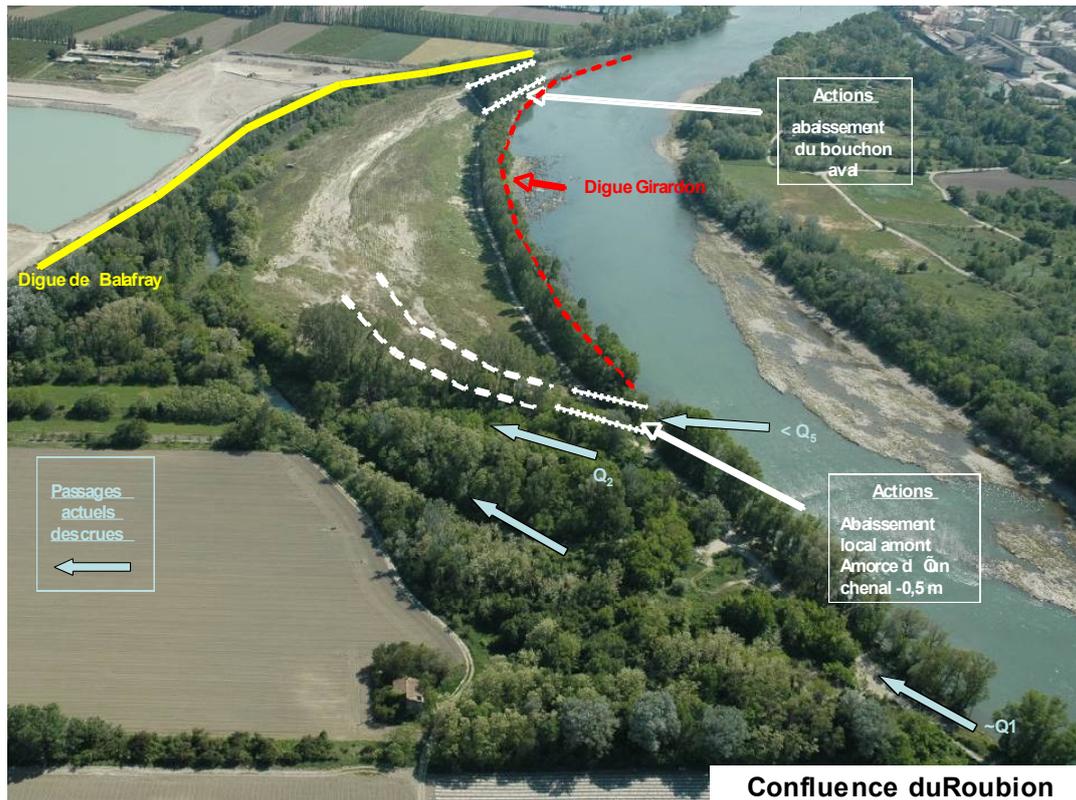


Fig. 13 : Les casiers d'inondation et de sédimentation potentielle dans les marges du vieux Rhône de Montélimar (source université Lyon 2 – CNR).

Les casiers les plus ouverts aux inondations et les plus favorables au dépôt de sable sont en rouge et violet ; la turbulence, forte, privilégie le dépôt du sable par rapport au limon plus fin, plus aisément transporté vers l'aval. Cette carte est ensuite testée par des observations de terrain, des sondages (tranchées, pénétromètre dynamique PANDA) ; sur ce vieux Rhône, une modélisation hydraulique en 2D a confirmé les hypothèses de hauteur d'eau et de vitesse du courant. Des analyses de laboratoire ont confirmé le caractère sableux du dépôt, le manque de cohésion des particules, élément favorable à la remobilisation. Enfin des analyses biogéochimiques ont montré que les niveaux de pollution des sédiments par les métaux lourds, les PCB et les HAP étaient acceptables.

Des secteurs ont enfin été choisis pour servir de tests grandeur nature. Pour chacun d'entre eux, une petite étude hydraulique a permis de connaître la fréquence de mise en eau des casiers, les forces tractrices disponibles et la nature des travaux préparatoires à engager (abaissement ou dépose de digues, tranchées pour conduire l'eau de crue, etc...).



Ph. 4 : Nature des interventions programmées dans un casier du vieux Rhône de Montélimar

Représentée sur la photographie 4, l'ouverture partielle d'une digue Girardon permet d'envisager une reprise des matériaux fins entre la digue (en rouge) et la levée de protection des terres (en jaune). Dans ce secteur, la largeur du lit peut doubler et la modélisation hydraulique confirme l'abaissement des lignes d'eau en crue qui en résultera.

En 2009, les premiers travaux de dépose de digues ont été réalisés le long du vieux Rhône de Donzère-Mondragon (les opérations prennent du retard à Montélimar pour des raisons institutionnelles). Une crue moyenne (novembre 2009) a déjà permis de tester le caractère opérationnel du projet. Dans le même temps, la mise au point du schéma directeur de la redynamisation est en cours ; il débouchera sur un rapport et une thèse de doctorat confiée à une étudiante de Lyon 2.

En conclusion, ces actions, officiellement inscrites au Plan Rhône, vont remodeler l'espace des marges en redonnant un « espace de liberté », améliorer le passage des crues et accroître la biodiversité. Leur succès est vivement espéré par tous les acteurs.

5. LES INONDATIONS ET L'OPINION PUBLIQUE

Un des enjeux du Plan Rhône est de faire comprendre et accepter la politique de gestion des inondations du Rhône. Dialoguer est devenu une nécessité reconnue et prônée par l'Europe ; mais dialoguer, c'est exposer les pouvoirs publics à accepter de recevoir des suggestions et des demandes fortes de la part des riverains exposés et parfois sinistrés. Comment se pose le problème à l'échelle d'un petit territoire de la moyenne vallée du Rhône? La DIREN de bassin a confié à l'Université Lyon 2 une étude de mise au point (Bravard et Combe, 2009). Les principales actions engagées depuis les crues de 2002 et 2003 l'ont été sur le Rhône aval ; il est devenu nécessaire de se pencher sur le cas du Rhône moyen, moins gravement touché, mais qui ne dit pas être oublié. Un secteur est particulièrement exposé, la ZEC de Printegarde, localisée en rive gauche d'une retenue du Rhône, celle de Baix-Le Logis Neuf (fig. 1 de

localisation et fig. 14). La photographie 5, prise en direction de l'amont, représente l'inondation de 1993 qui s'est déversée dans le champ d'expansion des crues, une des ZEC du lit majeur du Rhône. La plaine du Rhône en marge de l'aménagement hydroélectrique de la CNR est en effet soumise à un aléa inondation en principe conforme à ce qu'il était à l'état naturel.

Cette inondation est considérée comme un phénomène « normal » ; il est donc bien accepté par les riverains du « casier » hydraulique de Printegarde, à ceci près qu'ils se trouvent face à des niveaux d'inondation qu'ils jugent anormalement élevés ; en fait surélevés par rapport à ce qu'ils étaient auparavant. En effet les niveaux des crues récentes (1993-2003) excèdent de loin le niveau de référence, celui de la crue de 1856. L'aggravation des inondations est aussi matérialisée par l'extension spatiale de la crue de 1993 dont les limites excèdent celles de la crue de 1856.



Ph. 5 : L'inondation du « casier » de Printegarde lors de la crue de 1993

Devant ce constat, l'association des riverains de Printegarde rend une série d'aménagements récents de la CNR responsables de cette aggravation (voir fig. 14) ; le fait que le Rhône n'ait pas connu de grande crue dans ce tronçon entre 1957 et 1993 (pour des raisons qui tiennent simplement à une pluviométrie déficiente, explique pourquoi ils tendent à mettre en cause la CNR dont les ouvrages ont été mis en service en 1960. Quels sont les arguments développés par les riverains ?

- Les débits de crue du fleuve sont sous-estimés car la CNR ne prend pas en compte l'Eyrieux, un affluent, lorsqu'il est en crue.
- Le remblaiement de la retenue par des sédiments issus de suspension a réduit sa débitance (capacité d'évacuation).
- L'installation d'une micro-centrale au barrage de retenue de Baix a relevé les niveaux.
- La fermeture du siphon sous la Drôme, qui vidange le casier à la décrue, a facilité le remplissage plus poussé des casiers.

Cette évolution, que les riverains jugent liée à l'impact d'aménagements, si elle repose sur des données exactes, pourrait en principe changer les hauteurs d'eau et les limites de la crue de référence. Or la CNR réfute formellement toute responsabilité en usant d'arguments techniques. De plus, il fut mis en évidence par la CNR, dès 1955, que les hauteurs d'eau étaient montées depuis la crue de 1856 ; de fait la crue de 1957 fut une crue de 6300 m³/s, d'extension spatiale comparable à celle de la crue de 1856 forte de 8300 m³/s. Déjà l'hypothèse la plus probable était l'effet d'un fort alluvionnement sur les marges du Rhône (ancien espace de tressage) entre 1860 et 1960, assisté par les digues construites pour améliorer les conditions de la navigation (cf ci-dessus, point 4.2).

Quelles que soient les causes de cette évolution défavorable, reste qu'il est réel. Le Service de la Navigation du Rhône et de la Saône, en charge du dossier dans les années 1970, a mis en place dans l'ensemble de la vallée une réglementation conforme à la crue de référence de 1856 (Plan des Surfaces Submersibles et PERi). Les limites ont cependant été récemment modifiées sur les communes concernées (Livron notamment) par le Service en charge du PPRI (la Direction départementale de l'Équipement) pour tenir compte de la crue de 1993, mais pas au point d'anticiper sur ce que serait la réédition de la grande crue de 1856.

L'Association des riverains demande des dédommagements au Plan Rhône (2006), au titre de ce qui serait une « surinondation » de fait. Le plan Rhône (2006) a donné la priorité aux ZEC (Zones d'expansion des crues) et au principe de la « surinondation » dédommée. Le niveau de référence est celui de la crue centennale de 1856. Or il est admis que la sédimentation dans les « marges » du Rhône depuis 150 ans a augmenté localement les niveaux de crue à débit égal (Etude Globale Rhône, 2002). Pourquoi ne pas admettre la « surinondation », telle est la façon dont la question est posée sur les bords du Rhône ? La DIREN refuse de les accorder au motif que la « surinondation », organisée dans le Plan Rhône, doit être issue d'aménagements ad hoc postérieurs à 2003 et ne peut être rétroactive. L'évolution 1860-2009 n'est pas intégrée dans la réglementation.

Les mesures proposées aux riverains par l'étude universitaire sont les suivantes:

- Une modélisation des niveaux qui seraient atteints pour la crue de 8500 m³/s (1856)
- Une réflexion sur l'opportunité de prendre en compte tout ou partie de l'aggravation historique par une procédure d'indemnisation ou de compensation à caractère exceptionnel
- Une démarche de partage réel et durable de la connaissance des éléments techniques du dossier entre les différents acteurs.

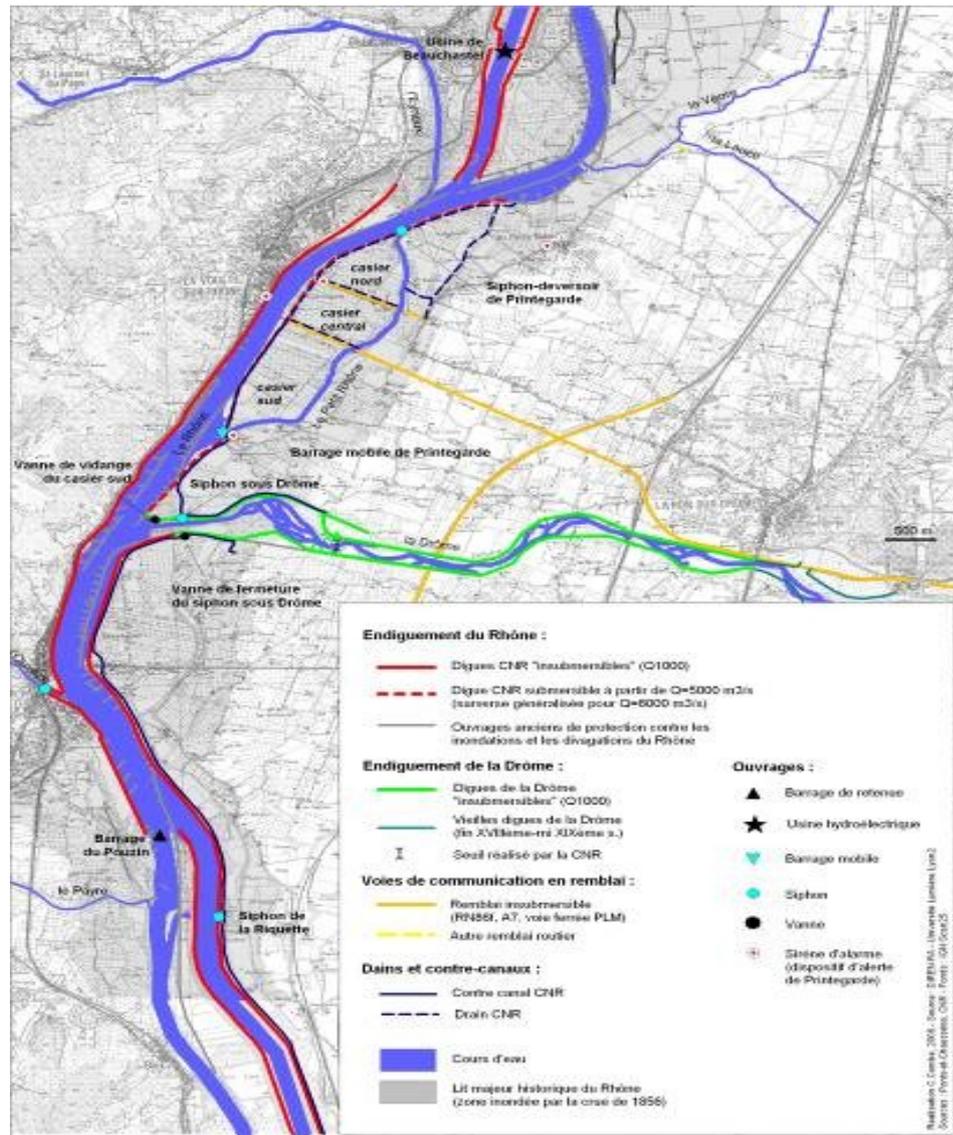


Fig. 14 : Les aménagements de la CNR (Compagnie Nationale du Rhône) au Sud de Valence (Bravard et Combe, 2009).

Commentaire :

Cette carte élaborée sous SIG montre, de l'amont vers l'aval, le canal usinier de l'aménagement CNR de Beauchastel, la retenue de Baix dans laquelle se jette la Drôme, le barrage de retenue du Pouzin, le vieux Rhône de Baix et le canal qui conduit à l'usine de Logis Neuf.

Le « Petit Rhône », équipé d'un déversoir, permet de remplir le casier de Printegarde. A la décrue l'eau du casier est vidangée par un siphon qui passe sous la Drôme.

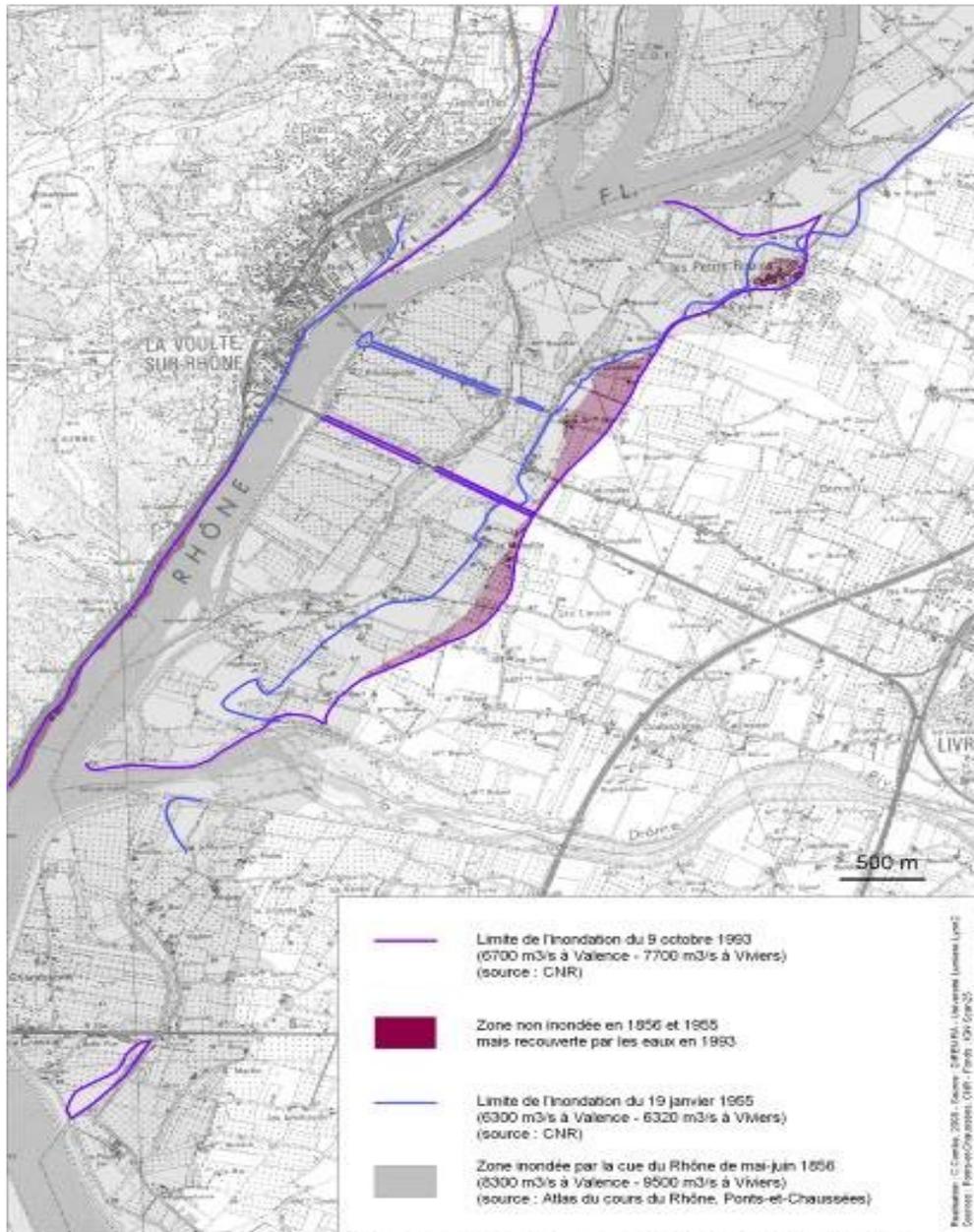


Fig. 15 : L'extension de crues remarquables dans la plaine de Printegarde (Bravard et Combe, 2009).

La figure 15 montre que la crue de 1993 (6300 m³/s à Valence) a connu une extension spatiale supérieure à celle de la crue centennale de 1856 (8300 m³/s à Valence).

6. UN OUVRAGE DE VULGARISATION SCIENTIFIQUE :

LE RHONE EN 100 QUESTIONS

L'ouvrage *Le Rhône en 100 questions* (coordinateurs : Bravard et Clément, 2008) a été publié par la ZABR (Zone atelier Bassin du Rhône) et co-financé par le Ministère de l'Environnement (Plan Rhône), l'Agence de l'Eau, les Régions, la CNR et EDF (Ph. 6). Son objectif premier a été de fournir au grand public un ensemble de connaissances contrôlées, ainsi que des points de vue faisant consensus, de manière à construire les bases d'une connaissance du fleuve partagée. Edité à 4500 exemplaires, réédité en 2009, l'ouvrage a été distribué aux acteurs du bassin (élus, associations), aux établissements scolaires, à des particuliers intéressés...

L'écriture a mobilisé 80 rédacteurs, 10 responsables de chapitre, un comité de rédaction technique et scientifique. Dix chapitres traitent du fonctionnement du fleuve, de sa gestion, de ses aménagements, de la qualité du fonctionnement de son environnement, de l'économie qu'il a contribué à créer sur ses rives, des risques d'inondation, de son patrimoine écologique et culturel. Ces 10 chapitres sont présentés sous la forme de questions dont l'intitulé a été proposé par les scientifiques et par des riverains de manière à garantir que tout ce qui est considéré comme important au fil du Rhône soit bien pris en compte.

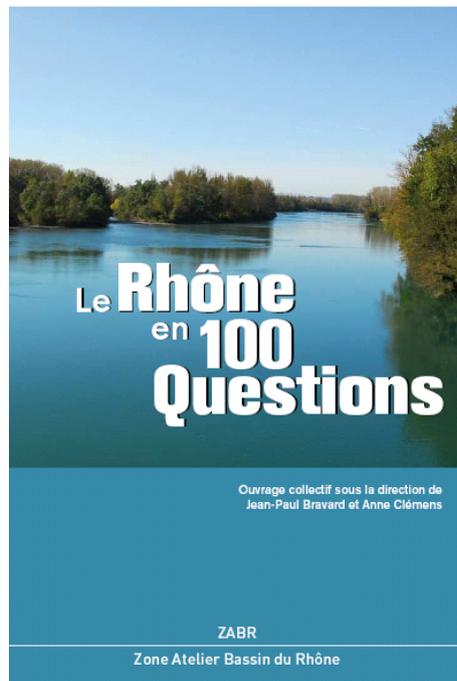


Photo. 6 : Page de couverture du « Rhône en 100 questions ».

BIBLIOGRAPHIE

Un site internet en partie consacré aux inondations du Rhône (DREAL Rhône-Alpes)

<http://www.rhone-alpes.ecologie.gouv.fr/>

Ce site renseigne sur les crues et inondations, sur le Plan Rhône et les diverses actions menées dans ce cadre

Références des auteurs sur la question

BRAVARD J.-P., 2004 : Le risque d'inondation dans le bassin du Haut Rhône : quelques concepts revisités dans une perspective géohistorique. In : Burnouf J. et Leveau Ph., (dir.), *Fleuves et Marais, une Histoire au Croisement de la Nature et de la Culture*. Sociétés préindustrielles et milieux fluviaux, lacustres et palustres : pratiques sociales et hydrosystèmes, CTHS, Paris, p. 391-402.

BRAVARD J.-P., 2010 : Discontinuities in braided patterns: Rhône River from Geneva to the Camargue delta before river training. *Geomorphology*, 117, p. 219-233.

BRAVARD J.-P., CLÉMENS A., (coord.), 2008 : le Rhône en 100 questions. Lyon, Ed. GRAIE, 295 p., Téléchargeable gratuitement sur le site www.zabr.org/

BRAVARD J.-P., COLLILIEUX G., DESMET M., FRUCHART F., MOTCHALOVA O., VALÉ N., 2008 : Widening by-passed reaches of the Rhone river following sediment deposition, France. Interdisciplinary studies and procedures. IVth ECRR Conference on River Restoration, Italy, Venice S. Servolo Island, 16-21 June, p. 953-964.

BRAVARD J.-P., COMBE C., 2009 : *Etude sur l'inondabilité de la plaine alluviale du Rhône dans le secteur d'Etoile-Livron (26). Evolution de sa sensibilité depuis la crue de 1856*. Rapport remis à la DIREN de bassin, 122 p.

BRAVARD J.-P. & PETIT F., 1997 : *Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial*. Paris, Colin, 222 p., 2^e édition 2000.

BRAVARD J.-P., PROVANSAL M., ARNAUD-FASSETTA G., CHABBERT S., GAYDOU P., DUFOUR S., RICHARD F., VALLETEAU S., MELUN G., PASSY P., 2008 : Un atlas du paléo-environnement de la plaine alluviale du Rhône de la frontière suisse à la mer. Chambéry, Collection EDYTEM - n° 6 - *Cahiers de Paléoenvironnement*, p. 101-116.

COMBE C., BRAVARD J.-P., 2010 (en cours de réalisation) : *Valorisation de l'Atlas du paléoenvironnement de la plaine alluviale du Rhône*, conception et réalisation d'outils de formation et de concertation commandés par la Mission Rhône (DREAL Rhône-Alpes)

COMBE C. (à paraître). « Des cartes anciennes au service de la gestion du risque d'inondation dans la vallée du Rhône », Il paesaggio dei tecnici. Attualità della cartografia storica per il governo delle acque, actes du colloque organisé par l'Université de Bologne et l'Agence interrégionale du fleuve Pô (AIPO), Bologne et Crémone, 4-5 avril 2008, Marsilio Editori, Venezia, 12 p.

COMBE C., Association Robins des Villes, 2009 : *Inondations du Rhône : développer la mémoire du risque, sensibiliser les publics. Projet « Balades Gé-eau-graphiques »*. Appel à projets piloté par la DREAL Rhône-Alpes et subventionné par les partenaires du Plan Rhône.

COMBE C., 2009. « Le SIG narratif, outil de territorialisation du risque. Mise en perspective géohistorique du risque fluvial en milieu urbain et périurbain », *La cartographie des risques naturels, actes du colloque Géo-Risque 2006*, Université Paul Valéry Montpellier III, 7 février 2006, pp. 23-30

COMBE C., 2007 : *La ville endormie ? Le risque d'inondation à Lyon. Approche géohistorique et systémique du risque de crue en milieu urbain et périurbain*, thèse de doctorat de géographie, aménagement et urbanisme, Université Lumière Lyon2, 456 p.

**LA CARTOGRAPHIE DES ZONES INONDABLES PAR APPROCHE
HYDROGEOMORPHOLOGIQUE ET SON APPLICATION AU MILIEU
SUBARIDE**

Gérald Garry

Responsable du pôle risques majeurs et planification
Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer
Direction générale de l'aménagement, du logement et de la nature
Direction de l'urbanisme, de l'habitat et des paysages
France

RESUME :

L'objet de cette présentation est d'expliquer une méthodologie d'analyse et de cartographie des zones inondables, dite « approche hydrogéomorphologique », qui a été progressivement développée par le ministère de l'équipement à partir de 1982 et qui a trouvé sa place légitime dans le dispositif des études d'inondations depuis les années 1995. Aujourd'hui, cette méthode a été appliquée sur des milliers de kilomètres de cours d'eau en France et il y a tout lieu de penser qu'elle va parfaitement répondre à certaines exigences de la directive cadre européenne sur les inondations dont la transposition Française a été adoptée le 12 juillet 2010 par la loi portant engagement national pour l'environnement. Après avoir décrits les fondements de l'hydrogéomorphologie et la caractérisation de ses différentes unités en termes d'inondabilité, nous présenterons quelques exemples de cartes, mises en œuvre notamment sur le bassin versant de la Mekerra en Algérie.

ABSTRACT:

The object of this presentation is to explain a methodology of analysing and mapping for floodplain named "the hydrogeomorphological approach", which has been progressively developed by the French Ministry of Works since 1982 and which has found its legitimate place in the flood studies organisation since the late 90's. Today, this method has been employed on thousands of kilometers of watercourse and there is every reason to believe that it's going to answer perfectly to certain demands to the European Directive framework on flooding of which the French transposition was adapted on the 12th of July 2010 by the respective law "National engagement for the environment". After having given an overview of the basis about hydrogeomorphology and the principles of the methodology, some examples of its will be presented, in particular in the catchment basin of the Mekerra, in Algeria.

INTRODUCTION

Les inondations représentent le phénomène naturel le plus fréquent et le plus dommageable en France. Elles revêtent de multiples formes (débordements de cours d'eau, ruissellement pluvial, remontées de nappes phréatiques, submersions marines, etc.). Pendant longtemps, les populations ont vécu en harmonie avec les éléments, à proximité des cours d'eau, qui était indispensables à la vie et à l'économie ; alimentation en eau, apport de limons fertiles dans les plaines de débordement, navigation, industries, etc. Mais si ces populations avaient compris tout le parti qu'elles pouvaient tirer des cours d'eau, elles avaient aussi appris à s'en méfier en adaptant l'implantation des villages, le plus souvent localisés sur les terrasses et plateaux dominant les vallées ou en mettant en œuvre des dispositifs de protection efficaces : levées, puis digues sur la Loire, murs d'enceinte, etc. Mais petit à petit, les hommes ont commencé à oublier leur culture du risque et les extensions urbaines se sont progressivement étendues au pied des villages anciens, dans la plaine inondable. Ce mouvement s'est considérablement accéléré lors de la reconstruction après la seconde guerre mondiale, à partir des années 1945. Une autre étape a été franchie dans les années 1965-70, lorsque les ingénieurs ont considéré qu'il était possible de se protéger totalement des inondations en construisant des digues. De nombreuses zones industrielles ont alors été implantées dans les lits majeurs des cours d'eau. Les inondations qui se sont produites depuis ont le plus souvent envahies les zones théoriquement protégées en détruisant en partie les digues ou en passant au-dessus. Ces événements sont venus rappeler que les digues n'étaient pas fiables à 100% et qu'il convenait de mieux prendre en considération le fonctionnement naturel des cours d'eau. Les inondations catastrophiques du Mississipi, en 1993, ont d'ailleurs conduits les américains à revoir leur système de protection, notamment en détruisant une partie des digues pour restituer un espace de liberté au cours d'eau.

Le bilan des catastrophes qui reviennent régulièrement montre que l'accroissement de l'urbanisation dans les zones inondables a rendu la société est de plus en plus vulnérable, d'autant plus que la plus grande mobilité de la population conduit souvent cette dernière à s'installer dans des espaces nouveaux, dont elle ne connaît ni les caractéristiques physiques, ni les éventuels aléas. Les deux derniers événements, survenus en février sur le littoral atlantique (tempête Xynthia en février 2010 sur le littoral de Vendée et de Charente-Maritime) et en juin dans le département du Var ont respectivement coûté 1,2 milliards d'Euros, en première estimation (54 morts) et 700 millions d'euros (25 morts). Aujourd'hui, la France compte environ 19 000 communes exposées aux inondations et ces phénomènes mobilisent environ 49% des indemnités reversées par les assurances aux victimes des catastrophes naturelles.

Dès 1982, le gouvernement Français a décidé de mettre en place une politique de prévention des risques naturels. A cet effet, il a adopté une loi, le 13 janvier, relative à l'indemnisation des victimes des catastrophes naturelles et il a installé un Commissariat aux risques naturels majeurs, sous l'autorité d'Haroun Tazieff. Cette loi a été à l'origine de la mise en place de plans d'exposition aux risques (PER) qui devaient permettre de réglementer l'occupation des sols, en s'appuyant sur une meilleure connaissance des risques. Ces PER ont été à l'origine du développement d'une méthodologie d'analyse et de cartographie des aléas et de la vulnérabilité des territoires. Pour ce qui concerne les inondations, il a été convenu de calculer les aléas par modélisation hydraulique afin de définir l'enveloppe spatiale et les caractéristiques physiques d'inondations pour une fréquence de retour décennale et centennale et d'établir leur cartographie à l'échelle du 1/5 000. Cependant, les services de l'Etat étaient conscients des limites de la modélisation, dont les résultats sont étroitement dépendants du nombre et de la qualité des données utilisées pour caler le modèle, et du fait qu'elle représentait une démarche onéreuse, quelquefois disproportionnée aux enjeux territoriaux.

Aussi, parallèlement à l'élaboration des plans d'exposition aux risques, le ministère de l'équipement a-il-décidé de mettre au point une autre méthode d'analyse (Masson, 1983 ; Garry, 1985), complémentaire et préalable à la modélisation lorsqu'elle se justifie, l'approche hydrogéomorphologique. Des études avaient déjà été engagées dans la seconde moitié du 20e siècle pour appliquer la géomorphologie à la connaissance des cours d'eau, notamment dans les années 1960 par Tricart et Vogt. Cependant, ces essais de cartographie sont essentiellement restés limités au champ universitaire et n'ont, à notre connaissance, jamais donné lieu à une application opérationnelle. Si le concept était lancé, il devait être développé. C'est ce que le ministère de l'équipement a entrepris à partir de 1982.

Cette méthode a été progressivement développée, ses résultats comparés aux résultats obtenus par modélisation, mais aussi confrontés à des événements importants (inondations de l'Aude en 1999, du Gard en 2002 et 2003, etc.). Dans le cas du Gard, le taux de corrélation entre la délimitation des zones inondables par approche hydrogéomorphologique et la crue observée a été supérieur à 90%. Validée par les services de l'Etat, cette méthode a été adoptée à partir de 1995 pour élaborer les Plans de Prévention des risques d'inondation (PPRI) et les atlas des zones inondables. Aujourd'hui, il est envisagé d'y recourir également pour cartographier les inondations exceptionnelles des territoires à risque d'inondation important (TRI) qui seront définis en application de la directive cadre européenne inondation.

Mise au point à partir du milieu méditerranéen, elle a été également testée dans d'autres contextes morpho-climatique, en milieu tempéré océanique, semi-continentale, tropical et semi-aride. Appliquée sur des milliers de kilomètres de cours d'eau en France métropolitaine, elle a fait l'objet d'une cartographie systématique des principales rivières de Nouvelle Calédonie et s'est révélée tout aussi pertinente dans les analyses menées en Guadeloupe, à la Réunion, en Polynésie Française et en Algérie.

Cette communication a pour vocation d'apporter à toutes personnes intéressées par la méthode hydrogéomorphologique des éléments de repères pour les aider à la mettre en œuvre. A cette fin, elle présentera successivement les fondements de la méthode, puis les éléments de caractérisation hydrogéomorphologique des zones inondables, la correspondance entre ces unités et les crues, enfin les conditions de sa mise en œuvre et ses résultats, en prenant notamment pour exemple une application menée avec succès en Algérie sur le bassin de la Mekerra (4).

Les fondements de la méthode

La méthode hydrogéomorphologique est issue d'une discipline scientifique, la géomorphologie, qui décrit et interprète les formes du relief terrestre (Coque, 1993) à partir de ses composantes topographiques et des formations (matériaux) qui leur sont associées. Celles-ci, qui ont été mises en place récemment, au regard de l'histoire de la terre, résultent des interactions entre le support géologique (substratum) et les agents externes que sont l'atmosphère et l'hydrosphère. L'hydrogéomorphologie s'appuie plus particulièrement sur les principes fondamentaux de l'une de ses composantes, la géomorphologie fluviale, pour analyser la formation et le fonctionnement des plaines alluviales et des cours d'eau (figure 1). Elle a pour finalité de définir l'enveloppe des zones inondables et les caractéristiques hydrodynamiques de la plaine alluviale fonctionnelle.

⁴ Nous remercions Monsieur le directeur de l'hydraulique de la wilaya de Sidi-Bel-Abbès de nous avoir autorisés à prendre cet exemple pour illustrer l'application de la méthode hydrogéomorphologique au milieu subaride.

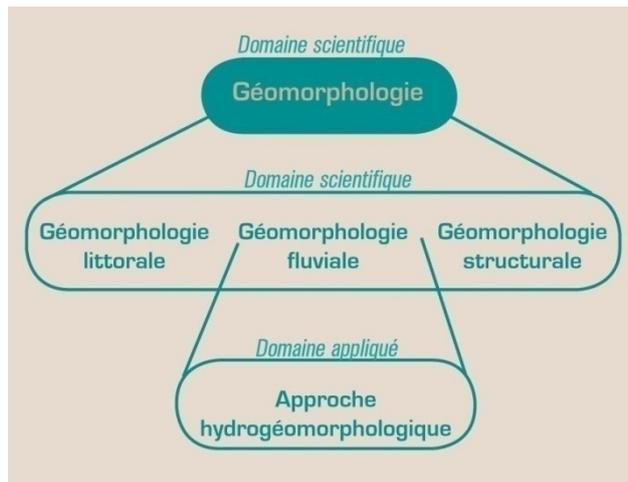


Figure 1 : Place de l'hydrogéomorphologie dans l'analyse géomorphologique des territoires (DIREN/DGUHC)

Mais avant de préciser l'organisation et le mode de fonctionnement de la plaine alluviale fonctionnelle, il est nécessaire de situer cette unité d'analyse dans son contexte spatial global.

Les bassins versants

L'étude des vallées s'inscrit tout naturellement dans un cadre spatio-temporel dont l'enveloppe est le bassin versant. Celui-ci est défini par les géographes comme tout ou partie d'un bassin hydrographique. Pour certains, « il a pour axe le cours d'eau principal et pour limite la ligne de partage des eaux le séparant des bassins versants adjacents »⁽⁵⁾ alors que pour d'autres, « il couvre toute l'étendue qui est en amont d'une station de mesures et dont les eaux versent en ce point »⁽⁶⁾. Il existe quelques modes d'écoulement particuliers, comme dans les régions karstiques, où la circulation de l'eau interne est intense et complexe. Elle se traduit par une perte éventuelle d'une partie des eaux qui réapparaissent à plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres. C'est le cas, par exemple, des pertes de la Loire, qui alimentent le Loiret, ou du Lez, dans l'Hérault, dont le point de source correspond à une résurgence d'eaux infiltrées dans les Causses. Mais, dans le plus souvent, la limite du bassin versant est d'ordre topographique, c'est-à-dire qu'elle est représentée par la ligne des crêtes le séparant du bassin versant voisin (figure 2).

⁵ Pierre Georges, *Dictionnaire de géographie*

⁶ Roger Brunet, *Les mots de la géographie*, Reclus, la Documentation Française, 1996

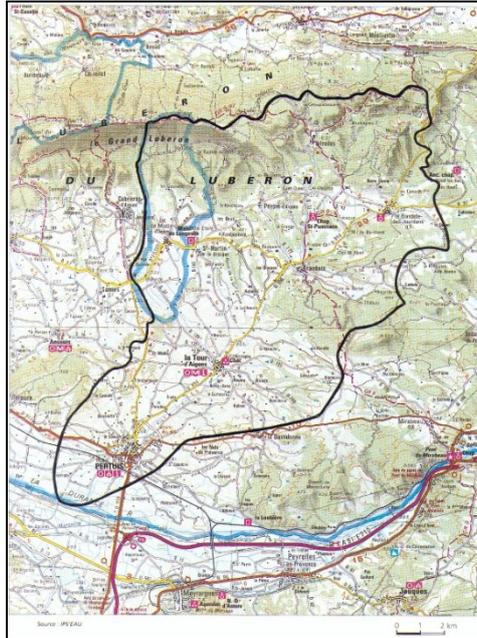


Figure 2 : Délimitation du bassin versant de l'Eze

L'échelle des bassins versants varie dans des proportions importantes, depuis celles des plus grands fleuves (la Seine ou la Loire) à celui de petits fleuves côtiers limités à un ou deux kilomètres carrés, ou de minuscules sous-bassins versants.

La taille, la forme des bassins versants, leur relief et leur géologie jouent évidemment un rôle déterminant sur les conditions de ruissellement et le temps de propagation des précipitations jusqu'à l'émissaire, c'est à dire sur les caractéristiques des crues. Ainsi, par exemple, la concentration des confluences sur une courte distance favorisera-t-elle la conjugaison des ondes de crues et une montée rapide des eaux.

Les vallées

Dans chaque bassin versant élémentaire, les eaux de ruissellement diffus s'écoulent selon une ligne continue, le talweg, reliant les points les plus bas du bassin, et inclinée de l'amont vers l'aval selon la plus grande pente en empruntant grossièrement l'axe du bassin. Les terrains situés de part et d'autre du talweg constituent les versants, qui servent de réceptacles à la pluie et de surface de ruissellement.

Schématiquement, il est donc possible de résumer une vallée à la portion d'espace comprenant un talweg et deux versants. Dans notre démarche, en fait, nous distinguerons deux autres ensembles : la plaine alluviale fonctionnelle, qui concentre le fonctionnement hydraulique du cours d'eau actuel, et l'encaissant, qui correspond au contexte physique (géologique, etc.) dans lequel cette plaine s'inscrit.

L'encaissant

Il est constitué par les versants et les formes d'accumulations qui se sont déposées dans les parties basses.

- **Les versants**

Sur les interfluvies, la morphogenèse dominante est l'érosion aréolaire qui résulte d'agents atmosphériques, d'agents biologiques et du ruissellement diffus. Ces agents sont contrôlés par le climat régional, mais aussi par la végétation, la pente, la lithologie et l'orientation. En montagne, où les pentes sont fortes, les précipitations (pluie et neige) plus abondantes et la

gélifraction plus efficace, l'instabilité des versants peut devenir forte. Des masses de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes peuvent ainsi rester en équilibre instable, menaçant les vallées en contrebas (Séchilienne en Savoie, La Clapière dans les Alpes-Maritimes).

- **Les apports et formes d'accumulation**

L'encaissant montre parfois dans sa partie basse des formes d'accumulation comme des terrasses, des cônes de déjection et des colluvions. Les terrasses résultent de l'entaille linéaire qui a incisé les nappes alluviales grossières qui se sont mises en place lors des phases froides du quaternaire. Ces terrasses se sont plus ou moins bien conservées en fonction des caractéristiques lithologiques, tectoniques et morphogéniques locales. Elles peuvent dominer la plaine alluviale fonctionnelle de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. La région de Grenade sur Garonne, par exemple, en montre de très beaux vestiges. D'autres apports, latéraux cette fois, peuvent aussi être observés. Les plus spectaculaires sont les cônes de déjection, qui se construisent lorsqu'un cours d'eau torrentiel affluent rejoint la vallée principale. Ces cônes, dont la pente moyenne dépasse 5%, peuvent repousser la rivière principale contre le versant opposé de la vallée. Du fait de leur dynamique torrentielle, ils sont très exposés aux risques d'inondation. Les colluvions, formations hétérométriques produites par l'érosion aréolaire des versants, viennent s'accumuler sur le bord externe des terrasses ou au fond de la vallée. En région méditerranéenne, ils sont le plus souvent la conséquence de la mise en culture des versants.

La plaine alluviale fonctionnelle

La formation de la plaine alluviale fonctionnelle, aujourd'hui potentiellement inondable, correspond à la période interglaciaire dite Holocène, développée depuis la fin de la dernière période glaciaire (Würm). Le basculement entre ces deux périodes, il y a environ 15 000 ans, correspond au maximum de la régression des mers (- 120 mètres) et à l'achèvement de l'incision dans le substratum d'une gouttière continue reliant ce niveau de base aux têtes de vallées. Il correspond aussi à une phase de sédimentation grossière généralisée sur tout le profil longitudinal, dont la dynamique s'est ensuite progressivement atténuée jusqu'à nos jours, où elle ne concerne plus que les parties amont des vallées. Au fur et à mesure de la réduction de la pente hydraulique consécutive à la remontée du niveau de base, cette sédimentation grossière a cédé la place aux dépôts d'alluvions de granulométrie plus réduite (sables, argiles, limons), adaptées à la diminution de la compétence du cours d'eau. Le matelas de galets et graviers recouvrant le fond de la gouttière s'est ainsi trouvé fossilisé sous ces nouvelles couches de sédiments, épaisses de plusieurs dizaines de mètres dans la partie aval du profil. Il affleure par contre dans les parties moyenne et amont, mais n'est plus mobilisé, superficiellement, qu'en fond de lit et sur les berges.

La surface sur laquelle se concentrent aujourd'hui les écoulements générateurs de crues résulte donc d'une évolution longue et complexe de la vallée. Relativement horizontale en profil transversal, cette surface n'a pas (encore) été amputée par l'effet d'un nouveau cycle climatique. Elle occupe de ce fait la totalité du « fond » de la vallée, en s'inscrivant dans un contexte morphologique constitué de versants entrecoupés ou non par des lambeaux de terrasses.

Plus ou moins large, la plaine alluviale fonctionnelle est en général emboîtée dans ces accumulations, souvent au centre de la vallée. Elle s'individualise nettement pour de grands fleuves ou rivières. Mais elle peut également être absente, lorsque de petits cours d'eau s'entaillent directement dans les terrasses récentes wurmiennes ou Holocènes, où quand les cours d'eau s'écoulent directement dans le substratum cohérent, formant des gorges ou des canyons (gorges du Tarn en France).

L'organisation de la plaine alluviale fonctionnelle

Le profil transversal d'une plaine alluviale fonctionnelle montre classiquement un emboîtement de lits nommés (Coque, 1993) d'étiage, mineur, moyen et majeur sur lequel, parfois, peut se distinguer un lit majeur exceptionnel.

- Le lit mineur est normalement bien délimité entre des berges abruptes, plus ou moins élevées et continues. A l'amont, les écoulements s'effectuent selon une pente hydraulique forte, soit directement sur le substratum, soit le plus souvent sur un matelas de gros éléments (galets, voire blocs). La pente diminue ensuite progressivement, favorisant le dépôt d'alluvions. Ces dernières, qui perturbent l'écoulement des eaux, obligent quelquefois le cours d'eau à se diviser en plusieurs branches ou chenaux, dont l'ensemble constitue un « lit en tresses ». Lorsque la pente devient faible, le lit mineur évolue en se concentrant sur un chenal unique qui forme des méandres. Il est constamment occupé, sauf dans le cas des oueds par exemple. Il est peu, ou pas colonisé par la végétation aérienne en raison de la fréquence de l'écoulement des eaux ;
- Le lit d'étiage ou chenal d'étiage, étroit, est compris à l'intérieur du lit mineur dans lequel il forme souvent des sinuosités ;
- Le lit moyen, souvent séparé du lit mineur par un bourrelet de berge, est modelé par les crues fréquentes (1 à 5, voire 10 ans). Il est bien caractérisé dans les régions à pluviométrie contrastée et dans les traversées de piedmonts de massifs montagneux, mais il ne se distingue pas toujours dans le cas de rivières de plaine et de contexte climatique régulier. Il est couvert d'une végétation plus ou moins hygrophile (aulnes, saules, peupliers) qui freine l'écoulement des eaux au moment des crues et peut provoquer une surélévation sensible du niveau de l'eau par rapport au lit mineur ;
- Le lit majeur, le plus large, est couvert d'alluvions fines (limons et argiles) et souvent colonisé par une végétation moins hygrophile. Sa limite externe correspond à l'enveloppe des crues passées du cours d'eau, qualifiées de rares ou exceptionnelles. Elle peut être progressivement raccordée à une terrasse alluviale caillouteuse. Quelquefois, en particulier en milieu méditerranéen et aride, un lit majeur exceptionnel a pu être observé. Il se distingue alors du lit majeur par un talus peu élevé, en pente forte.

La caractérisation hydrogéomorphologique des zones inondables : contexte général

La finalité de l'analyse hydrogéomorphologique consiste à cartographier les zones inondables d'une plaine alluviale fonctionnelle. Elle nécessite d'identifier les différentes unités géomorphologiques et de les délimiter par rapport à l'encaissant en exploitant deux sources d'information : d'une part la morphologie, d'autre part les critères secondaires que constituent la sédimentologie et l'occupation des sols.

La morphologie

La morphologie, qui permet d'interpréter la topographie et la micro-topographie du milieu alluvial, est le critère le plus déterminant pour identifier et analyser les caractéristiques des différentes unités géomorphologiques et de leurs limites, matérialisées par des talus. Selon les

cas, ces derniers délimiteront deux ou trois lits. Talus et unités spatiales sont deux entités morphologiques complémentaires et indissociables (figure 3).

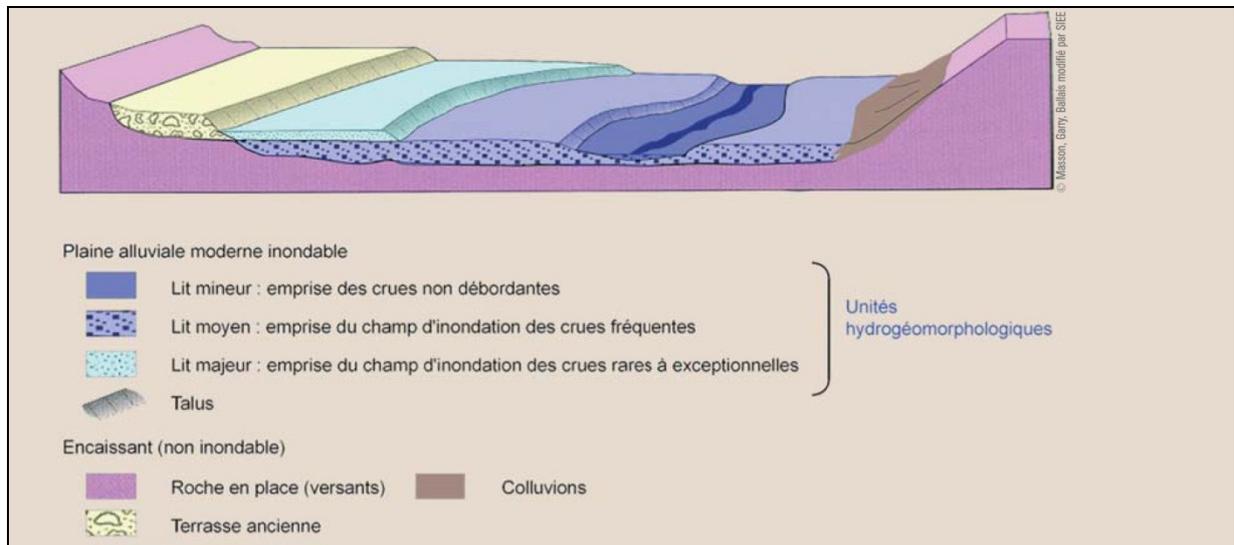


Figure 3 : Schéma général d'une plaine alluviale fonctionnelle et de ses différentes unités géomorphologiques

Les talus

Discontinuités topographiques orientées grossièrement dans le sens des écoulements des eaux débordantes, ils constituent l'élément morphologique le plus apparent à la fois sur le terrain et en photo-interprétation. Ils sont le produit de processus morphogéniques développés à différentes échelles de temps et d'espace. On peut distinguer 2 grands types de talus :

- **Le talus externe de la plaine alluviale fonctionnelle**

Il constitue une surface à forte inclinaison marquant une séparation topographique nette entre l'un des trois lits de la plaine alluviale fonctionnelle et l'encaissant, terrasse ou versant (figure 4). Hérité de l'entaille fini-pléistocène, il s'agit d'une forme fossile qui a été progressivement masquée par l'accumulation de dépôts sédimentaires successifs. Très visible dans certaines configurations, il peut donc aussi s'effacer partiellement ou totalement, notamment à la suite :

- du remblaiement complet de la gouttière d'érosion. Dans ce cas, les crues exceptionnelles débordent au-delà, sur la terrasse ;
- du biseautage du talus par une érosion du versant ;
- du recouvrement du talus par des apports sédimentaires en provenance du versant.

Ce talus représente une limite spatiale majeure car il bloque l'étalement latéral des crues. Il délimite donc le champ d'inondation maximal occupé par les crues les plus importantes à quelques exceptions près, lorsque les cotes dépassent son arête sommitale (conséquence par exemple d'un aménagement transversal modifiant sensiblement l'écoulement des eaux).

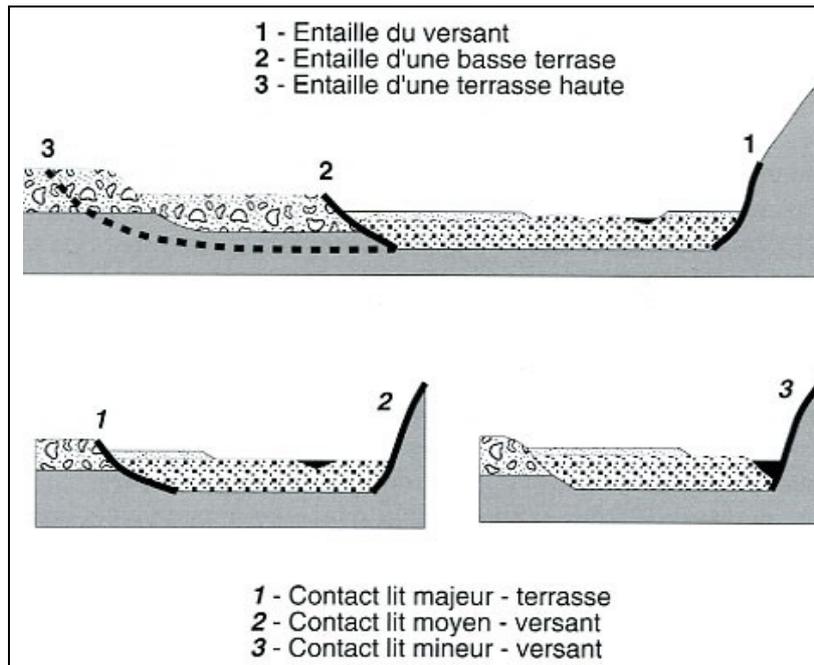


Figure 4 : Relations entre les lits d'une plaine alluviale fonctionnelle et l'encaissant (Masson, Garry, Ballais, 1996)

- **Les talus internes à la plaine alluviale fonctionnelle**

Ces sont des talus résultants exclusivement d'une morphogénèse récente. Ils sont donc évolutifs à l'échelle humaine, à des rythmes variables selon leur situation et les contraintes hydrauliques qu'ils subissent :

- ✓ le talus qui sépare le lit moyen du lit majeur est le plus significatif vis-à-vis des inondations. Il résulte de crues récentes, mais espacées dans le temps, ce qui en fait un talus peu évolutif à l'échelle humaine. Il se forme par entailles successives des sédiments du lit majeur par des bras de décharge divergents du lit mineur ;
- ✓ le talus externe de lit mineur présente des caractéristiques comparables à celles du talus externe de lit moyen. Son alternance de concavités et de convexités organisées en méandres est directement liée au fonctionnement hydraulique du cours d'eau.

Les lits, unités hydrogéomorphologiques

Les lits sont des unités spatiales comprises entre deux talus continus, constituant les surfaces d'écoulement des eaux. Ils sont hiérarchisés en fonction des débits à écouler, depuis les débits d'étiage jusqu'à ceux des crues exceptionnelles.

- **Les lits d'étiage et mineur**

Ils montrent des formes actives de la dynamique fluviale, en évolution permanente, caractérisées par la continuité amont-aval, la répétitivité morphologique du système mouille-seuil et l'irrégularité du profil longitudinal.

Le lit mineur se traduit en général par la présence de l'eau vive et sa morphologie de gouttière continue d'amont en aval (photographie 1). Il est le lieu privilégié des processus morphodynamiques caractéristiques de l'écoulement fluvial : érosion et sédimentation actives, permanente ou intermittente, tendance à la formation de méandres et à leur glissement latéral et d'amont en aval. La figure 5 schématise la morphologie d'un tronçon de lit mineur,

dont la dynamique se traduit par la dissymétrie des berges, avec alternance des rives concaves abruptes soumises à l'érosion et des rives convexes à pente faible sur lesquelles se déposent les sédiments. Il en résulte des variations importantes de la profondeur du lit, avec la formation de moulles répétées régulièrement en profil en long et séparées par des seuils à profil symétrique.



Photographie 1 : Lit mineur de l'Oued Mekerra à Moulay Slissen (Ginger)

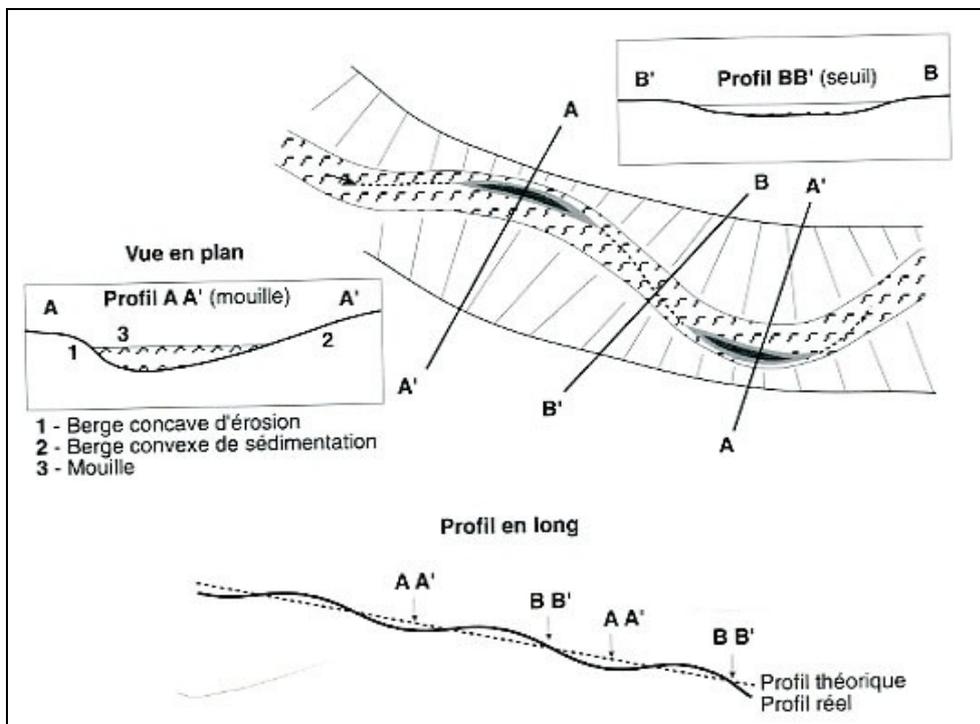


Figure 5 : Hydrogéomorphologie d'un lit mineur (Masson, Garry, Ballais, 1996)

Ces processus ont été à l'origine de la formation de la vallée, chaque stade de son évolution ayant permis, par déplacements latéraux des flux principaux, le balayage d'une surface très supérieure à celle de ce lit mineur. Le colmatage progressif de l'entaille fini-pléistocène, accompagné ou non par des aménagements hydrauliques, a limité de plus en plus au cours du

temps l'espace de migration du cours d'eau, circonscrit aujourd'hui au lit mineur et, à l'amont, au lit moyen.

- **Le lit moyen**

Il présente les principaux éléments morphologiques du lit mineur, mais fragmentés en plusieurs tronçons qui se recoupent les uns les autres et témoignent de la dynamique des crues successives. Sa morphologie, en partie réactivée par les nouvelles crues apparaît quelquefois confuse à reconstituer. Les photographies aériennes sont un précieux atout pour y parvenir (figure 6). Fait le plus marquant, chaque portion de méandre présente le profil d'un lit mineur, avec un chenal, une berge convexe bombée par les atterrissements et une berge concave abrupte, taillée par l'érosion.

La reconnaissance et la délimitation du lit moyen est aussi parfois rendue difficile par les actions anthropiques qui l'ont affecté (extraction de matériaux, implantation d'ouvrages hydrauliques, défrichements agricoles, etc.) et qui ont sensiblement modifié sa morphologie.

- **Le lit majeur**

Le lit majeur se caractérise morphologiquement par une surface topographique sub-horizontale en profil transversal et légèrement inclinée d'amont en aval. Il recouvre d'anciens lits moyens et mineurs en les fossilisant. Il offre une morphologie simple, dont la planéité est due à la sédimentation de couches superposées de limons qui se déposent en fin de crue, lorsque la vitesse du courant est devenue trop faible pour assurer le transport des matières en suspension (photographie 2). Mais sa surface peut aussi être affectée par des dépressions correspondant à des chenaux d'anciens lits mineurs non entièrement comblés par les dépôts sédimentaires.

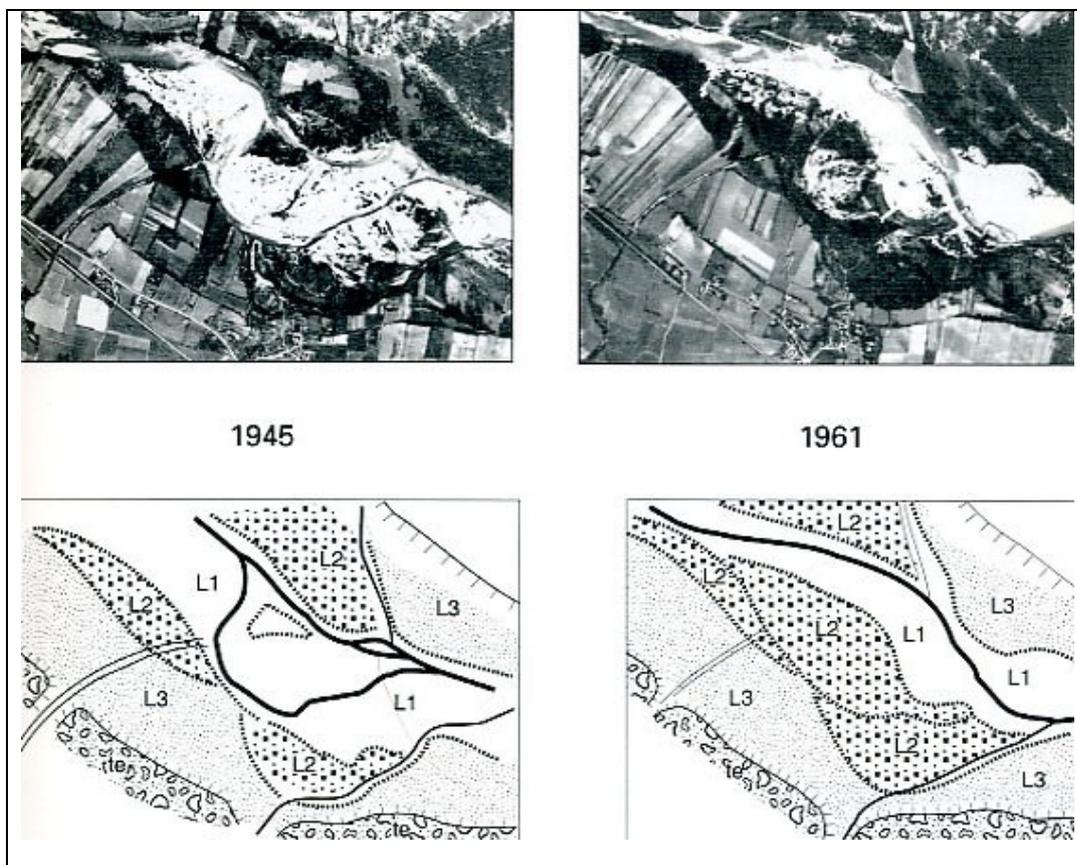


Figure 6 : Evolution du lit moyen du Gardon d'Anduze entre 1945 et 1961 (Masson, Garry, Ballais, 1996)



Photographie 2 : La Mekerra et son lit majeur à Boukhanéfis (Ginger)

- **Le lit majeur exceptionnel**

Reconnu récemment comme unité hydrogéomorphologique, il correspond le plus souvent à un raccordement progressif entre le lit majeur et le versant ou à une zone de colluvionnement important, notamment dans les tronçons de vallées entaillés dans des formations géologiques fortement érodables, telles que les marnes, les argiles et, plus encore, les molasses. Dans un nombre encore limité de cas, observés actuellement en milieu méditerranéen et subaride, un lit majeur dit « exceptionnel » a pu être identifié entre le lit majeur ordinaire et la terrasse finipléistocène. La surface topographique de cette unité morphologique présente la même régularité que celle du lit majeur, et la limite externe de la zone inondable serait constituée par le talus de la terrasse alluviale dominant ce lit majeur exceptionnel.

- **Les relations spatiales entre les lits**

Les largeurs respectives des lits varient d'une vallée à l'autre, notamment en fonction de la réponse hydrologique du bassin versant. En général, l'ensemble lit moyen/lit majeur s'étend beaucoup plus largement que le lit mineur. Cet écart, qui est d'autant plus important lorsque le régime du cours d'eau est irrégulier, dépend aussi de la nature géologique du bassin versant. En présence de terrains perméables de type karstique, par exemple, l'infiltration des pluies d'intensité faible à moyenne conduit à limiter l'extension du lit mineur et favorise un étalement du lit majeur.

La sédimentologie

Dans le cas général, la granulométrie des formations alluviales déposées par le cours d'eau dépend, en un point donné, de la compétence du courant, directement liée à sa vitesse et à sa charge solide. Elle varie ainsi globalement, à l'échelle de la vallée, par la décroissance de la taille des particules sédimentées. Cette décroissance s'opère à la fois spatialement de l'amont vers l'aval et, en un même lieu, du bas vers le haut, en raison de la diminution de la pente d'écoulement. Elle varie également, en profil transversal, depuis les lits mineur et moyen, dans lesquels se déplacent les particules les plus grossières, jusqu'au lit majeur caractérisé par

le dépôt des particules les plus fines, allant des sables aux limons et aux argiles (photographie 3).

L'analyse des sédiments de la plaine alluviale fonctionnelle appelle quelques remarques :

- Les alluvions grossières présentent globalement des granulométries comparables à celles des alluvions de terrasse, ce qui peut générer une confusion lorsque le niveau topographique de ces deux ensembles est peu différencié. Sur le terrain, cependant, leur distinction peut se faire en observant la teinte du matériau, reflet de ses rapports avec la nappe phréatique. En effet, les alluvions de terrasses, restées très longtemps hors d'eau, ont subi des phénomènes d'oxydation qui ont transformé en oxyde ferrique rouge (Fe^2O_3) le fer contenu dans le sédiment, donnant à celui-ci une teinte d'ensemble beige à ocre. Au contraire, les alluvions grossières de la plaine alluviale fonctionnelle, noyées par la nappe phréatique, ont subi des phénomènes de réduction, avec production de fer ferreux (FeO) de teinte sombre, colorant le sédiment en gris-bleu ;
- L'observation visuelle des alluvions fines (sables, et surtout limons et argiles) des lits majeurs ordinaire et exceptionnel, ne peut pas toujours permettre de les distinguer des colluvions fines issues des versants. Dans ce cas, une analyse granulométrique, effectuée dans un laboratoire, peut aider à différencier les deux types de dépôt ;
- Il est également important d'apprécier les modifications qui peuvent être apportées par les affluents, en particulier lorsqu'ils ont déposé des alluvions de nature pétrographique ou de granulométrie différentes de celles du cours d'eau principal.



Photographie 3 : Coupe dans le lit majeur de la Péronnelle (Garry)

La couverture végétale

Elle reflète très fidèlement les conditions édaphiques liées aux unités géomorphologiques. En règle générale, la répartition des espèces végétales au sein d'une plaine alluviale traduit les rapports entre la surface du terrain naturel et la nappe phréatique. On observe ainsi un étagement de la végétation en fonction de la profondeur de la nappe, qui est très sensible en climat méditerranéen (figure 7). L'observation de la répartition des espèces végétales dans l'espace alluvial permet donc d'apporter des informations complémentaires aux données d'ordre morphologique.

Généralement, la végétation se répartit comme suit :

- Le lit d'étiage et mineur sont à peu près dépourvus de végétation émergée et présentent des plages de galets souvent colonisées, de façon sporadique, par des espèces herbacées (photographie 4) ;
- Le lit moyen permet l'implantation d'espèces végétales constitutives du groupement des forêts riveraines des cours d'eau, comprenant des associations végétales différenciées en fonction des conditions climatiques régionales (ripisilve à peupliers en domaine méditerranéen, aulnaie en altitude, chênaie, etc.) ;
- Le lit majeur, initialement occupé lui aussi par la forêt riveraine, fait depuis très longtemps l'objet d'une mise en culture systématique, éradiquant pratiquement la végétation spontanée.

Au total, il ressort une typologie de base où se succèdent un lit mineur partagé entre eau courante, plage dénudée et berge boisée, un lit moyen couvert d'une ripisilve et un lit majeur cultivé. Cependant ces différents lits peuvent subir des variations physionomiques dont il faut rechercher l'origine.

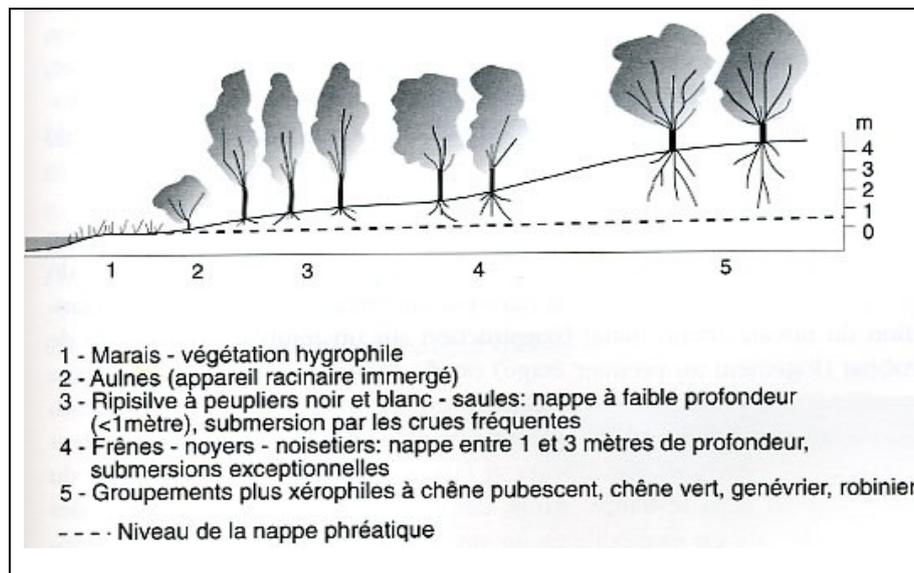


Figure 7 : relations de la végétation avec la le niveau de la nappe en région méditerranéenne (Masson, Garry, Ballais, 1996)



Photographie 4 : Formations arbustives de repousse sur les iscles du lit mineur du Gardon d'Anduze (Garry)

L'occupation humaine

Elle peut être appréhendée à partir de quatre volets :

- La localisation des constructions

Les hommes ont longtemps vécu avec la mémoire locale des inondations en intégrant le fonctionnement du milieu alluvial. Ainsi, en France, les constructions anciennes, antérieures au XXème siècle, se situent-elles de manière quasi systématique en bordure externe des zones inondables :

- ✓ en sommet de talus limitant une basse terrasse alluviale ;
- ✓ sur un promontoire rocheux (parfois un dépôt de tufs ou de travertins) ;
- ✓ en pied de versant, sur un dépôt de colluvions, ou sur un cône torrentiel peu actif.

Cette adaptation aux conditions hydrogéomorphologiques est observable partout, que ce soit le long de cours d'eau à régime régulier, comme dans la vallée de la Meuse ou le long des rivières méditerranéennes. L'observation de l'urbanisation d'une vallée fournit par conséquent de précieuses indications sur les risques d'inondation (figure 8).

Lorsque des constructions anciennes ne respectent apparemment pas ces règles, plusieurs raisons peuvent le justifier :

- ✓ l'utilisation d'une surélévation naturelle localisée du terrain ayant permis l'implantation du noyau urbain initial ;

- ✓ l'adaptation de l'habitat (logement au premier étage) ou du mode de vie (refuge en étage en période de crue), qui autorise l'établissement d'un bâtiment d'exploitation agricole au cœur d'une plaine alluviale trop vaste pour être mise en valeur depuis un lieu éloigné (Saône) ;
- ✓ l'édification de remparts, comme à Tours (R. Dion, 1961), Bédarrides ou Avignon, ce qui n'excluait pas totalement le risque.

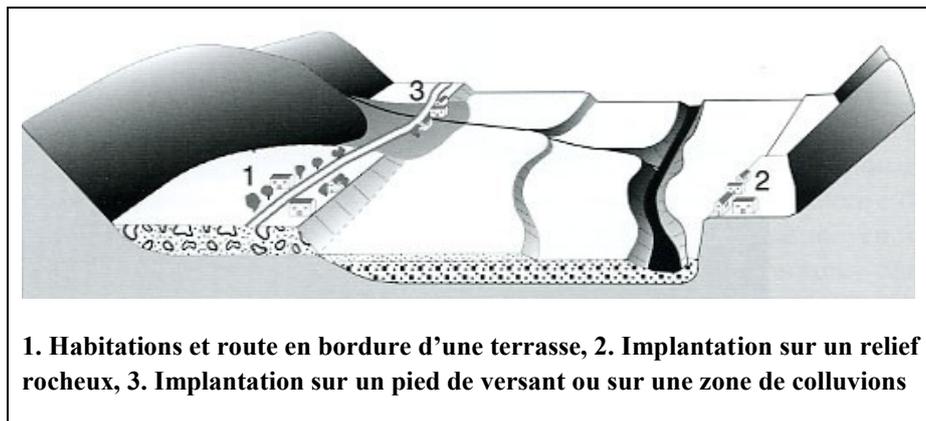


Figure 8 : Relation des urbanisations anciennes avec les zones inondables (Masson, Garry, Ballais, 1996)

- Les vestiges historiques et archéologiques

La concordance urbanisation ancienne - zone non inondable, qui constitue en règle générale un indice fiable de délimitation des zones inondables, ne peut cependant s'appliquer sans précaution à toutes les époques de développement urbain. Sa validité dépend essentiellement du rythme des modifications géomorphologiques subies par les plaines alluviales fonctionnelles. Ainsi les archéologues mettent-ils fréquemment à jour des vestiges datant de l'époque romaine, ensevelis sous plusieurs mètres de sédiments, sans que l'on puisse en déduire que cette inondabilité affectait déjà ces sites lors de l'édification des constructions. A l'inverse, on constate que des urbanisations implantées dans le passé hors zone inondable ont depuis été affectées par plusieurs crues. Cette évolution résulte de l'accumulation progressive dans les lits majeurs des alluvions fines apportées par les crues (Vaison-la-Romaine).

- L'adaptation des activités agricoles aux caractéristiques de la plaine alluviale fonctionnelle

Les activités agricoles étaient adaptées, dans le passé, à la contrainte liée à l'aléa inondation : lit majeur réservé aux cultures annuelles, lit moyen non cultivé, parfois utilisé en prairie. Cette précaution a été par la suite progressivement abandonnée, avec l'aide d'opérations publiques ou privées (dès le XIXe siècle) visant à étendre les terrains cultivables au détriment du lit moyen. Celles-ci (construction d'épis, casiers de limonage, etc.) sont venues perturber le fonctionnement géomorphologique des plaines alluviales (rétrécissement des lits en tresse, élargissement des lits majeurs), notamment en France méditerranéenne et en Italie du Nord. Dans la deuxième moitié du XXe siècle, la pression agricole, encouragée parfois par la disparition des crues fréquentes laminées par les réservoirs des barrages hydroélectriques, a conduit à des défrichements de la forêt riveraine, en toute illégalité comme dans la basse Durance.

- La structure du parcellaire

Reflétant en zone inondable l'organisation du réseau de drainage, la structure du parcellaire fournit également des indications intéressantes sur l'organisation hydrogéomorphologique de la plaine alluviale. Ainsi, le lit majeur est-il fréquemment découpé en lanières étroites perpendiculaires à l'axe du cours d'eau. Lorsque la mise en valeur agricole a empiété sur le lit moyen, ces lanières sont distribuées en éventail, reproduisant la géométrie d'un ancien méandre. Ces structures contrastent fortement avec celles qui prédominent sur les terrasses alluviales, les collines ou les plateaux environnants, à parcellaire plus ou moins rectangulaire.

La caractérisation hydrogéomorphologique des zones inondables : facteurs de variation

Le schéma général que nous venons de décrire doit être précisé dans son application locale ou régionale afin de tenir compte de particularités liés aux facteurs naturels et aux transformations apportées par les hommes. Nous résumerons ici, les principaux éléments à prendre en considération.

Les facteurs naturels

La variabilité géomorphologique amont-aval

Les modifications géomorphologiques résultant des variations de débits et de pente peuvent être synthétisées selon un schéma-type basé sur la différenciation de portions de vallées successives caractérisées chacune par des dominances morphologiques et fonctionnelles.

- **La partie amont, la zone d'ablation**

En amont d'un bassin versant, la pente longitudinale du cours d'eau et celles, transversales, des versants, sont fortes. Elles déterminent un écoulement très rapide des eaux de pluie qui accroît la capacité d'érosion et la compétence (capacité de transport) du cours d'eau. Les apports de matériaux, qui proviennent de l'ablation des versants, tout particulièrement de l'érosion des sols, créent de ce fait des formes particulières telles que des cônes torrentiels, des glacis, et des vallons en berceau (Masson, Garry, Ballais, 1996).

- **La partie moyenne, zone de transport**

Les caractéristiques morphologiques induites par la dynamique torrentielle peuvent se développer sur de longues distances vers l'aval pour les grands cours d'eau à forte pente longitudinale. L'apport d'alluvions grossières, effectué par charriages successifs, est supérieur à la capacité de remise en mouvement et de transport du cours d'eau. Il se crée alors un lit en tresses comprenant un grand nombre de chenaux d'écoulement. L'ensemble de ces chenaux, séparés par des bancs, constitue alors un vaste lit moyen, qui occupe une partie variable de la plaine alluviale fonctionnelle. La végétation riveraine représente un obstacle à l'écoulement des eaux et au transport des bois flottés qui contribue à stabiliser le lit moyen. Les crues débordant latéralement, au travers d'une ripisilve de densité moyenne, constituent un lit majeur de largeur croissante vers l'aval, qui augmente avec le temps.

- **La partie aval, zone d'accumulation**

A l'approche de la mer, la pente longitudinale du cours d'eau diminue progressivement avec le mouvement eustatique engagée depuis des milliers d'années et la décroissance des vitesses favorise la sédimentation des matières en suspension, de nature argilo-limoneuse. Celles-ci recouvrent d'abord le lit majeur, puis le lit moyen et parfois se déposent même dans le lit

mineur (bouchon vaseux des estuaires). Dans ces conditions, la plaine alluviale fonctionnelle finit par ne plus comporter qu'un lit mineur et un lit majeur.

L'évolution géomorphologique peut également se poursuivre de deux manières différentes :

- ✓ par la création de bourrelets de berge ; les berges de lit mineur sont généralement occupées par une végétation dense arborescente qui ralentit l'écoulement des eaux au passage des crues et favorise le dépôt de limons. Ceux-ci surélèvent peu à peu la berge par rapport au lit majeur privé de la plus grande partie de ces apports sédimentaires et construisent un « lit en toit », caractéristique d'un certain nombre de plaines alluviales côtières telles que celles du Roussillon, de la basse vallée de l'Aude, ou de la Garonne, en France ;
- ✓ par la sédimentation et le rehaussement du lit mineur lorsque la pente hydraulique est faible ou que des endiguements interdisent les débordements. Ce phénomène peut devenir extrêmement dangereux, comme le montre l'exemple du Fleuve Jaune en Chine où la dénivelée transversale peut atteindre 20 mètres.

Les structures hydrogéomorphologiques secondaires

Les unités hydrogéomorphologiques sont fréquemment accompagnées de structures morphologiques secondaires, observables aussi bien dans les parties moyennes et aval des vallées, qui peuvent jouer un rôle important dans la dynamique de crues jusqu'à modifier les aléas dans la plaine alluviale fonctionnelle.

Ces unités peuvent être classées en plusieurs catégories :

- les « annexes fluviales » qui, prenant naissance en bordure du lit mineur ou du lit moyen, traversent tout ou partie du lit majeur, sous forme de « chenaux de crues » ou de « bras morts » (photographie 5)
- les formes résultant de dynamiques sédimentaires qui regroupent :
 - ✓ des formes d'accumulation : bancs de graviers accumulés en rives convexes de méandres et constitutifs de lits moyens, et bourrelets de berges ;
 - ✓ des formes de dépression qui peuvent se retrouver aussi bien dans la partie moyenne et dans la partie aval des vallées.



Photographie 5 : Chenal de crue à Sidi Youcef, activé en mai 2006, se dirigeant vers Sidi Bel Abbès (Ginger)

- les éléments résultant de l'organisation générale du tronçon de vallée, tels que :
 - ✓ la présence de gorges ou de zones d'élargissement de la plaine alluviale ;
 - ✓ la pente hydraulique générale de la plaine, évaluable à partir de la carte topographique au 1.25 000, même si c'est avec une précision limitée, par tronçons longitudinaux homogènes ;
 - ✓ la présence ou l'absence d'une couverture végétale de berge de lit mineur ou de lit moyen (ripisilve) ainsi que l'état de cette végétation, jouant ou non le rôle d'écran perméable vis-à-vis des courants traversiers ;
 - ✓ la présence dans l'encaissant de formations géologiques perméables susceptibles de contenir un aquifère souterrain de grande capacité alimenté par un vaste impluvium pouvant concourir à l'amplification des crues.
- les indices de morphodynamisme actif tels que les encoches d'érosion entaillant la berge de lit mineur et parfois les talus externes de lit moyen ou de lit majeur ou encore les atterrissements observables dans le lit mineur.

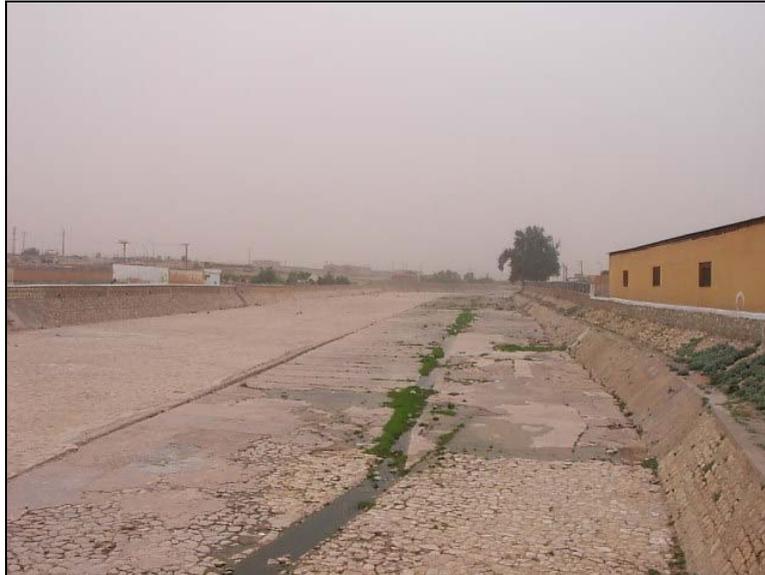
Les facteurs anthropiques

L'aménagement du territoire et les modes d'occupation des sols (spéculations agricoles, ouvrages de protection, infrastructures, urbanisation, etc.) ont pu quelquefois modifier notablement le fonctionnement hydraulique de la plaine alluviale fonctionnelle, soit dans le sens de l'accélération, soit au contraire dans celui du freinage et de la rétention. Leur approche, par photo-interprétation et observations du terrain permet de tenir compte de leur rôle dans l'analyse hydrogéomorphologique des différents lits et de leurs limites.

Les travaux et ouvrages hydrauliques

Les travaux et ouvrages réalisés dans les plaines alluviales peuvent être classés, quelle que soit leur finalité, en fonction de leurs incidences vis à vis de la propagation des crues, à savoir :

- favorisant les écoulements tout en limitant la vulnérabilité aux inondations et aux érosions. Ces travaux et ouvrages relèvent en principe de l'hydraulique fluviale (recalibrages (photographie 6), rescindements, rectifications, dérivations, endiguements, cuvelages, couvertures, épis de protection de berges, seuils), de l'hydraulique agricole (curages, drainages) ou de l'hydraulique urbaine (réseaux d'assainissement pluvial). Mais les extractions de matériaux dans les lits mineurs ont également des répercussions conséquentes sur l'écoulement des crues ;
- faisant obstacle aux écoulements : seuils, barrages, ouvrages de franchissement de plaine alluviale, constructions diverses, clôtures, etc. ;
- favorisant la rétention : barrages, lacs collinaires, techniques alternatives à l'assainissement pluvial ;
- accroissant la vulnérabilité des biens et des personnes : extension d'habitations aux rez-de-chaussée d'immeubles, altération d'ouvrages de protection.



Photographie 6 : L'Oued Mekerra recalibré dans la traversée de Ras El Ma

Les pratiques agricoles

Elles participent à la modification du régime des cours d'eau à différents niveaux :

- En France, la déprise agricole, engagée depuis le XIXe siècle et amplifiée ces cinquante dernières années constitue, du fait de la reforestation spontanée, un facteur favorable à la réduction du ruissellement et à l'atténuation des crues ;
- les drainages agricoles, affectant de nombreuses zones humides ou simplement exposées aux crues, peuvent concourir à accroître les amplitudes des crues ;
- les curages, recalibrages et endiguements réalisés à des fins agricoles ont touché dans le passé un linéaire très important de cours d'eau. Bien que moins spectaculaires que des travaux récents, ils ont également de fortes répercussions sur la formation des crues du fait de leur généralisation. Par ailleurs, le défrichement étendu jusqu'à la berge de lit mineur, en supprimant la fonction protectrice des systèmes racinaires de la ripisylve, favorise les processus d'érosion latérale, particulièrement agressifs en rives concaves ;
- les modifications des structures et des pratiques agricoles, qui portent sur le parcellaire (élimination des haies et des murets, remembrements), sur le choix des cultures (cultures de plein champ ou vignes à la place de prairies ou de friches), ou sur le désherbage des vignes, augmentent systématiquement le coefficient de ruissellement, ainsi que l'érosion des sols (photographie 7). De même, la recherche de nouveaux sols alluviaux cultivables conduit à défricher les forêts riveraines du bord des eaux et par conséquent à fragiliser les berges qui ne sont plus protégées par la ripisylve.

L'imperméabilisation des sols due à l'urbanisation

Elle donne lieu à un accroissement systématique du ruissellement pluvial et, par la pratique des réseaux d'assainissement, à l'accélération des écoulements. Ce phénomène bien connu a suscité le recours aux techniques alternatives au ruissellement pluvial, encore insuffisamment mises en pratique.



Photographie 7 : En France, le développement de la vigne, ici en limite de lit majeur et de terrasse, est souvent venu remplacer les prairies ou les friches. Il a largement favorisé l'écoulement, aggravé parfois par la pose de buses destinées à évacuer l'eau plus rapidement vers les rivières (Garry)

L'impact réel de l'urbanisation est fonction du rapport existant, dans chaque bassin versant, entre les superficies urbanisées, naturelles ou agricoles. Il peut être très important pour des petits bassins versants en grande partie construits, comme dans le cas de Nîmes. Il reste par contre relativement faible dans la plupart des cas correspondant à des bassins versants assez vastes pour que l'urbanisation n'occupe qu'une faible partie (moins de 10%) de leur superficie. Au total, il est indispensable, lors d'une analyse hydrogéomorphologique, de bien différencier les informations liées au fonctionnement « naturel » du milieu alluvial, de celles, découlant des actions anthropiques, qui peuvent modifier dans des proportions très variables selon les cas, le comportement du cours d'eau en crue.

Correspondances entre les unités hydrogéomorphologiques et la caractérisation des crues

L'analyse des unités hydrogéomorphologiques doit être effectuée dans un premier temps en faisant abstraction des aménagements, c'est-à-dire en reconstituant les conditions naturelles d'extension et d'écoulement des crues. Elle vise à déterminer l'enveloppe spatiale des crues et si possible leurs caractéristiques en termes de fréquence, de hauteur et de vitesse.

La délimitation des espaces concernés par les différents types de crues

Les nombreux recoupements que nous avons effectués depuis que la méthode est opérationnelle avec les événements que nous avons connus en France et les résultats de modélisations menées sur certains cours d'eau nous ont permis d'établir la correspondance suivante entre les unités hydrogéomorphologiques et une gamme de fréquences des crues ;

- le lit mineur connaît des crues saisonnières à annuelles, non inondantes sur les lits moyen ou majeur ;
- le lit moyen est inondable par les crues fréquentes, de périodes de retour allant de 1 à 10 ans, voire 15 ans ;

- le lit majeur est inondable par les crues rares à exceptionnelles, ce qui correspond, vis-à-vis des seuils classiques retenus en France pour la modélisation à des crues centennales (rares) ou pluri-centennales, voire millénaires (exceptionnelles).

En fait, au regard de l'objectif qui consiste à définir les aléas inondation pour mieux les prendre en compte dans l'aménagement du territoire, la distinction entre lits mineur et moyen ne présente pas un grand intérêt, dans la mesure où ces deux unités sont a priori conjointement affectés par toutes les crues, et subissent les hauteurs d'eau et les vitesses de courant les plus élevées de la plaine alluviale fonctionnelle. Ces deux unités peuvent être englobées dans un espace commun dit « de grand écoulement » ou « de mobilité », termes utilisés dans certains textes réglementaires Français et qui expriment de manière synthétique l'intensité de l'aléa hydrologique affectant généralement cet ensemble.

Une attention particulière doit par contre être portée à la limite externe du lit majeur, qui distingue la partie inondable de la vallée de sa partie non inondable. Cette limite doit être considérée comme la courbe enveloppe de toutes les crues historiques, à quelques exceptions près (apports colluviaux latéraux qui peuvent réduire le champ d'inondation, ou au contraire, surélévation du lit majeur résultant du processus de sédimentation).

L'évaluation des hauteurs d'eau et des vitesses

L'analyse hydrogéomorphologique limitée aux observations de terrain ne permet pas d'évaluer directement les hauteurs d'eau susceptibles d'être atteintes par de fortes crues. Des données peuvent quelquefois être déduites de la présence de dépôts sédimentaires de crues passées sur des talus externes de lit majeur à pentes faibles, mais elles sont en principe trop aléatoires pour constituer un critère pertinent.

A l'inverse, l'intégration d'informations fournies par les crues historiques permet généralement d'apporter des réponses d'autant plus satisfaisantes que dans certaines régions, les relevés des niveaux d'eau atteints dans le passé sont nombreux, fiables, et ont fait l'objet de mesures de nivellement. Les informations plus spécifiquement prises en compte concernent ;

- les relevés des niveaux topographiques atteints par les plus hautes eaux de crues ;
- les hauteurs d'eau mesurées aux stations limnimétriques et limnigraphiques, qui peuvent donner lieu, lorsqu'elles sont assez nombreuses, à un traitement statistique ;
- les limites d'extension maximale des plus grandes crues connues.

Toutes ces données peuvent être utilement complétées par les données d'archives communales et départementales, généralement moins précises mais remontant souvent beaucoup plus loin dans le temps. Ainsi, dans le principe, est-il possible, dans des bassins versants riches en informations, de traduire directement la carte des unités hydrogéomorphologiques en carte des hauteurs d'eau relatives à une crue rare ou une crue exceptionnelle.

En ce qui concerne les vitesses d'écoulement, par contre, il serait hasardeux de tenter de les calculer à partir des seules données morphologiques. Si l'analyse granulométrique des dépôts alluviaux permet d'évaluer qualitativement les vitesses dans la comparaison globale des unités hydrogéomorphologiques (vitesses très élevées dans la zone de grand écoulement et nettement plus faibles dans le lit majeur), elle ne permet pas de fournir des résultats quantitatifs utilisables dans les modélisations.

La mise en œuvre de la méthode

Après avoir rappelé les fondements de la méthode et décrit les principes qui président à la caractérisation hydrogéomorphologiques des zones inondables, nous proposons ici

d'expliquer les conditions de mise en œuvre de la méthode d'analyse et de présenter quelques documents cartographiques.

Les outils d'acquisition des données

L'approche hydrogéomorphologique repose avant tout sur une photo-interprétation de photographies aériennes stéréoscopiques et des observations de terrain. Elle est complétée par l'ensemble des données disponibles telles que les cartes, les levés topographiques, les images satellitaires et les données relatives aux crues historiques. Elle permet ainsi d'effectuer un diagnostic rapidement et à coût modéré.

Les cartes

- **Les cartes topographiques** sont indispensables pour localiser les informations.

En France, aujourd'hui, le document le plus adapté reste la carte IGN (Institut Géographique National) à l'échelle du 1.25 000, qui existe sur tout le territoire national. Il est cependant conseillé de travailler sur des agrandissements au 1.10 000 pour obtenir un meilleur confort de lecture et une précision optimale des reports géomorphologiques. Ces cartes apportent également de nombreuses informations utiles pour l'analyse des zones inondables, par exemple sur la présence des talus ou la toponymie et l'hydronymie (lieu dit « les marais », etc.) ou encore la connaissance des enjeux exposés. Les points cotés et les courbes de niveau sont aussi exploitables, sous réserve de tenir compte de leur imprécision relative en altimétrie (de l'ordre de 1 mètre pour les premiers, et de 3 mètres pour les seconds).

Ponctuellement, il est possible d'affiner l'analyse en recourant à des cartes ou à des plans topographiques à plus grande échelle (1.10 000, 1.5 000, voire 1.2 000), donc plus précises, et en y intégrant les données issues des nivellements de repères de crues.

- **Certaines cartes à vocation scientifique** contiennent aussi des données précieuses pour l'interprétation hydrogéomorphologique (Garry - Le Moigne - 1991). Il s'agit notamment :
 - ✓ des cartes géologiques au 1.50 000 ou au 1.80 000 éditées par le B.R.G.M. et qui couvrent l'ensemble du territoire national. Elles fournissent des informations très utiles sur la structure géologique (lithologie et tectonique) des bassins versants et, parfois, sur l'organisation de la plaine alluviale (différenciation entre alluvions modernes et terrasses alluviales par exemple) ;
 - ✓ des cartes géomorphologiques au 1.50 000 qui n'ont donné lieu qu'à la production d'une vingtaine de feuilles entre 1971 et 1990. Elles favorisent la compréhension de la plaine alluviale fonctionnelle, mais leur exploitation est relativement complexe. De plus, leur échelle est trop petite par rapport aux besoins de la cartographie des zones inondables ;
 - ✓ des cartes pédologiques ou de la végétation, à condition de bien en connaître les clés d'interprétation.

Les levés topographiques

Si la cartographie hydrogéomorphologique ne nécessite pas de mesures altimétriques fines, celles-ci s'avèrent indispensables pour niveler les laisses de crues historiques qui permettront de conforter l'analyse et d'apporter des éléments d'informations quantitatifs. Il en est de même si l'étude est destinée à déterminer les aléas en application de la méthode intégrée des études d'inondation développée par le ministère de l'écologie, ou encore dans le cadre d'une modélisation. En effet, la traduction topographique de la morphologie alluviale permet ensuite de passer à une exploitation quantitative des données hydrologiques. La connaissance approfondie du terrain permettra dans ce cas au géomorphologue de découper la vallée en

tronçons morphologiquement homogènes et de réaliser des modèles morpho-topographiques en choisissant uniquement les points significatifs de la structure morphologique, en l'occurrence les arêtes supérieure et inférieure des talus. Ces mesures pourront résulter de levés terrestres, photogrammétriques ou de points GPS.

Les photographies aériennes

Les photographies aériennes représentent l'outil de base permettant de réaliser l'analyse hydrogéomorphologique. Il est donc très important de choisir les photos les plus adaptées à la question traitée, notamment en fonction du niveau de précision de l'étude souhaité et de l'échelle de restitution cartographique (tableau 1). En général, les missions existantes sont suffisantes, d'autant plus que ce sont des photographies prises en régime hydrologique normal ou en période d'étiage qui sont les plus appropriées pour appréhender l'ensemble de la plaine alluviale moderne.

En France, dans chaque département ou région, les services de l'Etat (DDT ou DREAL) possèdent des couvertures aériennes plus ou moins récentes et d'échelle variable, qui peuvent en général tout à fait convenir pour la réalisation de la photo-interprétation. Dans le cas contraire, il est possible de commander une couverture spécifique chez les différents opérateurs. L'Institut géographique national (IGN) est le principal prestataire susceptible de fournir ces documents. A l'heure actuelle, les missions engagées par l'Institut pour couvrir régulièrement le territoire national sont réalisées aux seules échelles du 1.20 000 au 1.30 000. Certaines régions très urbanisées sont également couvertes au 1.14 500. Il en existe d'autres, comme l'Inventaire forestier national (IFN) et l'Inventaire permanent du littoral (IPLI), qui louent à la demande les photographies. Dans le premier cas, les photographies sont disponibles à l'échelle du 1.17 000, en infrarouge couleur. L'infrarouge présente l'inconvénient majeur d'atténuer les reliefs, notamment dans les zones urbaines où les matériaux de construction réfléchissent fortement. Par contre, il offre l'avantage de faire apparaître les secteurs où les nappes affleurent, et de ce fait facilite la distinction entre terrasse et lit majeur. Si les photographies existantes ne répondent pas aux attentes, il est toujours possible de faire réaliser une mission spécifique par un opérateur privé. Ainsi, il peut être plus avantageux financièrement de commander une mission axée sur les cours d'eau étudiés pour limiter le nombre de photographies, plutôt que d'utiliser une mission préexistante dont les bandes de prises de vues sont en décalage. Dans tous les cas, il est important de définir le périmètre avec précision et de s'assurer que la totalité de la zone d'étude sera bien couverte par la vision stéréoscopique.

Echelle de la cartographie	Echelle des photographies recommandée	Commentaires
1.25 000	Entre le 1.15 000 et le 1.25 000	A partir et au-delà du 1.25 000, la perception des structures du relief les plus fines est délicate, voire impossible, et dégrade la précision de la cartographie. Il est possible d'utiliser des échelles plus précises (1.8 000), mais sans grande pertinence, puisque la plupart des micro-structures décelées ne pourront être reportées sur les cartes et que cela multiplie de façon considérable le nombre de photographies à commander et à manipuler
1.10 000	Entre le 1.8 000 et le 1.17 000 (IFN)	L'échelle du 1.25 000 peut être utilisée pour réaliser le travail à l'échelle du 1.10 000, mais elle n'est pas la mieux adaptée.
1.5 000	Entre le 1.8 000 et le 1.17 000 (IFN)	Pour une cartographie au 1.5 000, il est impératif d'utiliser a minima le 1.17 000. Le 1.10 000 sera l'échelle la plus adaptée.

Tableau 1 : Meilleure adéquation entre l'échelle des photographies aériennes, le niveau de précision de l'analyse hydrogéomorphologique et la restitution cartographique

Les données relatives aux crues historiques

Le retour d'expérience des inondations des années 1990 a montré l'intérêt d'exploiter les archives bien au-delà de ce qui était pratiqué jusqu'alors (une centaine d'années). L'introduction des crues historiques dans le corpus de la méthode hydrogéomorphologique a ainsi permis d'améliorer leur connaissance grâce aux recherches menées dans les archives départementales, exercice couramment pratiqué par les Géographes et les Historiens. D'accès facile, ces archives fournissent des informations de qualité variable d'un département à l'autre, notamment en fonction de leur degré de traitement préalable par les archivistes. Les archives communales présentent les mêmes caractéristiques lorsqu'elles sont conservées aux Archives Départementales, ce qui est le cas général. Quand elles demeurent dans la commune d'origine, leur consultation est souvent plus difficile. Ces archives ont parfois conservé la mémoire d'événements hydrologiques marquants, vieux de plusieurs siècles, par exemple à Nîmes (chroniques depuis le XIV^e siècle) et à Vaison-la-Romaine (témoignage d'un événement en 1616 identique à celui de 1992).

Dans le cadre des études hydrogéomorphologiques, plusieurs types d'informations sont intéressantes à intégrer :

- l'étendue des zones affectées par les crues observées dans le passé ;
- les hauteurs d'eau relatives à ces crues ainsi que les cotes altimétriques correspondantes ;
- les données fournies par les stations hydrométriques : hauteurs d'eau, débits ;
- les autres informations relatives aux crues relevées dans les articles de journaux, rapports, etc.

Les observations de terrain

Elles sont indispensables pour vérifier les données résultant de la photo-interprétation, pour lever les incertitudes dans les cas difficiles et pour étudier des éléments qui n'apparaissent pas sur les photographies, tels que des limites ou des travaux anciens masqués par une végétation dense (haies, ripisilve). Ce recours au terrain s'impose en particulier pour étalonner les informations relatives à une configuration régionale nouvelle pour l'observateur. Certaines d'entre elles, comme la nature des sols alluviaux, ne sont par ailleurs accessibles que par ce moyen.

Il est également possible, dans certains cas particulièrement compliqués, de compléter les observations visuelles par l'utilisation de moyens techniques plus spécialisés. Des sondages, à la tarière à main ou mécaniques selon la nature du terrain, ont ainsi permis de vérifier l'importance des sur-sédimentations dans les basses plaines de l'Aude. Des analyses granulométriques et minéralogiques peuvent également aider à différencier des formations appartenant à des unités difficilement identifiables par l'approche habituelle.

Enfin, l'introduction de l'approche historique des crues dans l'hydrogéomorphologie nécessite au stade des observations de terrain de relever les indications relatives aux repères de crues, d'identifier les traces ou laisses de crues qui se seraient produites récemment et d'interroger les habitants.

Les produits cartographiques et leur utilisation dans les études de zones inondables

Nous avons déjà évoqué les différentes informations utiles à la connaissance et à la prise en compte des zones inondables dans l'aménagement des territoires. Celles-ci, qui relèvent d'abord du milieu naturel, mais aussi anthropique, peuvent être organisées de manière à produire des documents hiérarchisés, adaptés aux besoins en fonction des enjeux exposés (population, biens, activités, infrastructures, patrimoine, etc.). Ainsi, avons-nous mis en place, au ministère de l'écologie, une méthode dite « intégrée » des études d'inondations qui permet d'identifier plusieurs niveaux de cartographie. Ce dispositif s'appuie toujours en premier lieu sur la carte hydrogéomorphologique. Celle-ci est ensuite, en fonction des données disponibles, progressivement enrichie par des éléments hydrologiques, historiques et topographiques, auxquelles sont ajoutées quelques informations relatives à l'occupation des sols, pour aboutir à un document plus élaboré, la carte d'inondabilité. L'étape suivante consiste à produire, si nécessaire, une cartographie qualitative des aléas résultant d'une interprétation à dire d'expert du géomorphologue, ou une carte d'aléas résultant d'une modélisation simplifiée ou encore d'une modélisation classique. Nous avons ainsi définis 5 niveaux de rendus cartographiques, d'abord qualitatif, puis semi quantitatif et enfin quantitatifs. Nous présenterons ici les trois premiers documents cités.

La carte hydrogéomorphologique

Une étude hydrogéomorphologique doit aboutir à la production d'une cartographie homogène sur un secteur donné, accompagné par un rapport contenant a minima un commentaire géomorphologique des cartes expliquant les principaux phénomènes notables à retenir.

La carte hydrogéomorphologique doit présenter les unités hydrogéomorphologiques (lit mineur, moyen, majeur, exceptionnel ainsi que les talus les séparant, les axes de crues), les informations relatives au milieu naturel (versants, colluvions, terrasses, rochers affleurants, atterrissement, vallons affluents, bourrelet de berge, dépression de lit majeur, phénomène de sur-sédimentation en lit majeur), et les éléments anthropiques à rôle hydrodynamique (remblais linéaire et surfacique, digues, lit rectifié, carrière, protection de berge, seuils, barrage, ouvrage d'art).

L'échelle et le fond de fond

Les cartes peuvent être réalisées à plusieurs échelles en fonction de différents paramètres :

- la nature intrinsèque de la méthode : la cartographie hydrogéomorphologique peut très difficilement être réalisée à une échelle moins précise que le 1.25 000 ;
- les objectifs poursuivis : le 1.25 000 est une bonne échelle pour approcher les zones inondables au niveau d'un vaste tronçon de cours d'eau ou de la totalité d'un bassin versant. Par contre, si la cartographie a vocation à être intégrée ultérieurement dans une démarche réglementaire de type Plan de Prévention des Risques d'Inondation, l'échelle la plus adaptée est celle du 1.10 000 ;
- la dimension de la zone d'étude : en fonction du linéaire à traiter, l'échelle peut varier du 1.5 000 pour un diagnostic communal par exemple au 1.25 000 pour un atlas couvrant plusieurs centaines ou milliers de kilomètres à couvrir ;
- les moyens financiers disponibles : du 1.25 000 au 1.5 000, le coût au kilomètre de cours d'eau augmente compte tenu de la précision supplémentaire à apporter dans l'interprétation et la cartographie.

Le Scan 25 IGN au 1.25 000 ou agrandi au 1.10 000 est le fond de plan le plus couramment utilisé. Il présente l'avantage d'être facilement disponible sur la totalité du territoire national Français. Par contre, ces documents correspondent à une « généralisation » de la représentation des éléments de l'occupation de l'espace, surtout lorsqu'ils sont anciens, et la cartographie réalisée sur ce fond de plan ne peut être reportée automatiquement sur fond de plan cadastral ou orthophotographie. Elle doit faire l'objet d'un recalage systématique.

La photo-interprétation et la cartographie « minute »

La démarche commence par la photo-interprétation. Celle-ci permet d'avoir une vision d'ensemble du secteur étudié, souvent nécessaire pour comprendre son organisation. Les photographies aériennes proviennent indifféremment de missions récentes ou anciennes, prises hors période de crue. Elles doivent impérativement présenter un recouvrement pour permettre la vision stéréoscopique du relief (figure 9). Ce premier outil implique une bonne expérience de la photo-interprétation puisqu'il s'agit de percevoir sur les photographies aériennes des structures topographiques d'ordre décimétrique à métrique, et même dans l'idéal centimétrique, mais aussi un savoir géomorphologique suffisant pour interpréter les formes perçues et construire un schéma de fonctionnement global du cours d'eau.

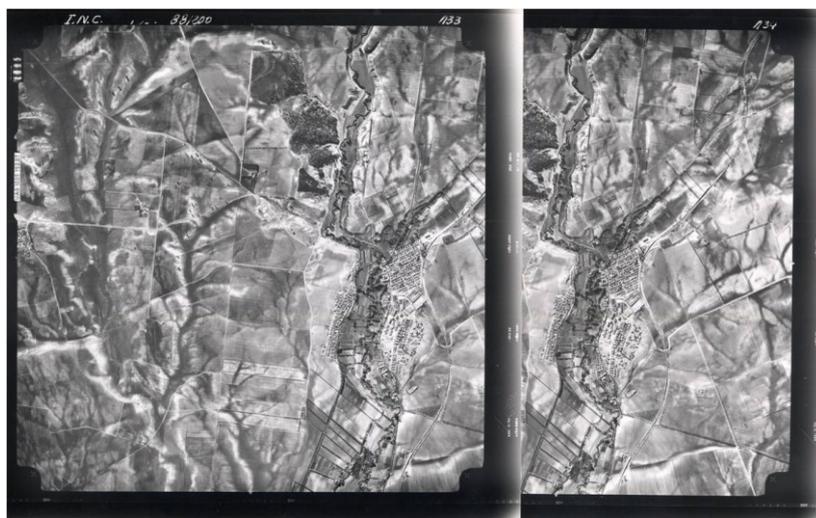


Figure 9 : Photographies aériennes de la région de Sidi Khaled (DHW, Wilaya de Sidi Bel Abbès, 1997)

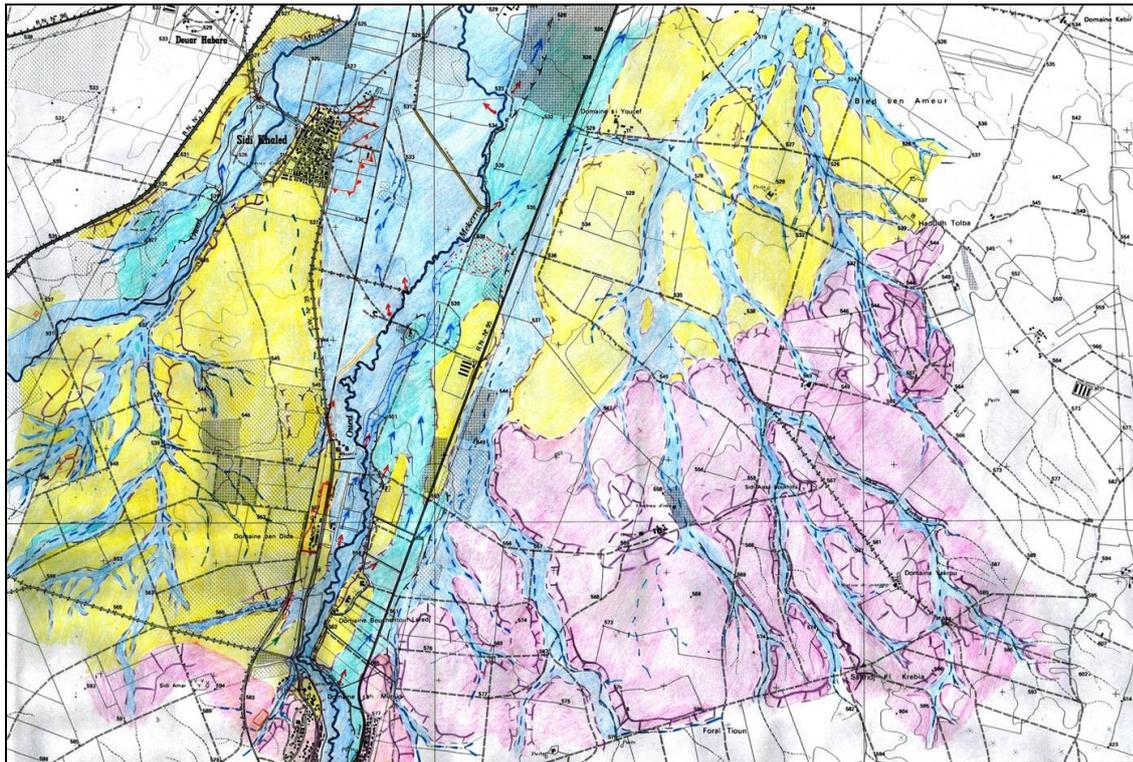
Le travail repose sur plusieurs étapes :

- **la mise en place des structures de base**
 - ✓ le relief encadrant : première crête de « l'encaissant »
 - ✓ le réseau hydrographique (lits mineurs)
- **l'interprétation puis le report des limites des unités HGM**
 - ✓ la limite externe du lit majeur
 - ✓ la limite (talus) du lit majeur-lit moyen
 - **la recherche des continuités amont-aval**
 - **le repérage et l'interprétation des difficultés :**
 - absence d'un des lits
 - perte de continuité des limites
 - évolution amont-aval
 - **l'analyse et la cartographie des structures secondaires**
 - traces de morphogenèse (érosion des berges, du lit, sédimentation)

Les différents thèmes interprétés donnent lieu à une carte « minute », en général à l'échelle du 1.25 000 sur les grands ensembles et du 1.10 000 dans les secteurs les plus urbanisés.

Cette cartographie a été menée récemment par la direction de l'hydraulique de la Wilaya (DHW) de Sidi-Bel-Abbès dans le cadre des réflexions qu'elle a engagée pour gérer le risque d'inondation de l'oued Makerra et de l'oued Melghir. Pour ce qui concerne l'oued Mekerra, la DHW a choisi de cartographier la zone aval, qui correspond à la zone d'expansion des crues, située de Boukhanéfis à Sidi-Bel-Abbès. Elle a défini 3 grands axes de travail ayant pour objectifs de développer la connaissance, de réaliser des travaux de protection et de mettre en place un système de prévision et d'alerte. Le premier axe s'est traduit par l'élaboration d'un plan directeur des localités exposées aux risques d'inondation. Des atlas des zones inondables ont été dressés (cartes 2 et 3) afin de fournir aux pouvoirs publics et aux collectivités locales des éléments de connaissance destinés à :

- l'information du public ;
- la planification de l'occupation de l'espace ;
- la programmation et l'élaboration de plans de prévention des risques sur chaque commune concernée.



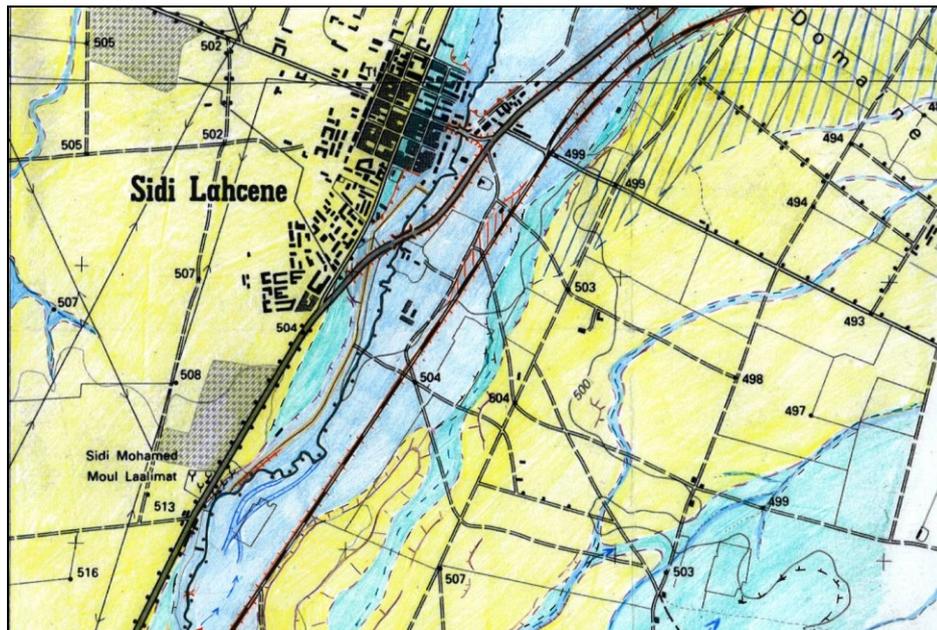
Carte 1 : Carte hydrogéomorphologique « minute » au 1/25 000 du secteur Boukhanefis-Sidi Khaled
(DHW, Wilaya de Sidi-Bel-Abbès, 1997)

La carte au 1.25 000 montre qu'à l'aval de la ville de Boukhanefis, la vallée de la Mekerra s'élargit de manière assez conséquente notamment à partir de Sidi Khaled et de la confluence avec l'oued Mouzen. La plaine alluviale de la Mekerra est une zone d'expansion des crues très ancienne qui correspond à un grand cône de déjection. La dynamique est liée aux faibles pentes transversales divergentes à partir du lit mineur, qui reste perché au-dessus du lit majeur dans une configuration de lit en toit. A partir du lit mineur (ou lit d'étiage) qui décrit de larges boucles et méandres, un certain nombre de formes connexes témoignent de la vigueur des écoulements et de leur grande mobilité lors des plus fortes crues. Il s'agit pour l'essentiel d'axes d'écoulement plus ou moins bien prononcés, voire de chenaux secondaires, que l'on peut parfois rattacher à des points de débordements issus du lit mineur.

Sur les bordures du lit majeur, le talus de la rive gauche de la Mekerra est assez bien marqué et continu, atteignant par endroit plusieurs mètres de haut. En rive droite, par contre, les formes sont plus ténues, ce qui rend la limite externe de la plaine alluviale plus difficile à déterminer. Une analyse attentive des formes, facilitée par l'existence de clichés au 1.20 000 sur ce secteur, a permis de mettre en évidence un niveau intermédiaire sur la terrasse Pliocène bordant l'oued que l'on peut qualifier de lit majeur exceptionnel. Cette unité surplombant le lit majeur de deux mètres, n'est active que pour les plus fortes crues. Dans le secteur très dynamique de Sidi Khaled, en extrados de méandres où les vitesses sont fortes, elle peut faire l'objet de débordements généralisés.

La cartographie met également en évidence la densité du réseau hydrographique secondaire constitué par les nombreux petits oueds coalescents qui drainent le piedmont et peuvent avoir une influence très importante par leurs apports et leur dynamique, sur les conditions d'inondabilité plus en aval au niveau de l'agglomération de Sidi-Bel-Abbès ⁽⁷⁾.

⁷ Extrait du rapport du bureau d'études



Carte 2 : Carte hydrogéomorphologique « minute » au 1/10 000 au niveau de la ville de Sidi Lahcene
(DHW, Wilaya de Sidi-Bel-Abbès, 1997)

La carte au 1.10 000 précise les éléments déjà décrits dans la carte au 1.25 000, à savoir un étagement lit majeur/lit majeur exceptionnel et un débordement en rive droite sur le substrat pliocène, avec toutefois quelques nuances importantes liées aux facteurs anthropiques, notamment l'occupation du sol qui modifie notablement les conditions naturelles d'écoulement. En effet, pour les plus fortes crues, cet ensemble peut être très perturbé par l'impact des nombreux aménagements linéaires en remblais (voie ferrée, route) qui recourent longitudinalement ou latéralement la plaine alluviale. Ces derniers segmentent la zone inondable en casiers, ce qui crée une surélévation artificielle de la ligne d'eau qui peut générer des débordements sur les reliefs adjacents naturellement non inondables (8).

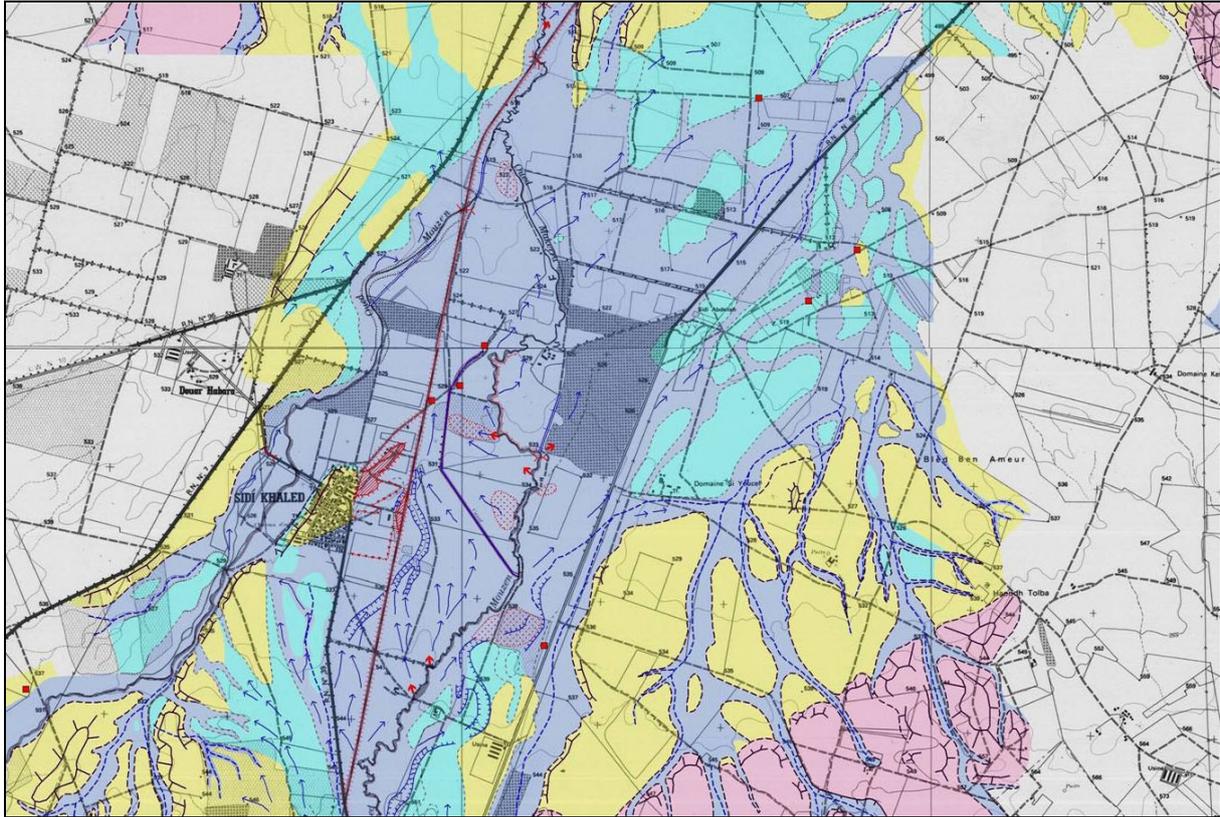
Le travail de terrain

Les cartes « minutes » terminées, le travail se poursuit sur le terrain, seconde étape de l'analyse. Il s'agit de retrouver les structures morphologiques et les unités hydrogéomorphologiques repérées sur les photographies aériennes pour confirmer le pré-diagnostic, et d'acquérir des informations sur la nature des formations qui constituent une surface topographique, éléments déterminant pour statuer dans les secteurs complexes (photographie 8).

Concrètement, on s'intéresse aux indices suivants :

- la topographie et la micro-topographie des contacts entre les différentes unités morphologiques, notamment des limites quand elles sont masquées par des dépôts à pente faible ;
- la nature des formations superficielles des différents lits ;
- les indices hydriques liés à la présence d'eau à la surface du sol ou à faible profondeur (à travers une végétation hygrophile par exemple) ;
- la végétation, dépendante de la nature des sols et de leurs caractéristiques hydrologiques ;
- les traces d'inondation : laisses de crue, érosions, atterrissements, sédimentation dans le lit majeur.

⁸ Extrait du rapport du bureau d'études



Carte 3 : Carte hydrogéomorphologique définitive (DHW, Wilaya de Sidi-Bel-Abbès, 1997)

- **Le rapport**

Le rapport accompagnant les cartes hydrogéomorphologiques doit fournir un commentaire détaillé, par tronçon homogène ou éventuellement par carte, des configurations géomorphologiques présentées par les cartes. Ce commentaire décrit le contexte et le fonctionnement (torrentiel, de plaine, etc.) de la plaine alluviale, la répartition des écoulements dans le lit mineur (cours d'eau à chenal unique, en tresse, anastomosé, etc.), dans les lits de débordement (axes de crue, lit en toit, les tendances récurrentes de modifications de direction, etc.), et caractérise au mieux l'hydrodynamisme. Il rappelle tous les éléments permettant de comprendre et d'expliquer ce fonctionnement (lithologie, tectonique, pentes, points durs rocheux, héritages fluvio-glaciaires, etc.), analyse qualitativement les effets éventuels occasionnés par les ouvrages anthropiques et met l'accent sur les enjeux identifiés lors de la cartographie en indiquant brièvement leur exposition à l'aléa. Ce commentaire peut être utilement accompagné d'un paragraphe replaçant le ou les cours d'eau étudiés dans leur contexte géographique physique et humain.

Dans le cadre des Atlas de Zones Inondables, ce rapport est précédé d'une note de synthèse sur le fonctionnement du bassin versant rappelant les principaux paramètres physiques conditionnant la réponse du bassin aux précipitations et le déroulement des crues.

La carte d'inondabilité

La carte « d'inondabilité » a été créée pour réaliser la seconde génération des atlas des zones inondables sur les principaux cours d'eau Français à partir de 2003. Elle ajoute aux éléments déjà recueillis dans la carte hydrogéomorphologique deux grands types d'informations : les données historiques (hauteurs d'eau atteintes, etc.) et les enjeux territoriaux (bâtiments isolés, fronts d'urbanisation, STEP, stations de captage, campings, etc.).

L'approche historique des inondations

Elle se présente sous de multiples formes : données hydrologiques et hydrauliques, fiches de repères de crues, etc. (figures 11 et 12). Elle présente un intérêt majeur dans le diagnostic et se justifie à double titre dans l'étude de l'aléa inondation :

- sur le plan technique, elle permet de reconstituer des chronologies plus ou moins fournies, et d'apporter des informations concrètes sur les crues passées tant sur le plan de leurs caractéristiques physiques (déroulement, fonctionnement, extension spatiales, hauteurs, durée, charges solides) que de leurs conséquences (victimes, dégâts occasionnés) ;
- sur le plan pédagogique, elle rappelle les grands événements et contribue à raviver la mémoire collective des pouvoirs publics comme de la population. Elle contribue à une appropriation du risque par les populations riveraines.

Elle a pour double objectif de constituer une base de données la plus complète possible sur la connaissance des crues et de déterminer la plus grande crue connue qui pourra être retenue comme crue de référence sur un bassin versant pour régler l'occupation des sols, que ce soit dans les plans d'urbanisme ou par l'élaboration d'un Plan de prévention des risques.

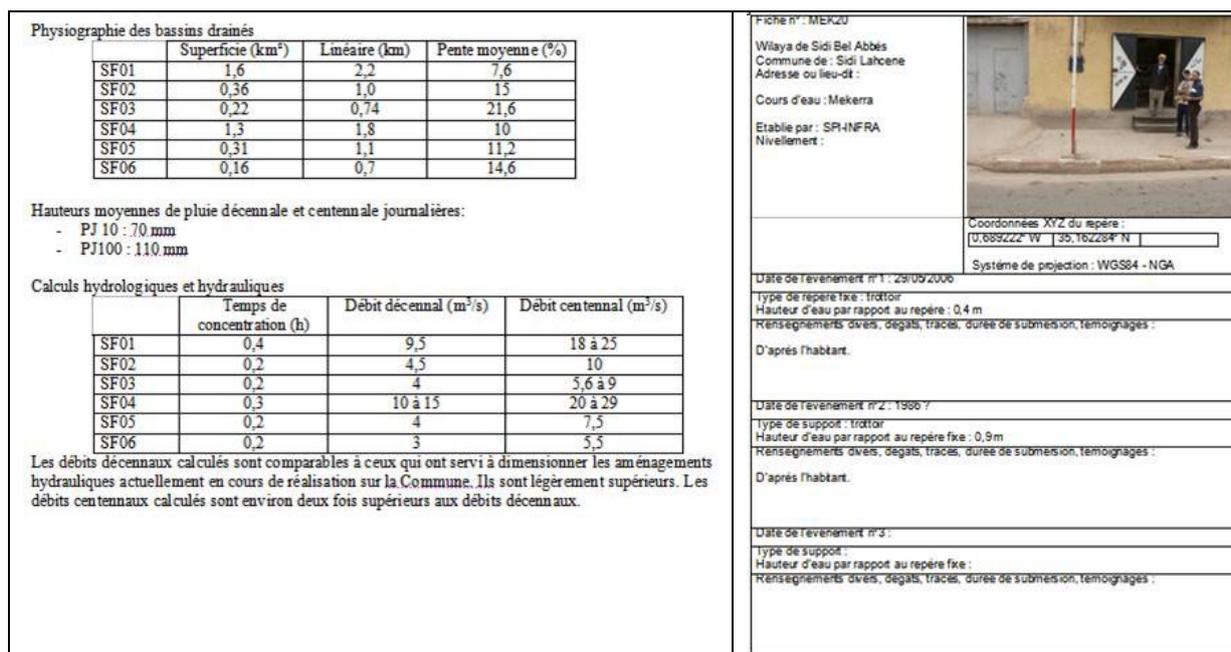


Figure 11 : Données hydrologiques et hydrauliques du bassin versant de la Mekerra (DHW, 1997)

Figure 12 : Fiche de repère de crue (DHW, 1997)

Les enjeux territoriaux

Ils visent à identifier tous les enjeux existants qui seront exposés à la crue de référence hydrogéomorphologique : espaces actuellement urbanisés, centres urbains, zones d'expansion des crues, infrastructures (routières, ferroviaires et aéroportuaires), bâtiments recevant du public (mairie, écoles, etc.), équipements sensibles (postes électriques, réseaux d'alimentation en eau, etc.) et ceux participants à la gestion de crise (commissariats de police, casernes de pompiers, hôpitaux, etc.).

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

L'objectif est double :

- déterminer les éléments de l'occupation des sols qui pourront, en fonction de leur lieu et mode d'implantation, jouer un rôle dans l'écoulement des eaux en termes d'obstacles (transversaux) contribuant à rehausser la ligne d'eau à l'amont, de rétention, lorsqu'ils sont disposés en maillage constituant des casiers hydrauliques ou au contraire d'accélérateurs, pour des constructions longitudinales à l'écoulement, aggravant l'aléa à l'aval ;
- préparer la gestion de crise puisque cette connaissance permet de connaître à l'avance les infrastructures susceptibles d'être coupées ainsi que les bâtiments les plus vulnérables (lieux publics) qui devront faire l'objet d'interventions prioritaires.

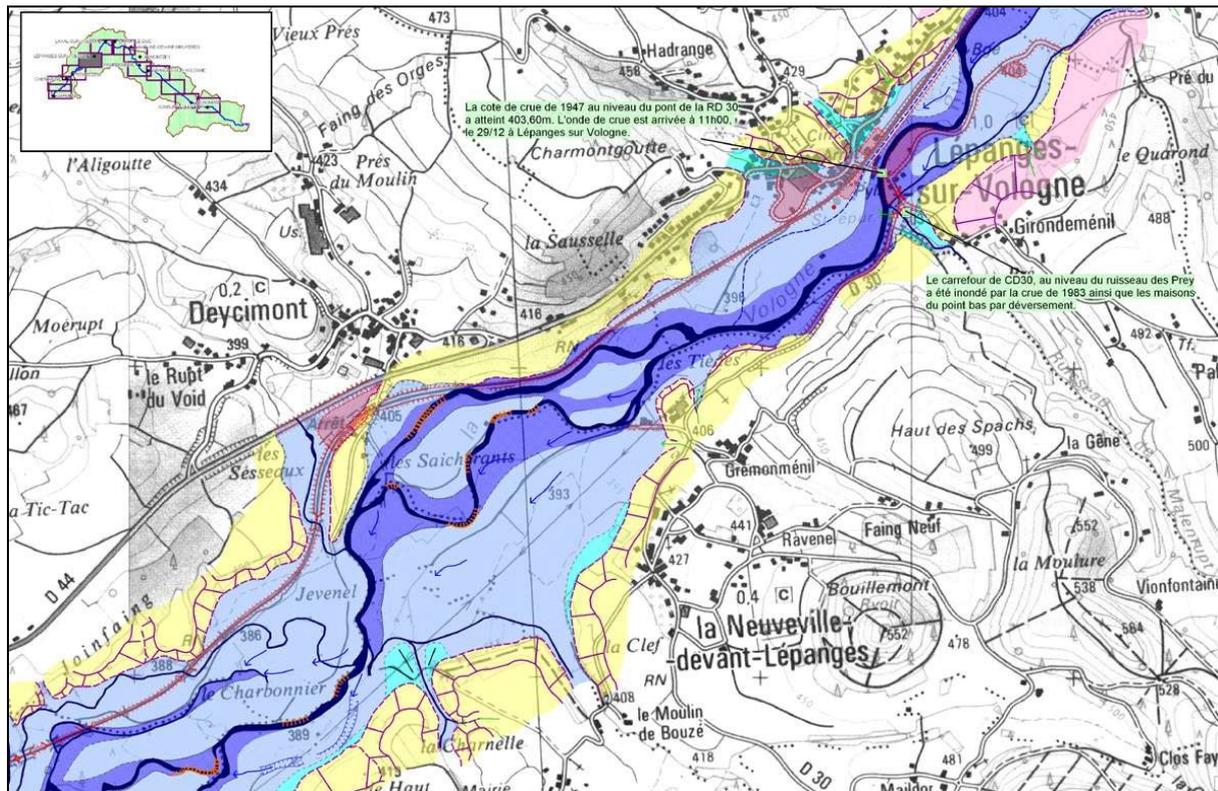
Le rendu cartographique

Les données relatives à l'occupation des sols et aux informations historiques s'ajoutent aux taxons de la carte hydrogéomorphologique. Une légende type spécifique a été définie par le Ministère de l'environnement (figure 13) pour cartographier les cartes d'inondabilité (carte 4).



Figure 13 : Légende des cartes d'inondabilité des atlas des zones inondables (Cahier des charges des Atlas)

Au-delà de ses informations intrinsèques sur les différentes unités hydrogéomorphologiques, (les lits de la plaine alluviale ainsi que les terrasses non inondables pouvant a priori accueillir la population nouvelle), sur les crues historiques et sur l'occupation du sol, cette carte fournit les informations utiles pour appliquer le droit des sols et statuer, le cas échéant, sur une demande de permis de construire, notamment en l'absence de documents réglementaires (plans locaux d'urbanisme ou plans de prévention des risques d'inondation).



Carte 4 : exemple de carte d'inondabilité sur la Vologne au 1.10 000 (Ginger). La carte montre les différents lits du cours d'eau, les terrasses (en jaune) et le substratum (en rouge) ainsi que les côtes atteintes par les crues historiques.

La carte qualitative des aléas

La caractérisation qualitative des aléas s'appuie sur la connaissance du fonctionnement de la rivière, qui résulte notamment de l'analyse des unités hydrogéomorphologiques, de l'identification des éléments morphodynamiques, confirmées ou complétées par les informations issues de témoignages historiques (enquêtes riverains, photographies, presse, relevés de laisses de crues).

Elle se déroule en deux séquences successives :

- l'analyse par photo-interprétation, qui permet de corréliser des indices morphologiques à des niveaux d'aléas en fonction de l'intensité des dynamiques (figure 14). Les témoignages géomorphologiques laissés par les crues ne permettent pas d'en déduire directement des hauteurs d'eau ni une hiérarchisation des hauteurs. Par contre, il est possible d'établir, à dire d'expert, un lien entre une forme topographique et certaines gammes de vitesses et de hauteurs d'eau (tableau 2) ;

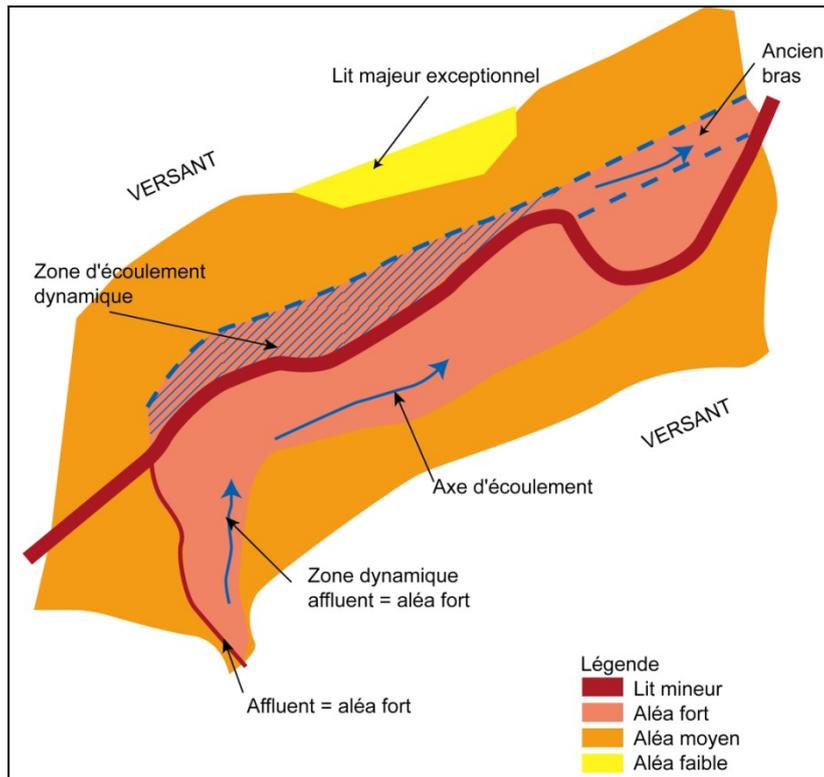


Figure 14 : Schéma de principe de la transcription des lits hydrogéomorphologiques en niveaux d'aléas

ALEA FORT	<p>Comprend le lit mineur, l'ensemble du lit moyen avec les chenaux annexes et les anciens bras en connexion directe avec le chenal d'écoulement principal (espace de mobilité du cours d'eau), les portions du lit majeur recelant des axes de crues.</p> <p>En termes hydrodynamique cet ensemble peut être qualifié de zone de grand écoulement (hauteurs supérieures à 1 m et vitesses élevées).</p>
ALEA MOYEN	<p>Comprend le reste du lit majeur correspondant aux zones d'interfluves séparant les axes d'écoulements dynamiques ainsi que certaines bordures externes de la plaine alluviale. Cet ensemble peut être qualifié de zone d'expansion. Mobilisée tout ou partie pour les crues rares les aléas en termes de hauteur et surtout de vitesses y sont plus modérés.</p>
ALEA FAIBLE	<p>Cet ensemble est généralement associé aux espaces qualifiés de lit majeur exceptionnel dans le diagnostic hydrogéomorphologique, c'est-à-dire aux zones d'interface et de raccordement avec le versant correspondant généralement à des matériaux d'altération ou colluvions qui empâtent les pieds de versants. Ils ne sont atteints que lors des évènements exceptionnels avec des hauteurs d'eau qui sont faibles et pas de dynamique vitesse.</p>

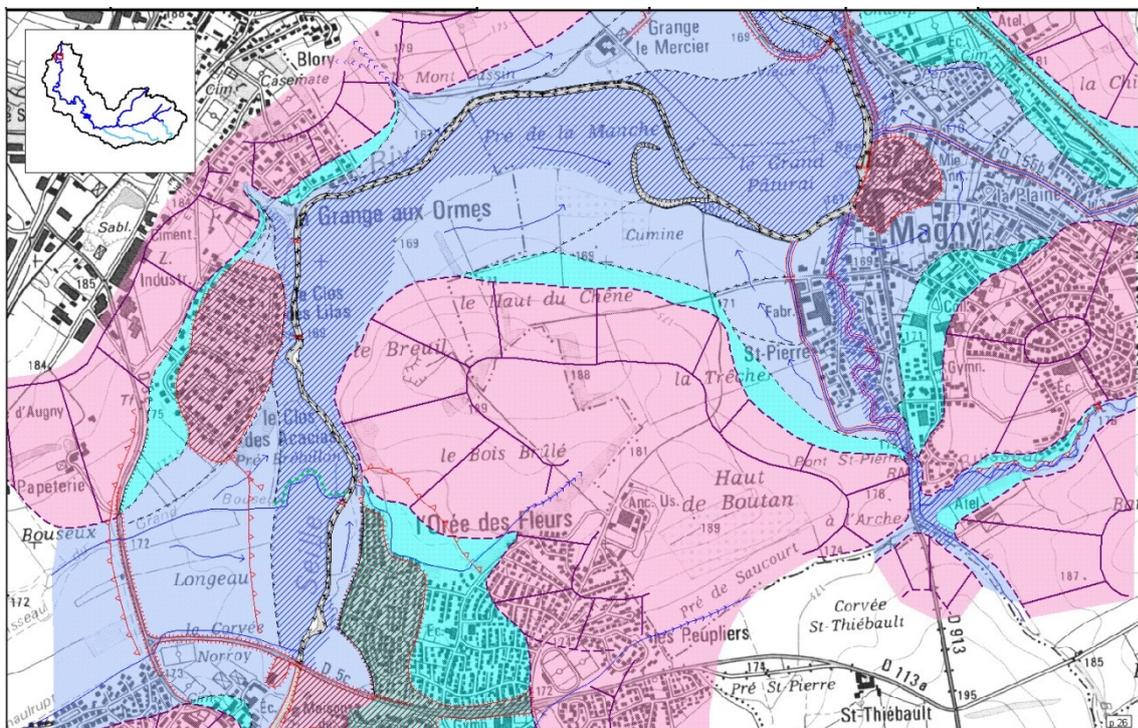
Tableau 2 : caractérisation qualitative des aléas à partir d'une approche hydrogéomorphologique

- les observations de terrain, couplées à l'information topographique disponible sur la zone d'étude et aux informations historiques récoltées sur site, viennent ensuite affiner ce diagnostic. On peut ainsi définir localement :
 - ✓ les secteurs où les hauteurs d'eau seront de l'ordre du mètre ou plus pour une crue historique ;
 - ✓ les secteurs où les écoulements seront rapides et dangereux ;
 - ✓ les secteurs d'étalement des débordements (espaces de large plaine), etc.

La traduction de l'aléa a été fondée sur la base du fonctionnement naturel des cours d'eau. Mais l'expertise de terrain permet également d'apprécier les effets d'aménagements anthropiques susceptibles de modifier les conditions hydrodynamiques au sein des plaines alluviales (ponts, digues, remblais). Cette prise en compte ne se traduit pas nécessairement par une modification du niveau d'aléa (car seule une étude hydraulique permet de quantifier précisément leurs impacts sur les écoulements), mais des étiquettes signalétiques peuvent être ajoutées pour attirer l'attention des services en charge de l'aménagement des territoires, et indiquer en première analyse leur influence probable sur les crues.

Cette approche, testée en Nouvelle Calédonie au début des années 2000, puis appliquée dans quelques communes de la métropole, apporte un niveau d'informations très utiles aux aménageurs, en particuliers dans les secteurs où la pression foncière n'est pas encore trop importante.

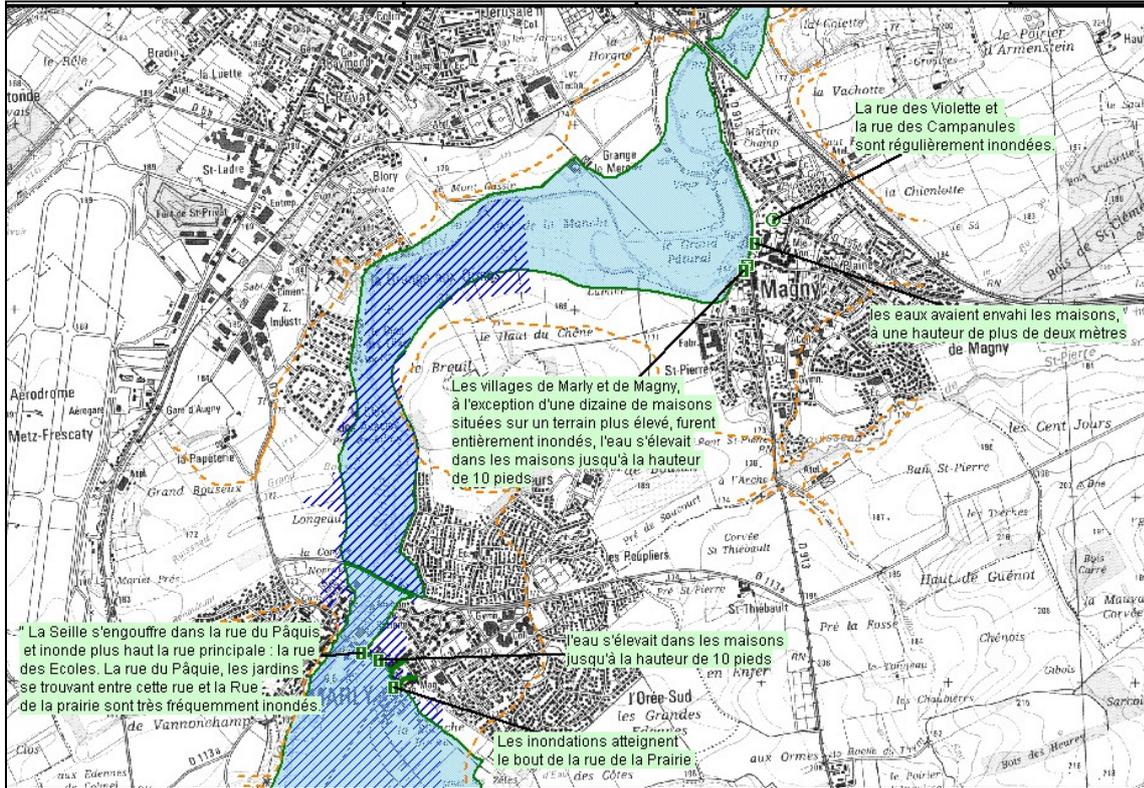
Les cartes 5, 6 et 7 montrent, à travers un exemple extrait de l'atlas de la vallée de la Seille, dans le département de la Moselle, les différents produits complémentaires que l'on peut réaliser sur un même site : hydrogéomorphologique, historique, aléas.



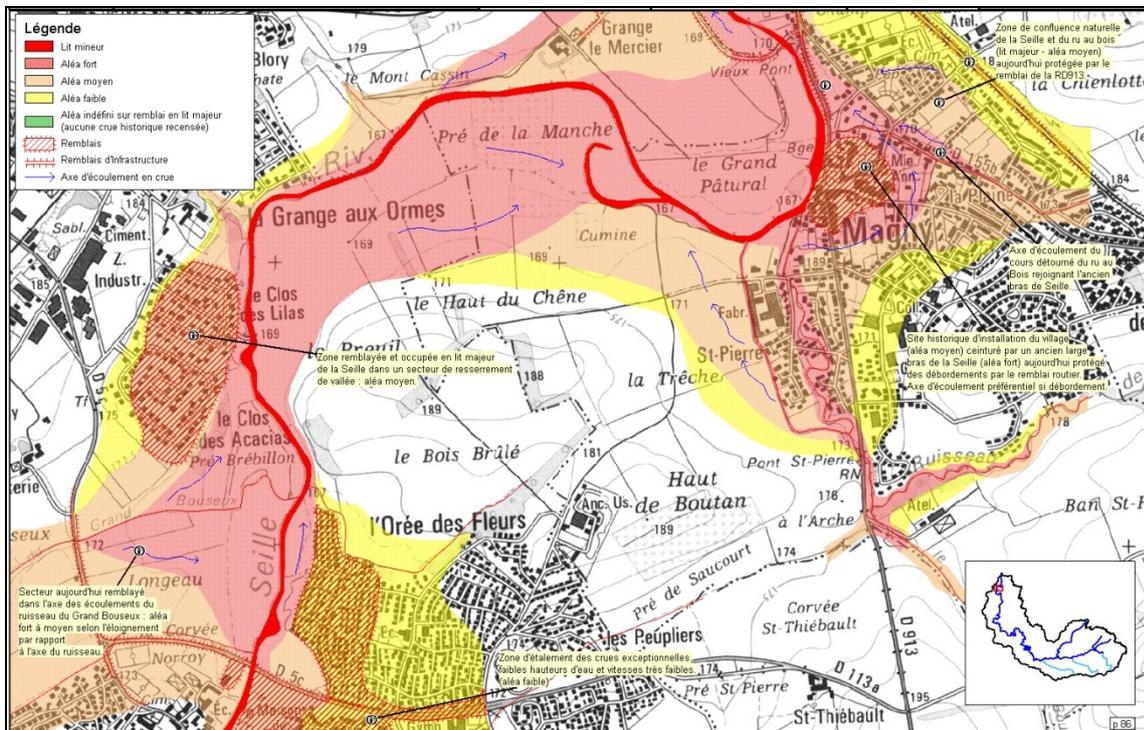
Carte 5 : Carte hydrogéomorphologique de la vallée de la Seille au 1.10 000 (Carex environnement)

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection



Carte 6 : Carte des crues historiques de la vallée de la Seille au 1.25 000 (Carex environnement)



Cartes 7 : Carte des aléas au 1.10 000 sur la vallée de la Seille (Carex environnement)

CONCLUSION

La méthode d'analyse hydrogéomorphologique est maintenant opérationnelle depuis une quinzaine d'année et chacun d'accorde à reconnaître son intérêt, y compris les hydrauliciens, qui ont parfaitement identifiés comment intégrer ces nouveaux éléments de connaissance dans leur modélisation. Il s'agit d'une méthode facile à mettre en œuvre, rapide et peu coûteuse dans la mesure où elle repose avant tout sur l'utilisation des photographes aériennes et sur les observations de terrain. Elle a, par contre des limites, comme toute méthode, puisqu'elle ne permet pas, en premier niveau d'analyse, de fournir des données quantifiées en termes de hauteur et de vitesse, pourtant indispensables pour prendre des décisions dans l'aménagement du territoire, notamment dans les secteurs à enjeux. Cependant, nous avons vu comment il est possible de compléter progressivement ces données pour les enrichir. Cette méthode a donc toute sa place dans le dispositif d'étude des zones inondables. Déjà bien structurée, elle continue à être développée et affinée au fil du temps et des expériences, tant en France qu'à l'étranger. C'est ainsi, par exemple, que la notion de lit majeur exceptionnel a pu être identifiée et cartographiée depuis quelques années. Les investigations et les avancées ont d'ailleurs été suffisamment significatives pour justifier la révision du guide méthodologique publié par le ministère de l'équipement Français en 1996.

Largement appliquée en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'Outre mer, elle a déjà fait ses preuves dans d'autres contextes morpho-climatiques. Sa mise en œuvre en Algérie, est venue confirmer son intérêt en milieu subaride.

Nous espérons que cette communication aura convaincu le lecteur de l'intérêt et de la place de cette méthode dans l'analyse et la cartographie des zones inondables. Conçue comme un mini guide, elle contient en principe tous les éléments de méthode indispensables et suffisants pour se l'approprier en vue de l'appliquer sur de nouveaux sites.

BIBLIOGRAPHIE

- Ballais J.-L., Bonte P., Masson M., Garry G., Ben Kehia H., Eyraud C., Ghram A. (2004) L'évolution du risque d'inondation par les cours d'eau méditerranéens français : le rôle de l'accumulation dans le lit majeur, BAGF – Géographies, n°1, p. 64-74.
- Ballais J.-L., Garry G., Masson M. (2005). – Contribution de l'hydrogéomorphologie à l'évaluation du risque d'inondation : le cas du Midi méditerranéen français, Comptes Rendus Géoscience, n° 337, p. 1120-1130.
- Bonte P., Ballais J.-L., Masson, M., Ben Kehia H., Eyraud C., Garry G., Ghram A (2001). - Datations au ¹³⁷Cs, ¹³⁴Cs et ²¹⁰Pb de dépôts de crues du XXe siècle, in Barrandon J.-N., Guibert P., Michel V. éds Datation, XXIe Rencontres internationales d'archéologie et d'histoire d'Antibes, APDCA, Antibes, p. 141-157.
- Bravard J.-P., Petit F. (1997). – Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial, A. Colin, Paris, 222 p.
- Coque R. (1993). – Géomorphologie, Paris, A. Colin, 503 p.
- Direction de l'hydraulique de la wilaya (DHW) de Sidi Bel Abbes (2007) – Etude d'un plan directeur des localités exposées aux risques d'inondation, phase 2 : analyse hydrogéomorphologique, 38 p.
- Direction régionale de l'environnement Provence-Alpes-Cote d'azur, Direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction (2007). L'approche hydrogéomorphologique en milieux méditerranéens, 66 p.
- Garry G. (1985). – Photo-interprétation et cartographie des zones inondables, Paris, Editions du STU, 74 p.

Garry G. (1993). – Le risque d'inondation en France. Recherche d'une approche globale du risque d'inondation et de sa traduction cartographique dans une perspective de prévention, thèse, Université Paris I, 509 p.

Garry G., Graszka E. (1999). Plans de Prévention des Risques Naturels (PPR) : risques d'inondation, Guide méthodologique, Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, Ministère de l'Équipement, éditions Documentation Française, 123 p.

Garry G., Ballais J.-L., Masson M. (2002). – La place de l'hydrogéomorphologie dans les études d'inondation en France méditerranéenne, *Géomorphologie*, n° 1, p. 5-15.

Masson M. (1983). – Essai de cartographie des champs d'inondation par photo-interprétation, Aix-en-Provence, CETE Méditerranée-STU, 47 p.

Masson M. (1993). – Après Vaison-la-Romaine. Pour une approche pluridisciplinaire de la prévision et de la planification, *Revue de Géomorphologie Dynamique*, t. XLII, n° 2, p. 73-77.

Masson M., Garry G., Ballais J.-L. (1996). – Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique, Paris, Villes et Territoires, 100 p.

Ministère de l'aménagement du territoire, ministère de l'équipement, des transports et du logement (1999). – Guide méthodologique des Plans de Prévention des Risques naturels : risques d'inondation, Paris, La Documentation française, 123 p.

Ministère de l'écologie et du développement durable (2002). – Termes de référence d'un CCTP des Atlas des Zones Inondables, Annexe A.

Tricart J. (1958). – La crue de la mi-juin 1957 sur le Guil, l'Ubaye et la Cerveyrette, *Revue de Géographie Alpine*, vol. 4, p. 565-627.

Tricart J. (1960). – Mise au point : les types de lits fluviaux, *L'Information Géographique*, n° 5, p. 210-214.

Tricart J. (1974). – Phénomènes démesurés et régime permanent dans les bassins montagnards (Queyras et Ubaye, Alpes françaises), *Revue de Géomorphologie Dynamique*, vol. 3, p. 99-114.

Viers G. (1990). – *Éléments de géomorphologie*, Paris, Nathan, 224 p.

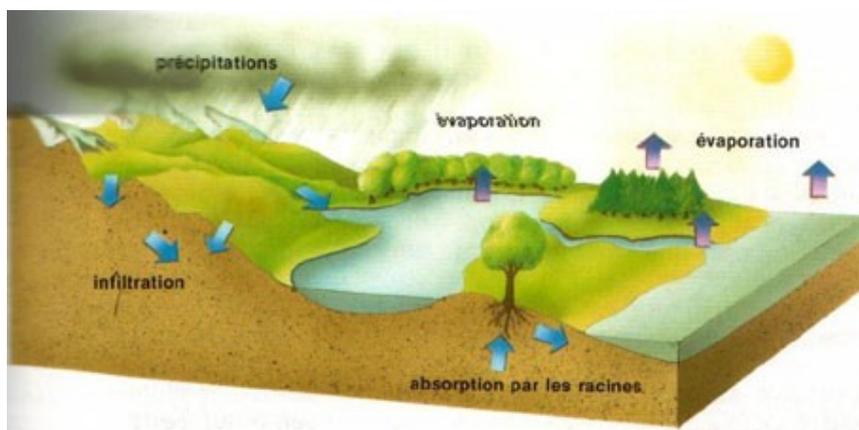
**LA CONNAISSANCE DU CYCLE DE L'EAU :
UN PREALABLE A L'ETUDE DES RISQUES MAJEURS LIES A
L'EAU**

Larbi Behlouli

ANRH

Les risques majeurs liés à l'eau sont principalement les inondations, la sécheresse, l'érosion et la pollution.

Pour les étudier l'ANRH s'est attelée durant ces dernières années à étudier et cartographier tous les paramètres du cycle hydrologique (**pluie, eaux superficielles et souterraines, sols et qualité**).



I-Missions, base de données et outils de l'ANRH

L'agence nationale des ressources hydrauliques est un établissement public à caractère administratif, à vocation scientifique et technique dont les missions sont:

- La collecte, le traitement et la mise à jour des informations relatives aux ressources en eau et en sol.
- La prospection et l'évaluation des ressources en eau et en sols .
- Le suivi de la ressource au plan quantitatif et qualitatif.
- La préservation, la protection et la sauvegarde de la ressource.

Pour réaliser ses missions, l'ANRH développe des outils de mesure, de prospection, d'analyse et d'expérimentation. Elle dispose :

- D'un réseau d'observation hydro climatologique (200 Stations hydrométriques, 800 Postes pluviométriques, 200 Pluviographes et 60 Stations climatologiques).
- D'un réseau piézométrique pour le suivi des nappes (700 Piézomètres).
- D'un réseau de surveillance de la qualité de l'eau (495 Stations qualité).
- De sept laboratoires d'analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux et sols.

Ces réseaux alimentent les banques de données sur les différents paramètres mesurés et observés. Ainsi elle dispose actuellement de :

110 000 dossiers de points d'eau (forages, puits et sources) inventoriés et archivés.

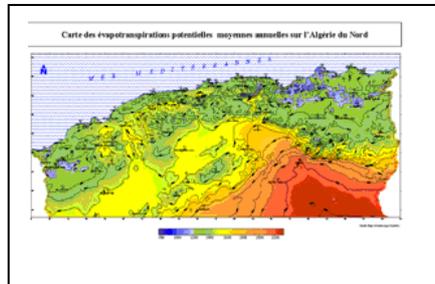
30 522 années –stations pluviométriques.

3 707 années –stations hydrométriques.

230 dossiers d'études agro - pédologiques et hydrodynamiques.

II-Evapotranspiration :

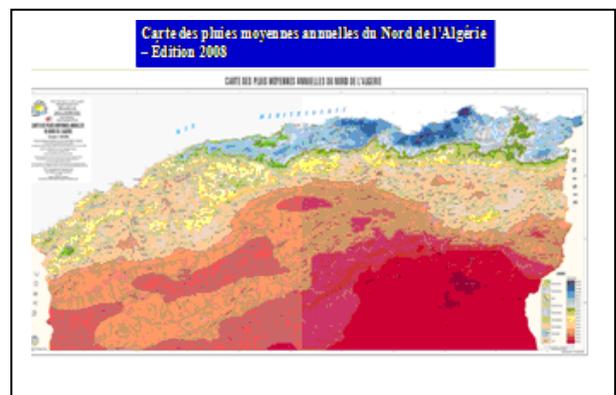
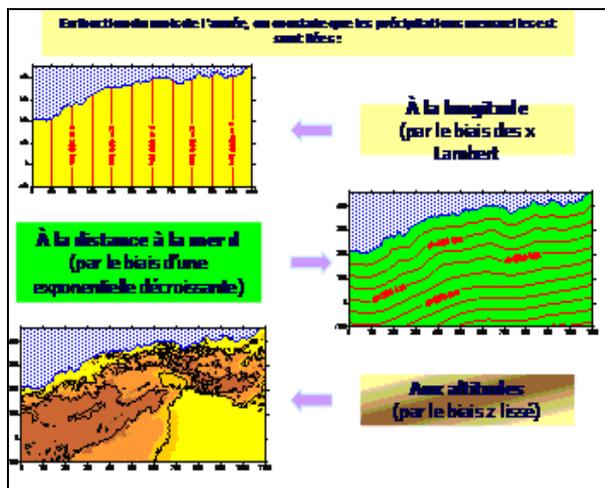
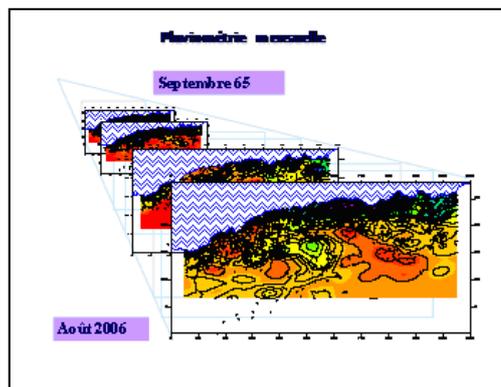
L'Agence a cartographié les évapotranspirations potentielles mensuelles et annuelles et interannuelles à partir de la modélisation de la formule de Penman.



III-Pluviométrie :

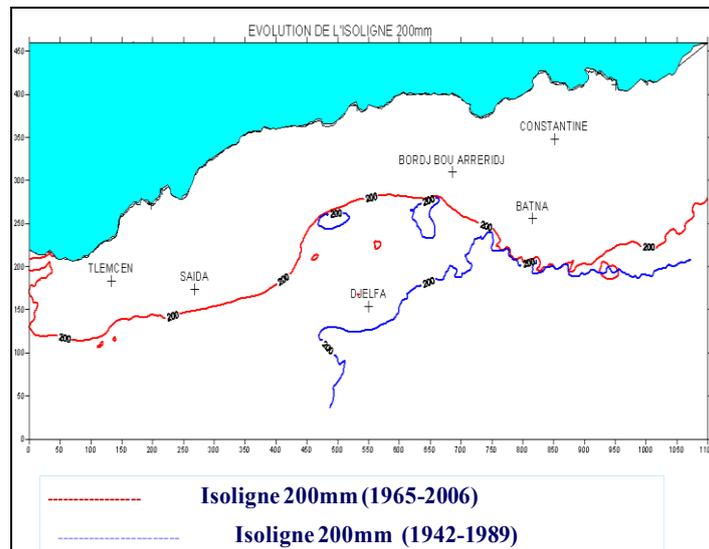
L'ANRH a réalisée les cartes (Sous forme de grilles) mensuelles, annuelles et Interannuelles de 1965-2008.

Ces grilles ont été obtenues par une modélisation en tenant compte de la Longitude, les Altitudes et la distance à la mer.



-Les détails contenus dans les cartes de pluies mensuelles obtenues en tenant compte du relief sont importantes pour l'agriculture.

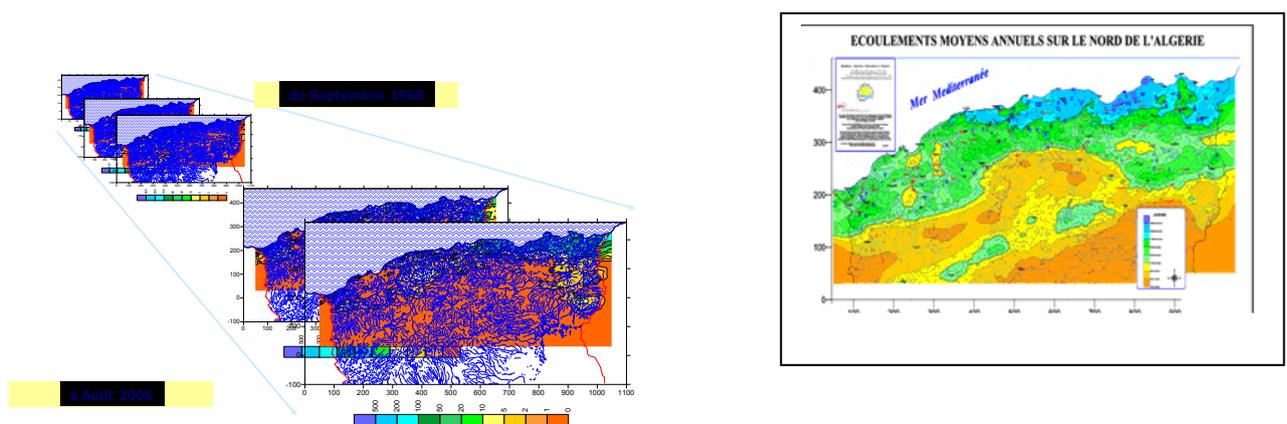
Ces outils permettent de suivre l'évolution des isohyètes de pluie, l'avancée de la sécheresse spatialement, comme on peut évaluer la pluie moyenne sur le territoire nationale ou par région.



IV-LES ECOULEMENTS DE SURFACE

Pour mieux évaluer et suivre l'évolution de la ressource superficielle, l'Agence a réalisé les cartes mensuelles (grilles), annuelles et interannuelles des écoulements pour la période 1965-2006 .

LES ECOULEMENTS DE SURFACE



-Un programme a été conçu et qui permet de reconstituer les séries de pluies, de suivre leur évolution ou en faire la statistique.

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

Quelques utilisations possibles avec l'interface VB :

Il suffit d'indiquer l'information à traiter

Les pluies ou les écoulements mensuels ou annuels simulés

D'indiquer le domaine d'intégration Ici, le bassin en amont de Biskra

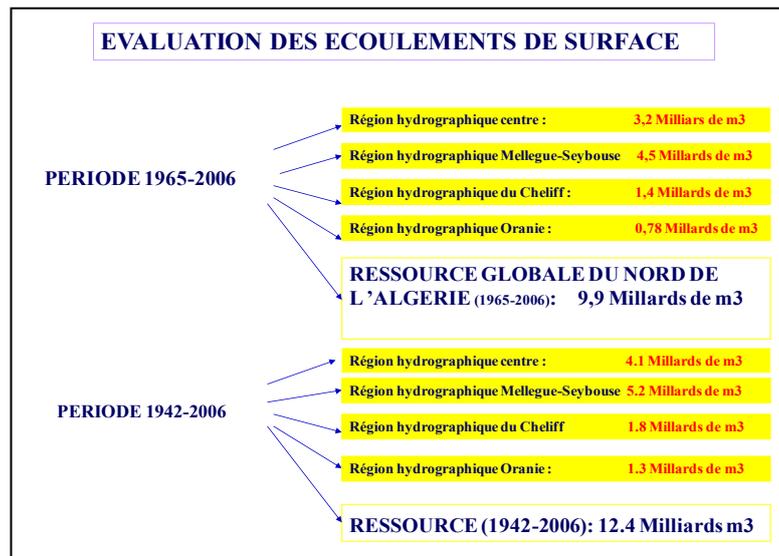
Enfin de nommer le fichier de sortie

On obtient alors la chronique des pluies ou écoulements mensuels ou annuels en tout point du territoire

On peut en tracer l'évolution

Ou en étudier la statistique

- Ainsi ces cartes à l'échelle mensuelle ou annuelle permettent d'évaluer les potentialités en eau de surface en tout point du territoire. Elles ont été utilisées pour évaluer la ressource en eau superficielle de l'Algérie.
- Elles sont également nécessaires pour les Aménagements hydro agricoles.
- C'est un outil d'aide à la décision rapide.



V-PLUIES DE COURTES DUREES

- Mise en place d'un programme de calcul automatique des pluies de courtes durées fréquentielles.
- Confection des graphes IDF.

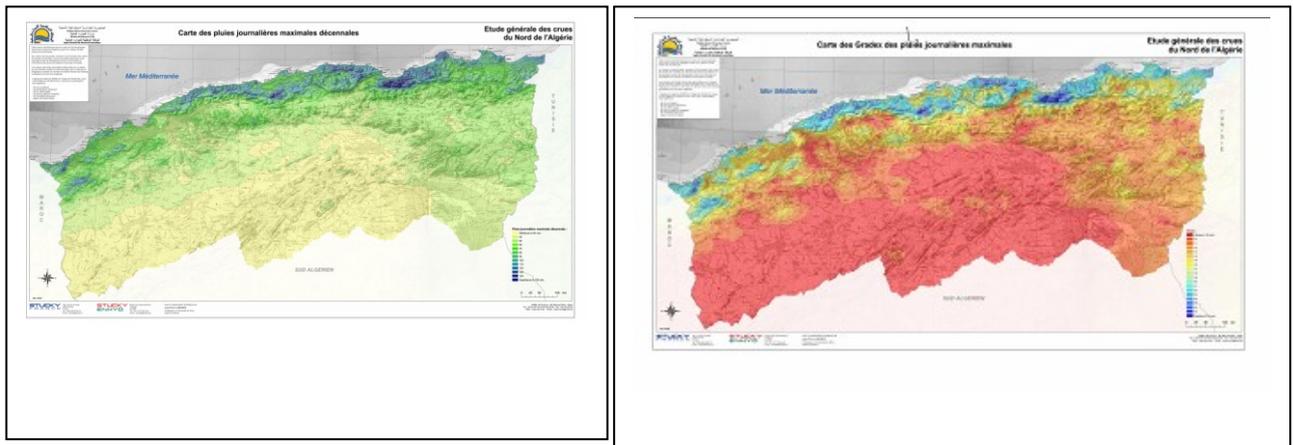
Les courbes IDF ne sont pas une fin en soi, mais sont construites dans un but bien précis, elles permettent d'une part de synthétiser l'information pluviométrique au droit d'une station donnée et, d'autre part de calculer succinctement des débits de projet et d'estimer des débits de crue ainsi que de déterminer les pluies fréquentielles.

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

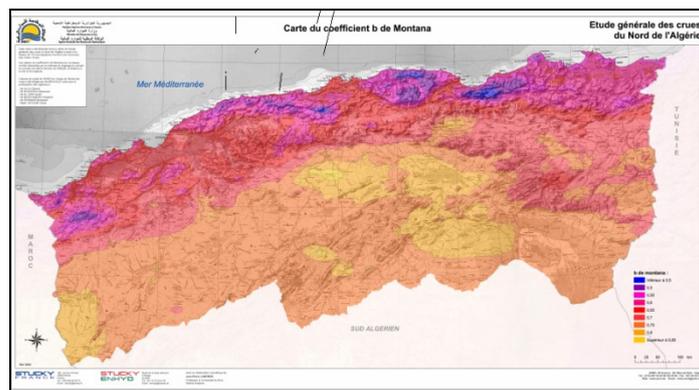
Stratégies de prévention et de protection

- Ces courbes sont utilisées pour le dimensionnement des ouvrages (ponts ; eaux pluviales.....)
 - l'intensité est un paramètre déterminant dans l'agressivité des pluies sur les surfaces arables et sur l'effet des écoulements torrentiels.
- Aussi, ces paramètres rentrent dans le dimensionnement des seuils de correction torrentielle afin de diminuer le caractère érosif des terrains agricoles pentus par les écoulements Torrentiels.

V- Cartographie des paramètres déterminants des pluies de courtes durées



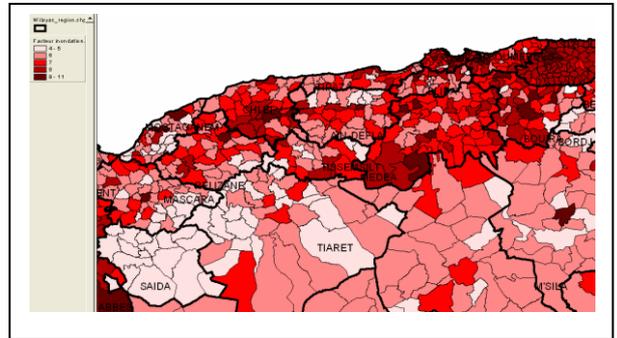
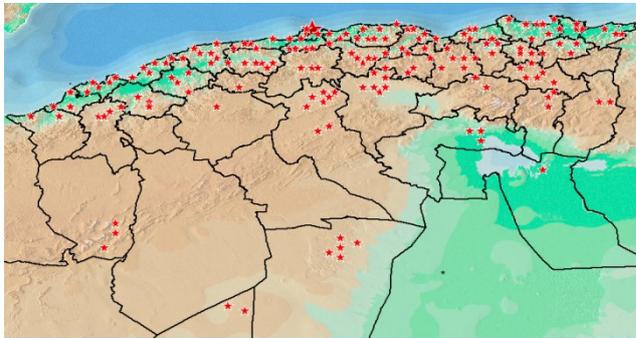
- le Gradex permet l'estimation des débits à partir des pluies.



- Le coefficient b de Montana est le paramètre climatique utilisé dans le calcul des pluies de Courtes durées et dans le dimensionnement des différents réseaux.

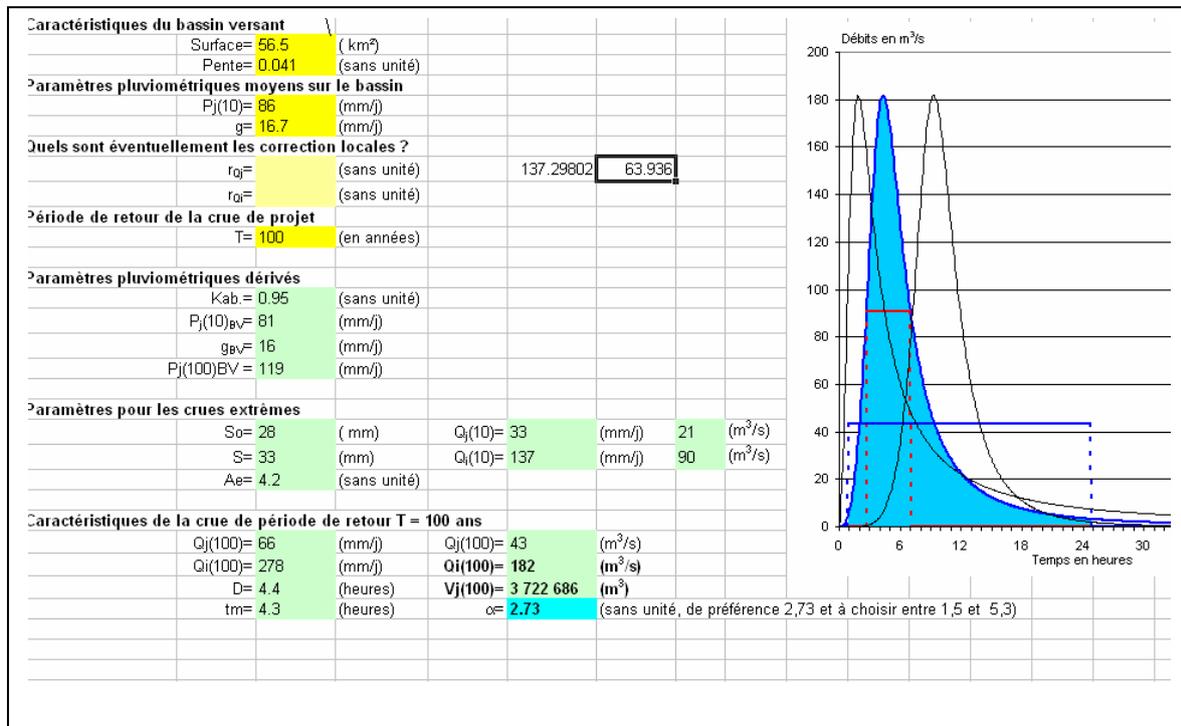
VI -EVENEMENTS EXTREMES - INONDATIONS

- Inondations : l'ANRH détient un inventaire des différentes inondations avec parfois des analyses hydrologiques du phénomène.
- Une carte des situations des événements et de pondération du risque a été établie.



- Crue

- Un modèle d'évaluation automatique de tous les paramètres de crue (débit de crue fréquentielle, débit de pointe, volume de la crue) en tout point du territoire a été mis en place. Ce modèle est conçu sous SIG.



Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

Tous les inputs du modèle sont déterminés automatiquement à partir des différentes grilles.

1-dimensionnement de nouveaux ouvrages pour l'irrigation.

2-dimensionnement des seuils de correction torrentielle pour la protection de bassins versants.

3- délimitation des zones inondables pour les périmètres irrigués.

4- protection des périmètres irrigués.

5-protection de l'infrastructure de base.

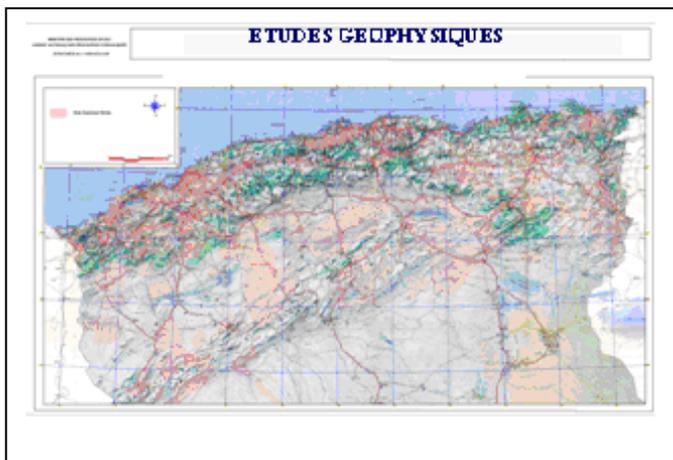
VII-LES EAUX SOUTERRAINES

L'Agence s'est beaucoup investi dans la prospection, l'évaluation de la ressource souterraine et son suivi sur les plans quantitatif et qualitatif.

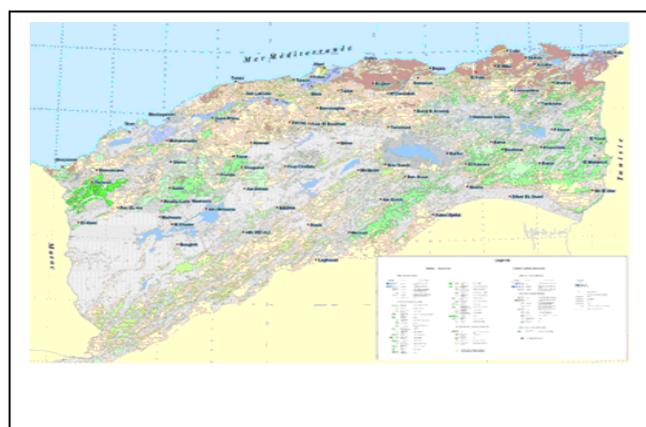
La couverture totale en géophysique réalisée entre 1999 et 2007 est de 263 762 Km² (73245 km² au nord et 14358 km² au sud).

Un programme de réalisation de différentes cartes a été élaboré et réalisé :

- cartes piézométriques.
- cartes géophysiques.
- cartes de vulnérabilité.
- cartes lithologiques.
- cartes hydrogéologiques.



Carte Géologique du Nord de l'Algérie



Carte des ressources en eau souterraines

Pour la réalisation de la Carte des ressources en eau souterraines du Nord de l'Algérie

La télédétection a été appliquée pour les besoins de contrôle et de mise à jour du fond topographique et d'interprétation géologique des images satellites.
Cette Carte a permis d'évaluer la ressource souterraine renouvelable qui est de 2.4Milliards de m³/an en 2004.

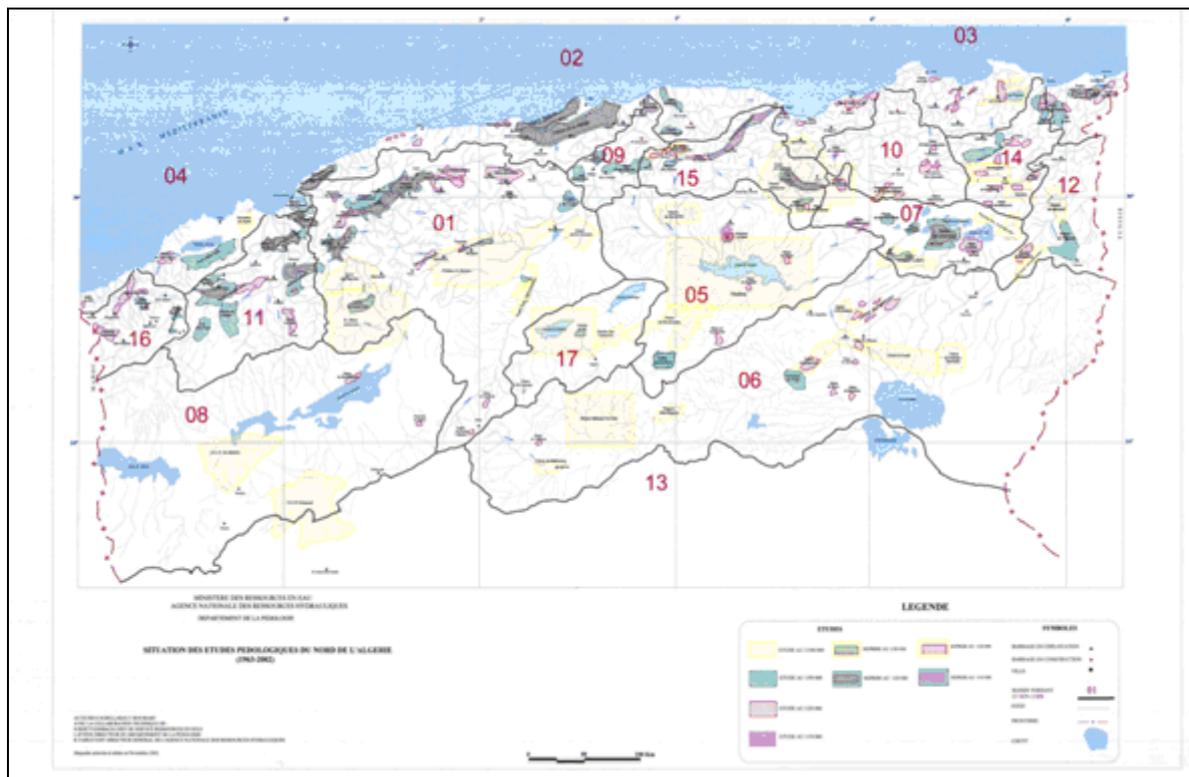
VIII- RESSOURCES EN SOLS

L'ANRH a réalisée l'étude de :

- 8 millions d'hectares ont été cartographiés, à différentes échelles.
- 2.2 millions d'hectares sont aptes à l'irrigation.
- Utilisation de la télédétection comme moyen d'investigation pour la cartographie à petite échelle sur 3 régions test (Mina, Hodna, Habra) .
- Différentes cartes des sols.
- Différentes cartes d'aptitudes culturales

Carte de situation des études pédologiques du nord de l'Algérie

(1963-2006)



IX- SUIVI DE LA QUALITE DES RESSOURCES EN EAU :

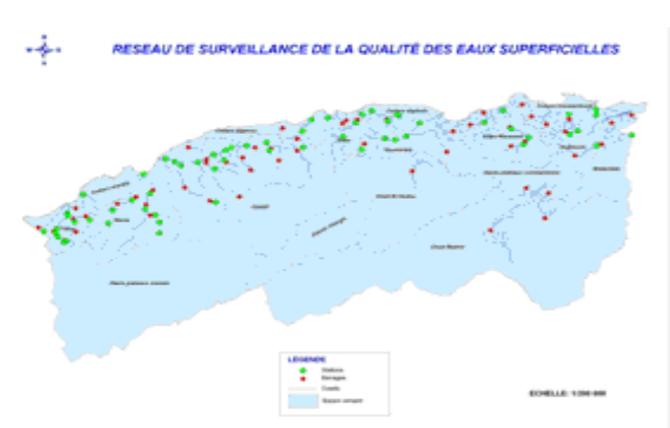
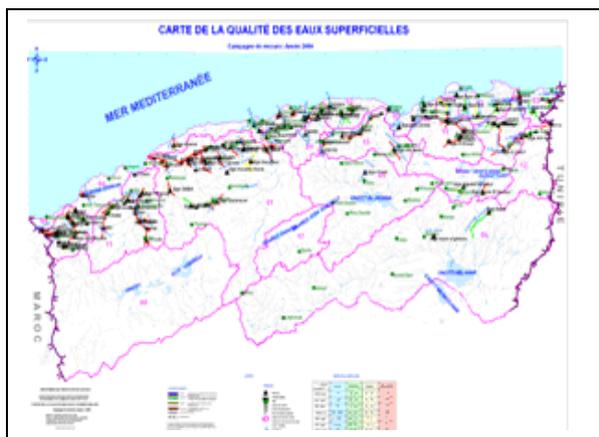
L'ANRH dispose de :

-07 laboratoires à travers le pays (Alger, Constantine, Oran, Blida, Ouargla, Adrar et Djelfa) d'une capacité annuelle de 40.000 échantillons / eau et 5000 échantillons / sol.

Ces unités permettent de répondre aux différentes demandes en matière d'analyses chimiques, bactériologiques et hydro biologiques

Ces résultats de laboratoire ont permis non seulement de suivre la qualité mais de lancer des études sur l'eutrophisation des barrages et des études générales sur la qualité des eaux et des sols.

Aussi l'ANRH réalise annuellement des cartes de qualité des ressources en eau.



Tous ces outils ont permis de faire le diagnostic de la qualité de l'eau de l'ensemble du réseau hydrographique et d'analyser les taux de matières minérales, organiques, oxydables, azotées et phosphorées.

En Algérie, la dégradation de la qualité des eaux, de l'amont vers l'aval est importante. Lors de la traversée des grandes villes, des pics importants de pollution sont enregistrés.

CONCLUSION GENERALE

Pour l'étude des différents risques majeurs, l'étude, l'évaluation et la connaissance de tous les paramètres hydrologiques est primordiale. Pour répondre aux besoins des techniciens et des scientifiques, l'Agence a développé tous les outils nécessaires.

Pour l'étude des inondations, les outils nécessaires pour la maîtrise et la connaissance des paramètres de la pluviométrie (pluie annuelle, mensuelle, courtes durées), de l'évapotranspiration, de la géomorphologie, d'évaluation des paramètres de crues fréquentielles (débit de crue, volume et épandage) ont été développés.

Pour l'étude de la sécheresse les cartes de ressources en eau souterraines et les outils mis en place pour les inondations répondent largement aux besoins des études de sécheresses.

Aussi pour les études sur l'érosion et la pollution, les différentes études des sols et les cartes de suivi de la qualité sont d'une importance capitale.

En résumé l'ANRH à travers sa base d'informations et ses outils est restée fidèle à sa vocation scientifique au service du développement technique en Algérie.

II. RISQUES GEOLOGIQUES

1. Risques Sismiques

LES SEISMES EN ALGERIE DU NORD

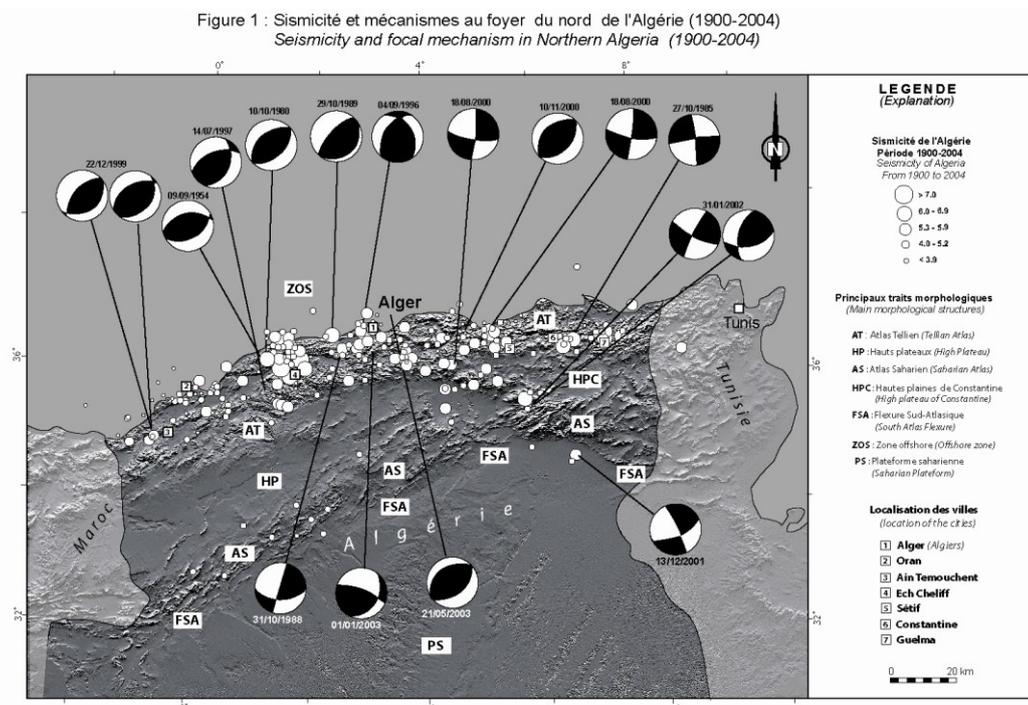
Yelles-Chaouche A.K., Semmane F
CRAAG B.P.63 Bouzareah Alger Algérie

I - INTRODUCTION

L'Algérie du Nord est frappée régulièrement par des séismes parfois importants mais souvent modérés à faibles. Les séismes modérés à fort génèrent bien souvent des catastrophes (El Asnam, 10.10.1980, Boumerdes, 21.05.2003) difficiles à surmonter car notre pays, à l'instar de beaucoup d'autres, reste encore mal préparé pour affronter de tels cataclysmes.

S'il est vrai qu'avant la catastrophe d'El Asnam (10 octobre 1980, M=7.3), peu de choses étaient connues de la sismicité algérienne, les leçons données par ce séisme furent multiples et eurent un impact important. Ce séisme a permis de démontrer : que de violents séismes pouvaient se produire en Algérie du Nord, que cette la sismicité en Algérie du Nord était due au rapprochement de la plaque européenne avec la plaque africaine, l'importance de renforcer la surveillance sismique du territoire, de l'importance de l'application des normes de construction parasismiques, l'importance d'une stratégie de réduction du risque.

Aujourd'hui, grâce au réseau de surveillance sismique nationale ainsi que tous les travaux scientifiques qui ont été réalisés ou qui sont actuellement en cours, et alors que beaucoup d'efforts restent à faire, des réponses à plusieurs interrogations concernant les caractéristiques de la sismicité peuvent être apportées. Ces réponses sont d'une extrême importance pour la réduction du risque sismique dans notre pays



II - SISMICITE HISTORIQUE

L'activité sismique en Algérie du Nord est connue depuis 419, date à laquelle s'est produit le séisme de Sitifis (actuellement Sétif).

Depuis cette date, de nombreux séismes se sont produits, parmi eux certains violents et meurtriers. Parmi ces séismes nous pouvons citer ceux qui ont touché Alger en 1365 et en

1716, Oran en 1790, Gouraya en 1891. Dans une période plus récente, on peut citer les séismes d'Orleansville (09.09.1954), d'El Asnam (10.10.1980, Ouyed et al., 1981, Benhallou, 1985, Meghraoui, 1988), de Constantine (27.10.1985, Bounif et al., 1991), de Tipaza (29.10.1989, Meghraoui, 1991) de Mascara (17.08.1994, Benouar et al., 1996), d'Alger (04.09.1996, Yelles et al., 1997), de Ain Temouchent (22.12.1999, Yelles et al., 2004) et de Beni Ouartilane (10.11.2000, Yelles et al., 2001) (Boumerdes-Alger, 2003, Yelles et al., 2003).

Principaux séismes d'Algérie (1365-2001)

Lieu	Date	I/ M	M	Victimes
Sitifis (Setif)	419			Destruction
Alger	03.01.1365	X		Plusieurs
Alger	10.03.1673			
Mitidja	03.02.1716	X		20 000
Oran	09.10.1790	X		2000
Blida	02.03.1825	X		7000
Djidjelli	22.08.1856	X		-
Aures	16.11.1869	IX		30
Gouraya	15.01.1891	X		38
Orleansville	09.09.1954	X	6.7	1243
El Asnam	10.10.1980	X	7.3	2633
Constantine	27.10.1985	VIII	5.9	10
Tipaza	29.10.1989	VIII	6.0	22
Mascara	18.08.1994	VII	5.7	175
Alger	04.09.1996	VII	5.7	
Temouchent	22.12.1999	VII	5.7	25
B.Ouartilane	10.11.2000	VII	5.4	04
Boumerdes-Alger	21.05.2003	X	6.8	2300

L'étude de cette sismicité historique et contemporaine est essentielle à plus d'un titre car elle a permis en premier lieu d'élaborer les différents catalogues de sismicité (Roussel, 1967, Benhallou, 1985, Mokrane et al., 1994, Benouar, 1994; Boudiaf, 1996, Yelles et al., 2002), en second lieu de réaliser des cartes de sismicité de sismotectonique (Meghraoui, 1988, Boudiaf, 1996), d'Intensité Maximale (Roussel, 1973b, Bezzeghoud, 1996), d'Aléa sismique (Hamdache, 1998 a et b).

A partir des différentes cartes déjà établies, il est possible donc de constater où se produisent les séismes, connaître l'ampleur par région. Nous pouvons également avoir la localisation des sources sismogènes et établir une zonation du territoire.

III - SURVEILLANCE SISMIQUE DU TERRITOIRE

Du point de vue historique, la première station sismologique fût installée à Alger en 1910, elle fut suivie par l'installation d'autres stations à Oued Fodda (1935), Relizane (1955), Setif (1958). Après le séisme d'El Asnam du 10 Octobre 1980 et grâce également aux avancées technologiques, fût installé un réseau sismologique télémétré composé de 32 stations dont 03 stations régionales et une station centrale basée à Alger. Ce réseau (REALSAS, Réseau Algérien de Surveillance et d'Alerte Sismique) est entré en fonctionnement en 1990, date du début d'installation de plusieurs stations.

Aujourd'hui ce réseau a été étendu par l'installation d'un réseau de stations numériques de près de 50 stations.

D'autres stations seront bientôt installées dans les régions nord où la couverture reste faible

Lors de l'occurrence de séismes importants, le réseau de surveillance est densifié dans la région touchée, par un parc de stations mobiles. Ce parc permet ainsi de réaliser des campagnes de microsismicité et de mieux connaître ainsi les structures tectoniques à l'origine du séisme.

IV - ACTIVITE SISMIQUE EN ALGERIE DU NORD

De par les informations fournies par la sismicité historique, par les études de sismotectoniques, de sismologie, de paléosismologie, d'aléa sismique, nous possédons aujourd'hui des indications importantes sur l'activité sismique en Algérie du Nord.

Nous pouvons ainsi dire que cette activité se concentre essentiellement dans la région Nord du pays quoique de façon très épisodique, quelques microsecousses sont enregistrées dans la partie saharienne. Dans la région Nord, la région tellienne est la plus active. Le zonage effectué indique que les régions d'El Asnam, Oran et Alger sont les régions les plus menacées puisque dans ces zones, les séismes les plus importants se sont produits.

L'activité sismique en Algérie du Nord est continue puisqu'elle se produit tout le long de l'année.

Il faut aussi noter que chaque mois, il se produit environ une cinquantaine de microsecousses en général non ressenties par la population. Tous les deux mois environ se produit un séisme de magnitude supérieur à 3.5. On remarque également que l'activité sismique est plus intense dans la région Est du pays que dans les régions Centre ou Ouest.

Du point de vue Géodynamique et grâce à la théorie de la tectonique des plaques, on sait maintenant que les séismes qui se produisent en Algérie du Nord sont causés par l'affrontement des plaques tectoniques Africaine et Eurasiatique (Phillip, 1983, 1987). Cette confrontation qui est d'environ 0.6 cm par an entraîne la déformation des bordures septentrionale et méridionale des deux plaques majeures sus-citées, conduisant à la formation des chaînes de montagnes Atlasique et Alpine.

Cette déformation génère l'existence de nombreuses failles actives qui jalonnent les régions Atlasiques du pays. Le jeu de ces failles provoque donc les séismes qui se produisent lorsque le seuil de rupture de ces failles est atteint

V - CARACTERISTIQUE DE LA SISMICITE

Au cours de ces deux dernières décennies, plusieurs séismes importants (**séisme d'El Asnam (10/10/1980, M=7.3)**, **séisme de Constantine (27/10/1985, M=6.0)**, **séisme de Tipaza (29/10/1989, M=6.0)**, **séisme de Mascara (17/08/1994, M=5.7)**, **séisme de Ain Benian (04/09/1996, M=5.7)** ; **séisme de Ain Temouchent (22/10/1999, M=5.8)**, **séisme de Beni Ouartilane (10.11.2000, M=5.4)**) **Boumerdes-Alger (21/05/2003, Mw :6.8)** se sont produit. L'étude de ces séismes récents a permis de préciser considérablement les caractéristiques des séismes qui se produisent en Algérie. C'est ainsi, que nous pouvons affirmer que les séismes qui se produisent en Algérie sont en général faibles à modérés atteignant parfois la magnitude 6.0. Dans de rares cas, ils peuvent être violents comme ce fut le cas à El Asnam ; ce séisme est d'ailleurs considéré comme le plus important qu'est connu la Méditerranée Occidentale (Meghraoui, 1986, Meghraoui, 1988). Ces séismes sont produit généralement par des plis, plis failles ou failles inverses de direction NNE-SSW témoignant du raccourcissement, comme l'indique les différents mécanismes au foyer, qui se produit dans la région Nord. Dans la région Est, les séismes semblent plutôt décrochants du fait d'une réorientation du champ de contraintes.

Les séismes algériens sont d'autre part superficiels ne dépassant pas en profondeur les 15 km, ce qui les rendent plus perceptibles par la population et donc plus dangereux. Leur faible profondeur témoigne également de l'absence de zone de subduction.

Tous les séismes récents qui se sont produits ont souvent mis en relief des structures actives non connues précédemment, indiquant la complexité de l'identification des structures actives profondes. Il est donc important de noter que des efforts importants doivent être réalisés pour localiser de nouvelles structures actives.

VI - ALEA SISMIQUE

Pour estimer l'ampleur de la sismicité dans une région donnée, l'évaluation de l'aléa sismique s'impose. L'aléa correspond à la probabilité d'occurrence d'un événement sismique avec un niveau d'accélération donnée pour une période de retour.

Pour une période de 475 ans, on s'aperçoit que le niveau d'accélération le plus important se situe dans la région de Chleff où des niveaux d'accélération de 0.5 g peuvent se produire. Dans la région algéroise suite à l'occurrence du séisme de Boumerdes des niveaux de 0.25g sont à envisager.

Si la région tellienne correspond ainsi à la région où l'aléa reste le plus élevé, plus nous nous éloignons de la région côtière et plus les niveaux d'accélération probables sont plus faibles. C'est ainsi que dans les régions des Hauts Plateaux ou de l'Atlas Saharien, les niveaux d'accélération ne dépassent pas les 0.15g. Ceci s'explique par le fait que l'on s'éloigne de la frontière de plaques Eurasiatique africaine.

CONCLUSION

L'activité sismique en Algérie commence à être connue puisqu'aujourd'hui nous en connaissons la cause majeure, sa répartition sur le territoire nationale, son ampleur. Cependant beaucoup d'efforts restent à déployer pour parvenir à comprendre l'ensemble des mécanismes de cette sismicité, sa récurrence. Aujourd'hui il faut poursuivre ces efforts en améliorant les performances de la surveillance sismique du territoire par la densification du réseau sismologique, en multipliant les investigations de terrain en sismotectonique, en paléosismologie... C'est ainsi que ces dernières années un accent particulier a été mis sur la connaissance de la sismicité de la marge par les campagnes Maradja 1 et 2. Plus récemment un projet d'étude sur la structure profonde de la marge a été lancé grâce au projet SPIRAL. Toutes ces actions permettront ainsi de préciser le niveau de sismicité des régions du Nord, les niveaux d'Aléas.

Ces efforts doivent enfin servir non seulement à améliorer nos connaissances scientifiques mais avant tout servir la prévention et de façon générale la réduction du risque sismique dans notre pays.

REFERENCES

- Benhallou. H.(1985). Les catastrophes sismiques de la région d'Echelif dans le contexte de la sismicité historique de l'Algérie. Thèse d'Etat. USTHB. Alger. 294 p.
- Benouar D. (1994). The seismicity of Algeria and the Maghreb during the twentieth century, PhD dissertation, Imperial College London, U.K.
- Bezzeghoud M., A. Ayadi, A. Sebai, M.Ait Messaoud,A.Mokrane and H.Benhallou. Seismicity of Algeria between 1365 and 1989 : map of Maximum Observed Intensities (MOI) 1 Avances en Geofisica y Geodesia I,IGN,Madrid ,107-114. 1996
- Bezzeghoud M. and E. Buforn (1999). Source parameters of the 1992 Melilla (Spain Mw=4.8) 1994 Alhoceima (Morocco, Mw =5.8) and 1994 Mascara (Algeria), Mw=5.7) earthquakes and seismotectonic implications ; B.S.S.A. 89, 2, pp, 359-372.
- Boudiaf A. (1996). Etude sismotectonique de la région d'Alger et de la Kabylie. Thèse de Doctorat d'Université, de Montpellier II, 273 p.
- Hamdache M.,1988a. Seismic hazard assesment for the main seismogenic zones in northern algeria. Pure Appl. Geophys. 152, 281-314.
- Hamdache M., 1998b. Seismic hazard estimation in northern Algeria. Nat. hazards,18, 119-144.
- Hamdache M., M. Bezzeghoud and A. Mokrane
Estimation of seismic hazard parameters in the northern part of Algeria
Pure. Appl. Geophys. 151 (1998),101-117
- Hamdache M. S.J.P. Retief 2001 Site specific seismic hazard estimation in the main seismogenic zones of north Algeria. Pure Appl. Geophys. 158, 1677-1690.
- Meghraoui M., Cisternas A. and Phillip H. (1986). Seismotectonics of the Chelif basin: Structure background of the El-Asnam earthquake, Tectonics5, 809-836.
- Meghraoui M. (1988). Géologie des zones sismiques du nord de l'Algérie: Paléosismologie, Tectonique active et Synthèse Sismotectonique, Thèse de Doctorat es Science, U. de Paris XI, France,356 pp.
- Mokrane A., Ait Messaoud A., Sebai A., Menia N., Ayadi A., Bezzeghoud M. Les séismes en Algérie de 1365 à 1992. (1994).Publication CRAAG.
- Phillip H., (1983). La tectonique actuelle et récente dans le domaine Méditerranéen et ses bordures, ses relations avec la sismicité. Thèse de Doctorat de l'USTL .
- Phillip H. (1987). Plioquaternary evolution of the stress field in the Mediterranean zones of subduction and collision. Annales Geophysicae., 5B, 301-320.
- Ouyed M., Meghraoui M., Cisternas A. Deschamps A., Dorel J., Frechet J., Gaulon R., Hatzfeld D., and Phillip H. (1981). Seismotectonics of the El-Asnam earthquake, Nature,292, 26-31.
- Rothé, J.P. (1950). Les séismes de Kerrata et la sismicité, de l'Algérie, Bull. Serv. Carte Géol. Algérie. Série.,4,3.
- Roussel J. (1973). Les zones actives et la fréquence des séismes en Alg,rie, Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord, 3-4,211-228.
- A.K. Yelles Chaouche , H. Djellit, M. Derder, A. Abtout and S. Bourouis: The Ain Benian Fault: A New Active Coastal Fault Revealed by the Algiers September 4th , 1996 Earthquake. I.A.S.P.E.I. (Inter. Assoc. of Seismology and Physics of the Earth's Interior),Thessalonik Greece, August 18-28 1997.
- A.K.Yelles-Chaouche, H. Djellit, Derder M.,Abtout A. and H.Beldjoudi

The Ain Temouchent Earthquake of Decembre 22 th,1999. Preliminary Investigations XXVII General Assembly of the European Seismological Commission ESC. Lisbonne, September,2000.

A.K. Yelles-Chaouche Recent seismic activity in Algeria .Workshop on the Geodynamics of the western part of the Eurasi-Africa plate boundary (Azores-Tunisia) San Fernando(Cadiz, Spain) 31May-2June 2001

A.K. Yelles-Chaouche, A. Deramchi, A. Ferkoul et Aoulaiche. Les séismes d'Algérie du Nord de 1992 à 2001 (Catalogue) . Publication CRAAG

A.K.Yelles-Chaouche, H.Djellit, H.Beldjoudi, M. Bezzeghoud and E.Buform

The Ain Temouchent earthquake of December 22 th, 1999. Pageoph 2002

Yielding G., Ouyed M., King. G.C.P. and Hatzfeld D. (1989). Active tectonics of the Algerian Atlas Mountains: Evidence from aftershocks of the 1980 El-Asnam earthquake. Geophys. J. Int.,99, 761-788.

L'EXPERIENCE ALGERIENNE EN GENIE PARASISMIQUE

1980-2009

BELAZOUGUI M.

Directeur du CGS

INTRODUCTION

L'expérience Algérienne dans le domaine de la réduction du risque sismique a débuté après le dramatique séisme d'El Asnam du 10 octobre 1980 (3000 morts et plus de 3 milliards de US Dollars de dégâts)

Au cours des 3 dernières décennies, notre pays ainsi que sa population et son économie ont énormément souffert des conséquences dommageables de pas moins de 10 séismes, dont 3 très dévastateurs:

- El-Asnam (Oct. 10, 1980, Mw = 7.2)
- Constantine (Oct. 27, 1985, Mw = 5.9)
- Bordj Bounaama (Jan. 26, 1987, Mw = 5.3)
- Oued Djer (Oct. 31, 1988, Mw = 5.3)
- Tipaza (Oct. 29, 1989, Mw = 6.2)
- Mascara (Aug. 18, 1994, Mw = 5.6)
- Aïn Benian (Sept. 04, 1996, Mw = 5.6)
- Aïn Temouchent (Dec. 22, 1999, Mw = 5.5)
- Beni Ourtilane (Nov. 10, 2000, Mw = 5.4)
- Boumerdes-Alger (May 23, 2003, Mw= 6.8)

Cette note développe dans une première partie, la Politique Nationale de réduction du risque et de gestion des catastrophes avec ses différents aspects :

- Les principaux objectifs.
- Les principales réalisations.
- Nouveaux dispositifs législatifs et institutionnels.
- Quelques aspects de coopération.

Et dans la seconde partie, l'évolution des règles parasismiques Algériennes (RPA)

1- LES REALISATIONS PENDANT LES 3 DERNIERES DECENNIES DANS LE DOMAINE DE LA REDUCTION DU RISQUE SISMIQUE EN ALGERIE

a) – Adoption du 1^{er} règlement parasismique Algérien (RPA 81)

Ce règlement a été régulièrement actualisé et mis à jour par de nouvelles versions:

- **RPA 81/83**
- **RPA 88**
- **RPA 99**
- **RPA 99/2003**

b)- Élaboration et adoption du règlement parasismique Algérien des ouvrages d'art (RPOA) en 2009.

c-) Renforcement des réseaux de surveillance des phénomènes et des moyens de recherche expérimentale :

- Le Réseau de surveillance sismique télémétré au niveau du Centre Algérien de Géophysique (CRAAG) composé de 32 stations en 1990-92 (Il est actuellement en cours de modernisation)
- Le réseau sismique d'enregistrement de mouvements forts composé actuellement de 300 accélérographes installés successivement, à travers le territoire national
- Une dizaine de sismographes mobiles au niveau du CGS et autant au niveau du CRAAG et qui ont été déployés pour la première fois dans la région de Boumerdès pour enregistrer les répliques du séisme du 21 mai 2003.
- Des équipements mobiles et fixes d'essais dynamiques des structures au niveau du CGS dont une « table vibrante » (shaking table) de 6m x 6m à 6 degrés de liberté de dernière génération

d)- Évaluation des Aléas et/ou des risques au niveau national

- Réalisation des Cartes de l'aléa sismique aux niveaux national et régional (Cartes d'iso-accélération), ainsi que les cartes de microzonage sismique de pas moins de 30 villes des régions de Chlef, Aïn Defla, Alger, Mascara et Ain Temouchent, et de plusieurs infrastructures industrielles et économiques (barrages, centrales électriques ...). Ces cartes sont également en cours d'élaboration pour les régions d'Oran, Annaba et Constantine.
- La vulnérabilité sismique de certains bâtiments stratégiques (Alger, Constantine) .
- La vulnérabilité et risque sismique pour le centre d'Alger .
- Réalisation de la Carte du risque sismique du Grand Alger établie en coopération avec la JICA/Japon.

e)- Formation et éducation

Au plan de la formation, et pour ce qui est du risque sismique, outre les modules des sciences de la terre qui sont enseignés dans cinq universités du pays, il y a lieu de signaler l'introduction de modules d'enseignement de « Dynamique des structures » et de « Calcul parasismique des structures » depuis 1984 dans les Instituts de Génie Civil des différentes universités algériennes.

De même, il a été procédé en 2004 à l'élaboration de programmes d'enseignement portant sur l'« environnement et les risques naturels » au niveau des cycles primaire, moyen et secondaire. Ces programmes sont en cours de généralisation dans les établissements primaires et secondaires sur tout le territoire national.

f- Nouveaux dispositifs législatifs et institutionnels

- Promulgation de la loi 04-20 du 25 Décembre 2004 relative à «la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes » dans le cadre du développement durable.

Cette loi, outre les prescriptions concernant l'ensemble des aspects liés à la prévention et à la gestion des catastrophes à prendre en charge par les institutions, les collectivités et les différents partenaires concernés, prévoit la création d'une « Délégation Nationale aux Risques majeurs ». Les missions de cette délégation sont: le conseil, l'impulsion l'évaluation et la coordination des actions visant à réduire l'impact des risques majeurs sur l'économie du pays et sur la sécurité des personnes et des biens.

- Publication de l' « Ordonnance du 26 août 2003 relative à l'obligation d'assurance des catastrophes naturelles et à l'indemnisation des victimes ». Cette loi, entrée en vigueur le 1^o septembre 2004, assure la couverture pour les risques « séisme », « inondations », « mouvements de terrains », « tempêtes et vents violents », de tous les biens immobiliers (et mobiliers dans certains cas) par la dizaine de compagnies d'assurances publiques et privées existantes.
- Promulgation de la « Loi 04-05 du 14 Août 2004 modifiant et complétant la loi 90-29 du 1^o décembre 1990 relative à l'aménagement et à l'urbanisme ».

Ce texte a trait à une meilleure définition des aléas et des zones à risque où les constructions sont interdites ou limitées, mais stipule surtout deux prescriptions très importantes :

- Démolition systématique de toute construction érigée sans permis de construire.
- Introduction obligatoire dans le dossier de demande de permis de construire, outre les plans d'architecture traditionnels signés par l'Architecte, des plans de structure signés par un Ingénieur Génie Civil agréé.
- Révision, par Arrêté du 04 janvier 2004 du Ministre de l'Habitat et de l'Urbanisme (MHU) des Règles Parasismiques Algériennes qui deviennent « RPA 99/Version 2003 ».

COOPERATION REGIONALE ET INTERNATIONALE

- “Projet pour l'amélioration du système d'assurance contre les catastrophes naturelles” financé par le gouvernement Allemand. La concrétisation de ce projet peut être considéré comme un succès dans le domaine de la coopération.
- On peut également citer les projets suivants:
 - Seismed (1990-1991),
 - Radius (1998-1999) et Risk-UE (2001-2004)
 - Fructueux échanges Maghrébins dans le cadre du “Groupe Maghrébin” puis de “l'Association Maghrébine de Génie parasismique” depuis 1987.
 - Projet JICA pour le grand Alger (Microzonage du risque sismique).

REGLES PARASISMIQUES ALGERIENNES

Objectif recherché à travers l'application des RPA (et des autres règles concomitantes)

- Dans le cas d'un séisme de faible intensité, la construction ne doit subir aucun dommage.
- Dans le cas d'un séisme de moyenne intensité, la construction ne subira que des dommages structurels légers.
- Dans le cas d'un séisme d'intensité élevée, la construction ne doit pas s'effondrer.

CONTENU

- ✓ **Chapitre I : Généralités**
- ✓ **Chapitre II : Règles générales de conception**
- ✓ **Chapitre III : Critères de classification**
- ✓ **Chapitre IV : Règles de calcul**
- ✓ **Chapitre V : Justification de la sécurité**
- ✓ **Chapitre VI : Prescriptions complémentaires et éléments non structuraux**
- ✓ **Chapitre VII : Structure en béton armé**
- ✓ **Chapitre VIII : Structures en acier**
- ✓ **Chapitre IX : Structures en maçonnerie porteuse chaînée**

- ✓ **Chapitre X : Fondations et murs de soutènement**
- ✓ **Annexe 1. : Répartition des communes sur les différentes zones sismiques identifiées HISTORIQUE**

- 1978 : Version préliminaire du code parasismique algérien
 - inspirée du code américain (UBC 73/76).
 - Les forces sismiques sont calculées à l'aide de la méthode statique équivalente.
- 1981 : Edition de la première version du code parasismique algérien (RPA 81) après le séisme d'El Asnam (M 7,2 / 10 octobre 1980) et mise en application par arrêté en parallèle avec le "PS-69 + compléments"
- 1983: RPA – 81 (version 83) exclusivement
- 1984: Evaluation du RPA –81 (version 83) à la suite des résultats des études de microzonage de Chlef
- 1988: Révision du RPA – 81 (version 83) Réaménagement du document
- 1999 : Seconde révision du code
 - Modifications dans la méthode statique équivalente
 - Meilleure explicitation de la méthode dynamique :(méthode modale spectrale)
 - Chapitres « Matériaux » et « Fondations » individualisés
 - Version plus complète et mieux lisible
- 2003 : Troisième révision suite au séisme de Boumerdes (M 6,8 / 21 mai 2003)
 Nouveau zonage sismique

Zone 0	Sismicité négligeable
Zone I	Sismicité faible
Zones II a et II b	Sismicité moyenne
Zone III	Sismicité élevée
- Modification des Valeurs du coefficient d'accélération "A"

Anciennes valeurs

	ZON		
Grp	I	II	III
1A	0.12	0.25	0.35
1B	0.10	0.20	0.30
2	0.08	0.15	0.25
3	0.05	0.10	0.15

Nouvelles valeurs

	ZON			
Grp	I	II a	II b	III
1A	0.15	0.25	0.30	0.4
1B	0.12	0.20	0.25	0.3
2	0.10	0.15	0.20	0.2
3	0.07	0.10	0.14	0.1

- Limitation du nombre de niveaux et hauteurs pour les constructions contreventées par Des portiques en Béton Armé

1-a/ Portique en BA sans remplissage en maçonnerie rigide

Zone		II a	II b et III
Nbr de niveaux	R+4	R+3	R+2
Hauteur (m)	17	14	11

- Limitation du nombre de niveaux et hauteurs pour les constructions contreventées par portiques en Béton Armé

1-b/ Portique en BA avec remplissage en maçonnerie rigide

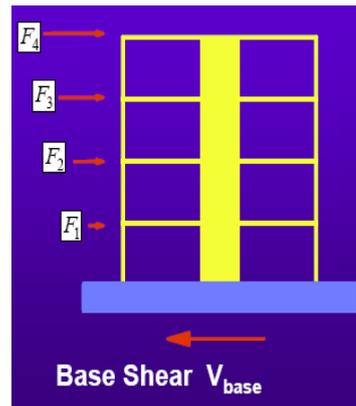
Zone	I	II a	II b	III
Nbr de niveaux	R+4	R+3	R+2	R+1
Hauteur (m)	17	14	11	8

Méthode de calcul : Statique équivalente

$$V_{base} = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} W$$

$$F_i = \frac{(V_{base} - F_t) W h_i}{\sum_{j=1}^n W_j h_j}$$

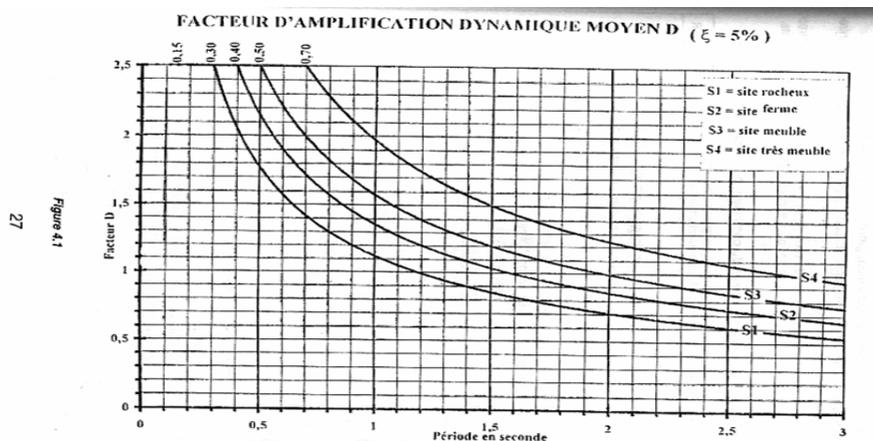
$F_t = 0,07 TV \quad T > 0.7 \text{ sec}$
 $F_t = 0 \quad T < 0.7 \text{ sec}$



- A : coefficient d'accélération de zone
- D : facteur d'amplification dynamique moyen, fonction de la catégorie de site, du facteur de correction d'amortissement (h) et de la période fondamentale de la structure (T).
- R : coefficient de comportement global de la structure
- Q : facteur de qualité
- W : poids total de la structure ($W = \sum W_i$, avec $W_i = WGi + \beta WQi$)

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta (T_2/T)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta (T_2/3.0)^{2/3} (3.0/T)^{5/3} & T \geq 3.0s \end{cases}$$

$$V = \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_a}{g} \right) \alpha_i \cdot W_T$$



Méthode de calcul : Modale spectrale

- **(Sa /g): Spectre de réponse de calcul**
- **α : Masse modale effective**
- **WT : Poids total de la structure**

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta (1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta (1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3.0s \end{cases}$$

- Un laboratoire de génie sismique pour la recherche expérimentale est en voie de finalisation (il sera opérationnel fin 2010); il sera ouvert à tous les chercheurs algériens du domaine et à la coopération (arabe, euro-méditerranéenne, et autre...).

PERSPECTIVES

Pour améliorer notre code parasismique nous avons besoin d'introduire :

- une Formation dans le domaine de la recherche expérimentale
- une Assistance technique dans certains volets liés à la Relation entre les résultats des études de l'aléa sismique et le coefficient d'accélération de zone « A » utilisé dans le calcul des efforts sismiques.
- Incorporation de la méthode capacitaire dans le code.



LA GEODESIE SPATIALE ET SA CONTRIBUTION A LA REDUCTION DES CATASTROPHES NATURELLES. CAS DU RISQUE SISMIQUE

Saïd TOUAM, Salem KAHLOUCHE –

Centre des Techniques Spatiales –

Division de Géodésie Spatiale CTS BP. 13 Arzew 31200, Algérie.

RESUME

Les techniques classiques de positionnement ont connu leurs limites ces deux dernières décennies. Elles sont remplacées progressivement par de nouvelles techniques plus évoluées, basées sur l'utilisation de satellites artificiels (SLR, GPS) et de radiosources (VLBI).

La technique GPS (Global Positioning System), de par le champ d'applications géodésiques très vaste qu'elle offre, reste la plus appropriée pour nos besoins vus les délais d'exécution très courts et la fiabilité des résultats.

C'est un système de radiolocalisation par satellite conçu pour permettre le positionnement de tout objet statique ou mobile à la surface ou au voisinage de la terre.

Le Centre des Techniques Spatiales (CTS), grâce à l'infrastructure matérielle de base et aux moyens humains nécessaires dont il dispose, a mené plusieurs applications dont les principales sont :

- Apport du GPS à la surveillance géodynamique et sismologique des zones actives de l'Algérie du Nord par la mise en place du réseau ALGEONET (ALgerian GEOdynamical NETwork)
- et participation au projet TYRGEONET (TYRrhenian GEOdetic NETwork) de surveillance géodynamique de la Méditerranée occidentale.

A- LE SYSTEME DE POSITIONNEMENT NAVSTAR/GPS.

Le NAVSTAR / GPS est un système de navigation spatial indépendant des conditions météorologiques, développé par le DoD pour satisfaire les exigences des Forces Militaires consistant à disposer d'un système qui puisse répondre à des critères majeurs, à savoir la résistance à toute tentative de sabotage physique ou technique et déterminer avec précision leur position, leur vitesse de déplacement et un temps exprimé dans un même système de référence, en tout lieu sur ou près de la Terre.

Le GPS offre d'énormes potentialités dans les applications de la Géodésie et de la Géodynamique tant à l'échelle locale que régionale: l'une des plus importantes applications civiles du GPS est l'établissement de l'IGS.

En outre, il permet un positionnement en mode statique, statique rapide ou cinématique.

Comme tout système de localisation, le GPS se compose de 3 segments: le segment spatial, le segment de contrôle et le segment utilisateur.

Structure du signal GPS: Tous les signaux transmis par le satellite sont dérivés de la fréquence fondamentale f_0 générée par l'oscillateur du satellite.

Tableau 1: Composants du signal GPS.

Composant		Fréquence (MHz)
fréquence fondamentale	f_0	10.23
Porteuse L1	$f_1=154 f_0$	1575.42 ($\lambda_1=19.0$ cm)
Porteuse L2	$f_2=120 f_0$	1227.60 ($\lambda_2=24.4$ cm)
Code P P(t)	f_0	10.23
Code C/A C(t)	$f_0/10$	1.023
Message de Navigation D(t)	$f_0/204600$	50. E-6

Les signaux peuvent être exprimés par:

$$L_1(t) = a_p P(t)D(t) \cos 2\pi(f_1 t) + a_c C(t)D(t) \sin 2\pi(f_1 t)$$

$$L_2(t) = b_p P(t)D(t) \cos 2\pi(f_2 t)$$

avec: a_p, a_c, b_p représentant les amplitudes des signaux.

Contenu du message de navigation GPS: Le message de navigation provient d'un décryptage d'un code classifié comprenant les principales informations suivantes: éphémérides des satellites, données de correction de la propagation atmosphérique, santé du satellite et leurs erreurs d'horloge.

Modes de positionnement par GPS.

Le positionnement par GPS se caractérise par l'existence de deux principaux types de mesures:

- **Les mesures de pseudo-distances** effectuées avec les ondes C/A ou P employées essentiellement pour un positionnement instantané en navigation. Alors, le problème est la difficulté technique à synchroniser les horloges, d'où la précision du procédé à pas mieux que 100 m près en temps réel.
- **Les mesures de phase** réalisées sur L1 et L2 utilisées pour le positionnement différentiel. Ce sont ces mesures qui présentent le plus grand intérêt pour la géodésie. On y procède par l'emploi des différences de phases suivantes:
 - **simple différence:** elle permet d'éliminer l'instabilité liée à l'oscillateur du satellite mais pas l'ambiguïté entre les deux récepteurs.
 - **double différence:** en supposant les fréquences égales pour les deux satellites, cette méthode permet de s'affranchir des décalages d'horloges entre récepteurs et l'ambiguïté de phase est un nombre entier.
 - **triple différence:** elle permet d'éliminer les ambiguïtés entières des phases initiales.

Planification de la mission GPS.

Une mission de géodésie spatiale par GPS, à l'instar de la géodésie classique, doit être soigneusement préparée afin de dégager une méthodologie adéquate de travail tant sur le plan de la qualité que de la durée de la campagne. Dans ce travail, nous nous limiterons aux spécifications de l'application des techniques GPS à la surveillance géodynamique.

La planification d'une campagne GPS s'articule autour de plusieurs étapes nécessaires au bon déroulement du travail.

Toute planification optimale doit tenir compte de plusieurs paramètres essentiels tels que les sites, les configurations des satellites, le nombre et le type de récepteurs à mettre en œuvre et les organismes éventuels à associer.

Avant projet : Il s'agit de mener des tâches préliminaires avant toute sortie sur le terrain et notamment:

- Consulter la carte à l'échelle 1/50000 ou 1/25000 et les photographies aériennes correspondantes où seront implantés les points du réseau de surveillance sismique.
- Consulter la carte géologique de la région pour s'enquérir de la nature du sol.

Lors du choix des sites, il faut tenir compte essentiellement de la facilité d'accès, de l'environnement (éviter les sites à obstacles au delà de 15° à 20° d'élévation ou à proximité des pylônes à haute tension) et la stabilité du futur point.

Prévisions de passage des satellites : C'est une étape qui déterminera la période optimale d'observations dans la journée. Elle est fonction du lieu (φ, λ) et de la date prévue.

L'utilisation du logiciel (exemple, Winprism 2.0), de par le module de planification de la mission 'Mission Planning' et un almanach récent (de moins de 60 jours d'âge) permet, en fonction des paramètres ci-dessus, de fournir au géodésien des indicateurs déterminants pour le choix de l'heure d'observations laquelle est illustrée par une plage de durée d'observations. Durant cette période, les satellites visibles et sélectionnés représentent une constellation caractérisée par une configuration optimale.

Les indicateurs de précision: La précision du positionnement dépend de la géométrie de distribution des satellites et les facteurs de dilution de la précision (**DOP**) sont des paramètres issus de la matrice variance covariance qui permettent de quantifier cette distribution et, par conséquent, de calculer l'écart type σ d'un positionnement comme suit: $\sigma = DOP \cdot \sigma_r$ (σ_r : écart-type d'une observation)

Soit Q_x la matrice de variance covariance telle que:

$$Q_x = (A^T A)^{-1} = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} & \sigma_{xt} \\ \sigma_{yx} & \sigma_y^2 & \sigma_{yz} & \sigma_{yt} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_z^2 & \sigma_{zt} \\ \sigma_{tx} & \sigma_{ty} & \sigma_{tz} & \sigma_t^2 \end{bmatrix}$$

Avec : A la matrice de configuration pour des pseudo-distances sur les quatre (04) satellites.

Les éléments de la matrice des cofacteurs Q_x proviennent des coordonnées X, Y, Z de la station et une composante 'temps' fournie par le récepteur.

A partir des éléments diagonaux de la matrice sont définis les divers indicateurs de précision suivants:

$$\mathbf{GDOP: (Geometric Dilution Of Precision) = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + \sigma_t^2}}$$

C'est un indicateur pour la position et le temps. Il en résulte l'écart type correspondant:

$$\sigma_G = \mathbf{GDOP} \cdot \sigma_r$$

$$\mathbf{PDOP: (Position Dilution Of Precision) = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}}$$

C'est un indicateur pour la position dans les trois dimensions. Il en résulte l'écart type correspondant: $\sigma_p = \mathbf{PDOP} \cdot \sigma_r$

$$\mathbf{HDOP: (Horizontal Dilution Of Precision) = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}}$$

C'est un indicateur pour la position planimétrique. L'écart type correspondant est: $\sigma_h = \mathbf{HDOP} \cdot \sigma_r$

$\mathbf{VDOP: (Vertical Dilution Of Precision) = \sqrt{\sigma_z^2}}$ C'est un indicateur pour la position de la composante verticale. L'écart type correspondant s'exprime par: $\sigma_v = \mathbf{VDOP} \cdot \sigma_r$

$\mathbf{TDOP: (Time Dilution Of Precision) = \sqrt{\sigma_t^2}}$. C'est un indicateur pour temps. Il en résulte l'écart type correspondant: $\sigma_T = \mathbf{TDOP} \cdot \sigma_r$

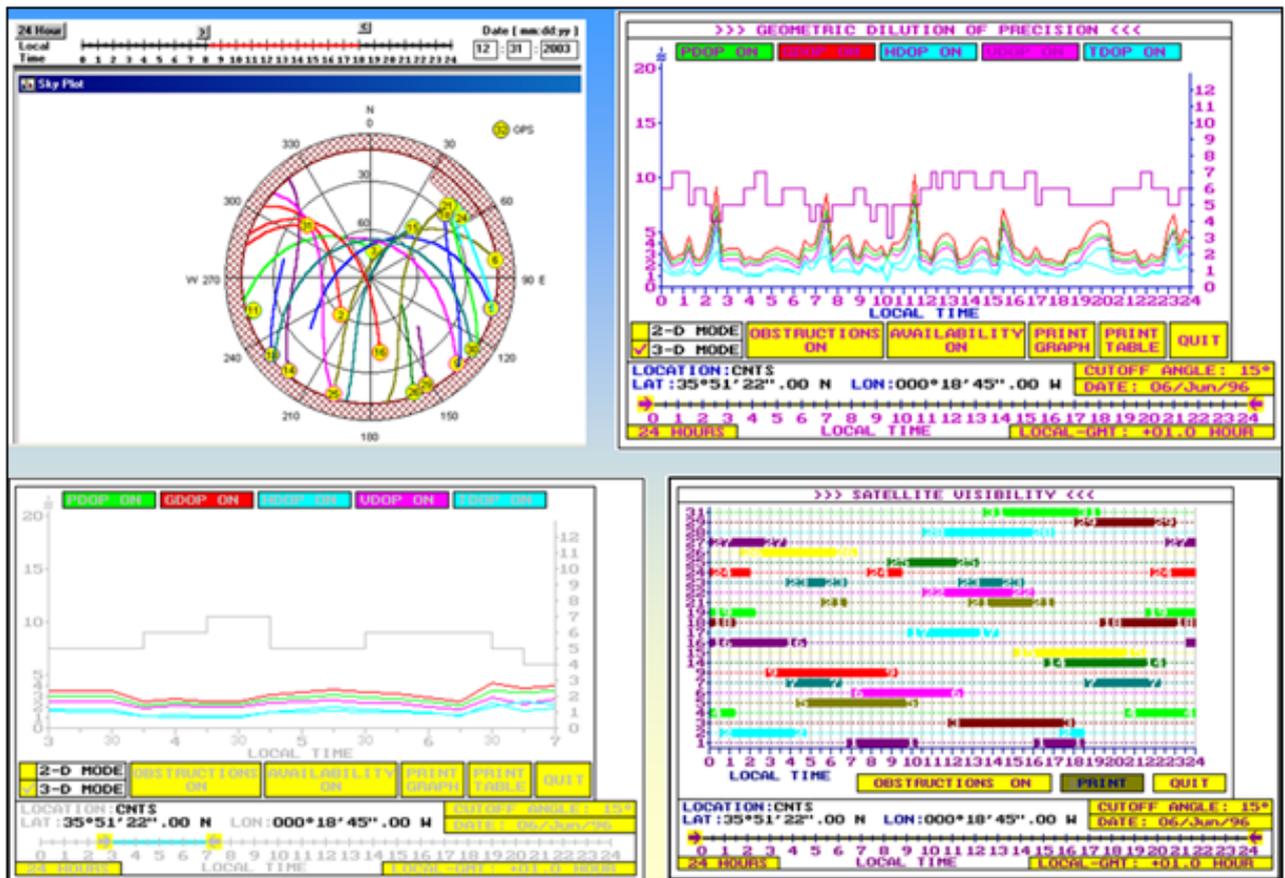


Fig.1: Quelques paramètres pour planifier une mission GPS

Stratégie d’observation du réseau GPS : Après les phases de reconnaissance et de bornage, on procède à la mise en œuvre des récepteurs sur les points de stations.

Evaluation de la durée de la mission : La durée totale de la campagne dépend de la méthode d’observation pour le mode relatif statique. La qualité du réseau des lignes de bases mesurées est tributaire de la durée consacrée aux observations.

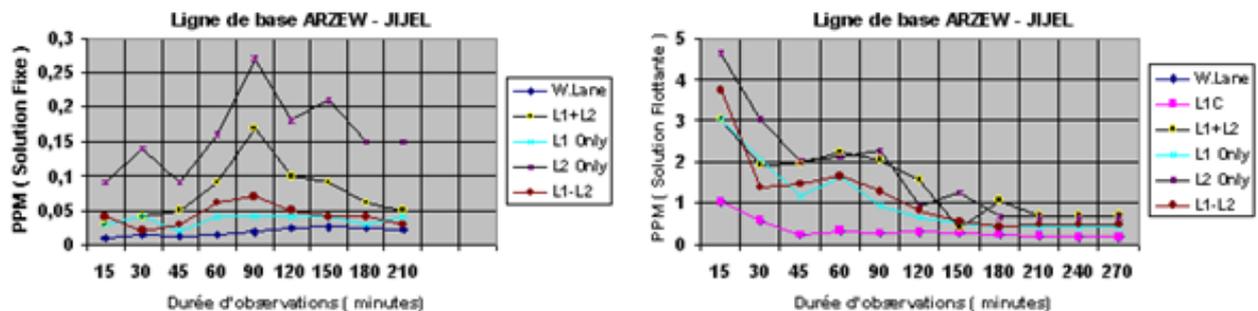


Fig.2: Test à priori pour la ligne de base Arzew-Jijel (540 km), Durée d’observations: 210 mn

Méthodes d'observations : Les observations GPS s'effectuent en même temps sur tous les sites composant le réseau. Il s'agit de stationner les points pendant toute la phase d'observations et enregistrer les données de préférence en temps réel sur un micro-ordinateur portable afin d'assurer la continuité des fichiers. Le mode d'observation du réseau géodynamique est nécessairement le mode relatif statique.

Préparation d'une station GPS : Avant d'entamer les observations proprement dites, il faut exécuter les tâches préliminaires suivantes:

- Configuration du récepteur en procédant à la saisie du nom de la station et de la session, le nom de l'opérateur, l'angle d'élévation minimum des satellites (automatique ou manuel), les numéros de série des récepteurs et de l'antenne utilisée et l'intervalle de temps des enregistrements.
- Mise en station de l'antenne en utilisant son aiguille aimantée et un socle sur pilier pour une meilleure stabilité et en procédant par centrage forcé.

La hauteur d'antenne doit être mesurée avec un maximum de précision et saisie dans le récepteur.

Observations GPS : Les observations destinées à un positionnement relatif statique doivent être effectuées sur au moins 4 satellites constituant une géométrie de distribution optimale de la constellation. Hormis les applications de type temps réel du GPS, on peut définir les principaux types de localisation précise par GPS.

Tableau 2: Comparaison des modes de localisation.

Classification	Réseau (km)	Précision	Durée d'observations
Cinématique	0 à 5	$2 \text{ mm} + 5 \cdot 10^{-6}$	5 Secondes
Statique rapide	0 à 20	$2 \text{ mm} + 2 \cdot 10^{-6}$	< 5 minutes
Statique standard	0 à 100	$2 \text{ mm} + 2 \cdot 10^{-6}$	1 heure
Statique précis	0 à 100	$2 \text{ mm} + 2 \cdot 10^{-7}$	1 à 5 heures
Ultra - précis	Mondial	$2 \text{ mm} + 2 \cdot 10^{-8}$	> 1 jour

B-LE FUTUR SYSTEME DE POSITIONNEMENT GALILEO.

Galileo est le futur système de positionnement par satellites à l'initiative de l'Union Européenne et l'Agence Spatiale Européenne. La nécessité d'un système de positionnement européen répond au besoin d'indépendance face au GPS Américain. En effet en cas de conflit ou mésentente avec les USA, l'accès des européens au signal GPS pourrait être dégradé. Ainsi, l'Europe mise sur un système novateur et performant qui supprimera les restrictions (précision et fiabilité) du GPS. L'un des atouts de Galileo sera d'être entièrement sous contrôle civil et offrira des possibilités de localisation d'une très grande précision.

Galileo propose cinq niveaux de services à accès plus ou moins restreint : un service ouvert et gratuit (OS - Open Service) équivalent à l'actuel SPS du GPS sans SA, un service commercial (CS - Commercial Service), un service public réglementé (PRS - Public Regulated Service) ou service gouvernemental, un service de service de sûreté de la vie (SoL - Safety of Life) , et le cinquième service est le service de recherche et secours (SAR - Search And Rescue); Galileo jouera un rôle important dans le système de recherche et sauvetage MEOSAR (Medium Earth for Search and Rescue). Les satellites Galileo pourront capter les messages d'alerte émis par les balises de détresse des navires, des avions ou de particuliers et les retransmettre aux centres de secours nationaux. Le centre de secours pourra ainsi savoir précisément où s'est produit l'accident. Un satellite Galileo au moins sera visible de n'importe quel point de la terre à tout moment de sorte qu'il sera possible de recevoir les appels de détresse en temps réel.

Les caractéristiques spécifiques de GALILEO apporteront elles-mêmes des améliorations significatives.

1. Premièrement, pour les secteurs urbains ou la disponibilité du système sera améliorée, la conception des signaux de GALILEO améliorera la disponibilité du service (émission de quatre porteuses modulées par plusieurs codes).
2. Deuxièmement, les trois fréquences auront l'avantage d'améliorer la fiabilité et la consistance du système, car il devient possible d'avoir plusieurs combinaisons, qui peuvent à la fois avoir une grande longueur d'onde et réduire l'effet des erreurs atmosphériques et trajet multiple ;
3. En plus, les mesures sur la troisième fréquence donnent des mesures indépendantes en plus ce qui triple le nombre de mesures, et facilite la résolution des ambiguïtés;
4. Et finalement La durée de la session d'observation sera automatiquement raccourcie.

Composante spatiale

La constellation finale prévue est composée de 30 satellites répartis sur trois plans orbitaux inclinés de 56° sur l'équateur. Chaque satellite est placé en orbite quasi circulaire à une altitude de 23 616Km, soit une période de révolution de 14 heures 21 minutes. Cette configuration des satellites permettra ainsi une couverture correcte des régions de haute latitude atteignant 75°. Chaque plan d'orbital comprend neuf satellites régulièrement répartis dont un est gardé en réserve permettant le remplacement d'un satellite défaillant.

Les fréquences émises par les satellites GALILEO sont situées dans la bande L (autour de 1,2 à 1,5 GHz), Ces fréquences qui ont été attribuées par les instances internationales de télécommunication sont partagées avec les systèmes de navigation par satellite GPS et GLONASS.

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

Actuellement, 02 satellites sont en service : GIOVE-A et GIOVA-B lancés respectivement les 28/12/2005 et 27/04/2008.

L'horloge interne de chaque satellite fournit une fréquence fondamentale $f_0=10,23$ MHz. Quatre bandes de fréquences (E2-L1-E1, E6, E5b, et E5a) seront utilisées par les satellites Galileo pour transmettre dix (10) signaux.

Tableau 3 : **Bandes de fréquences Galileo**

Bande de fréquences (MHz)	Signaux émis	Fréquence centrale (MHz)	Longueur d'onde (cm)
E2-L1-E1 1559 -1591	(E2-L1-E1) _A , (E2-L1 E1) _B , (E2-L1-E1) _C	1575.420	19.03
E6 1260 -1300	E6 _A , E6 _{BI} , E6 _{BQ}	1278.750	23.44
E5b 1188 -1215	E5b _I , E5b _Q	1207.140	24.8
E5a 1164 -1215	E5a _I , E5a _Q	1176.450	25.4

TRANSFORMATION ENTRE SYSTEMES GEODESIQUES

Pour de nombreuses activités d'intérêts géodésiques, cartographiques et topographiques les travaux doivent être pratiqués sous le voile d'une référence géodésique conforme et homogène. En Algérie, le système national Nord Sahara 1959 succédant d'anciens systèmes qui ont été utilisés pour des fins géodésiques et cartographiques (Voirol 1875, ED 50 et le canevas astronomique du Sud) présente l'infrastructure sur laquelle s'appuie tous les travaux géodésiques et cartographiques de l'Algérie.

D'après le 1^{er} article de l'arrête ministériel du 22 décembre 1959 (République Française), le canevas Nord Sahara, aujourd'hui système géodésique Nord Sahara, est déduit du système Europe 1950 par la transformation suivante :

$$\lambda_{NS} = \lambda_{ED50} - 0.0004$$

$$\epsilon_{NS} = \epsilon_{ED50} - 0.00484$$

λ_{NS} : Longitude exprimée dans le système Nord Sahara
 ϵ_{NS} : Latitude isométrique exprimée dans le système Nord Sahara
 λ_{ED50} : Longitude exprimée dans le système Europe 1950
 ϵ_{ED50} : Latitude isométrique exprimée dans le système Europe 1950

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

D'après le 2^{ème} article de l'arrête ministériel du 22 décembre 1959 (République Française), le système Nord Sahara est basé sur l'ellipsoïde de Clarke 1880 Anglais dont les paramètres sont :

Demi grand axe (a) : 6378249.145 mètres Demi-petit axe (b) : 6356514.870 mètres

Aplatissement (α) : 1/293.46500 Excentricité (e) : 0.082483399

Outre sa vieillesse, le système géodésique national Nord Sahara connaît de nombreux problèmes, dus essentiellement aux techniques utilisées pour sa réalisation, parmi ces problèmes, nous citons :

1. La mauvaise définition de l'origine de ce système car il est déduit du système ED50
2. La non homogénéité du réseau qui est due à la combinaison entre le réseau du nord et le canevas du sud, issus de deux sources d'observations différentes géodésique et astronomique.
3. La hauteur du géoïde relative à l'ellipsoïde de Clarke 1880A ainsi relative au système Nord Sahara n'est pas connue.
4. La non couverture de la totalité du territoire national.

Aujourd'hui, l'ensemble des réseaux géodésiques nationaux, continentaux et mondiaux sont réalisés par les techniques de positionnement de géodésie spatiale (GPS, GLONASS, GALILEO).

Parmi ces systèmes, le GPS est le plus utilisé actuellement, il offre un champ d'applications très vaste, (établissement et densifications des réseaux,...) et des performances très intéressantes (coût, délais d'exécution, fiabilité, précision). Les coordonnées obtenues après le traitement et l'ajustement des observations GPS sont exprimées en coordonnées tridimensionnelles (latitude, longitude, hauteur ellipsoïdique) dans un système de référence géodésique, géocentrique, tridimensionnel et mondial appelé WGS84 (World Geodetic System 1984) basé sur l'ellipsoïde WGS84 caractérisé par:

Demi grand axe (a) : 6378137.00 m Demi-petit axe (b) : 6356752.3142 m

Aplatissement (α) : 1/298.257223563 Excentricité (e) : 0.0818191980426

L'utilisation du GPS en Algérie est souvent liée à la transformation des coordonnées (λ, φ, h_e) obtenues par GPS en coordonnées nationales locales (λ, φ, H) exprimées par rapport au système national Nord Sahara, avec H l'altitude orthométrique définie par rapport au géoïde. Une transformation se définit par l'opération mathématique consistant à mettre en relation deux systèmes de coordonnées (Ex : WGS84 et Nord Sahara) dont le but est de calculer la position d'un point connu dans un système, dans l'autre système géodésique.

En géodésie il existe plusieurs méthodes et modèles qui permettent le passage d'un système géodésique à un autre ; on peut citer la méthode de transformation à 7 paramètres (3 Rotations, 3 Translations et un facteur d'échelle), lorsque les éléments ou les paramètres de transformation sont connus. Il suffit de les appliquer directement aux coordonnées disponibles ($X_{GPS}, Y_{GPS}, Z_{GPS}$) pour obtenir leurs correspondants dans le deuxième système (X_{NS}, Y_{NS}, Z_{NS}) ; dans d'autre cas, ces paramètres sont inconnus et doivent être déterminés en employant des points connus dans les deux systèmes (appelés points doubles).

A cause du manque d'information sur la hauteur du géoïde relatif à l'ellipsoïde de Clarke 1880A (information fondamentale pour la transformation de l'altitude), les modèles de transformations à 7 paramètres (transformation d'Helmert, Bursa Wolf, Molodensky, Veis)

restent mal adaptés. Afin de résoudre le problème, la transformation des coordonnées GPS en Algérie est divisée en deux parties :

- La transformation des deux composantes (λ, φ) par l'emploi d'une méthode de transformation à sept paramètres, une transformation polynomiale, l'approche des lignes géodésiques,...
- La transformation de la composante verticale (h_e) en altitude orthométrique (H) par la combinaison du nivellement et le GPS (Nivellement par GPS).

C- INTERFEROMETRIE RADAR DIFFERENTIELLE.

L'interférométrie radar différentielle se démarque des autres sources de mesure des déplacements (GPS, réseaux géodésiques conventionnels, mesures de terrain, etc.) par son potentiel à effectuer un échantillonnage très dense d'observations (plusieurs centaines de mesures par kilomètre carré). Seule la technique de mesure des déplacements horizontaux par corrélation d'images peut rivaliser avec une telle couverture spatiale du sol. Toutefois, dans sa mise en œuvre actuelle, cette dernière technique est limitée à la mesure de forts déplacements horizontaux (supérieurs à 50 cm). L'utilisation d'images à plus haute résolution (photos aériennes ou images satellites à haute résolution) devrait permettre d'abaisser cette limite mais en restant au-delà de la précision centimétrique de l'interférométrie radar différentielle.

Choix de la méthode :

Il existe plusieurs méthodes et mises en œuvre pour produire un interférogramme différentiel à partir d'images SAR. Parmi les grandes approches du problème on distingue l'interférométrie différentielle utilisant 3 ou 4 images pour réaliser un interférogramme sans avoir recours à un MNT et l'interférométrie différentielle n'ayant besoin que de deux images et d'un MNT. Rappelons que l'adjectif "différentiel", attribué à la technique, vient du fait qu'elle nécessite la connaissance de la topographie pour soustraire les effets liés au relief qui gênent l'identification de déplacements du sol. Dans la première méthode, l'information sur la topographie est fournie par un interférogramme non différentiel, alors que dans l'autre cas un MNT est utilisé. La deuxième approche permet de s'affranchir des problèmes d'atmosphère ou de décorrélation inhérents à tout interférogramme. Cependant, elle exige un MNT de bonne qualité afin de limiter les erreurs topographiques lorsque la base de l'interférogramme devient trop importante.

Limites de l'Insar:

Le potentiel de l'interférométrie radar est très variable d'une région à l'autre, notamment en fonction des caractéristiques du terrain observé. Il ressort des études effectuées à partir de données radar ERS, que l'interférométrie radar peut fournir des mesures exploitables principalement dans les zones de plaine, car celles-ci sont urbanisées.

Dans les zones fortement urbanisées, comme c'est le cas au centre des grandes villes, la mesure peut être faite avec des interférogrammes couvrant plusieurs années. En dehors de ces zones, il apparaît que la mesure devient plus délicate à partir de 2 ans. Dans les zones montagneuses, la végétation, omniprésente, empêche l'observation. L'utilisation de données issues de radars ayant une longueur d'onde plus grande que les 5,6 cm d'ERS, par exemple JERS (23,4 cm), pourrait partiellement réduire ce problème.

Domaines d'application :

Parmi les différentes techniques géodésiques, l'interférométrie radar différentielle possède des caractéristiques bien spécifiques qui en font son intérêt. Ainsi, cette technique est bien adaptée à l'étude de déformations affectant de grandes surfaces et pouvant avoir une signature complexe avec des variations sur de courtes distances. Pour l'étude des séismes,

l'interférométrie peut s'appliquer à l'analyse des événements de moyennes magnitudes ($M_w = 5$) mais peu profonds ou encore à l'étude en détail de grands événements en fournissant des informations sur les déformations à petite longueur d'onde ayant lieu en champ proche ou lointain.

Pour l'étude des séismes, la principale limitation de la méthode est la perte de cohérence liée soit à la non-conservation de l'état de surface, soit à la présence d'un gradient de déformation trop fort. Ce dernier cas se rencontre notamment lors de grands séismes ayant donné lieu à une rupture de surface : le gradient de déformation augmente en se rapprochant de la faille jusqu'à excéder les limites de la technique.

Comparaison avec le GPS :

Possédant un réseau GPS de surveillance, l'interférométrie, peut jouer le rôle d'interpolateur entre les points GPS, rôle qui prend toute son importance en présence de gradients de déplacement localement élevés ou de discontinuités. Ainsi, l'interférométrie radar permet de tester la pertinence de la répartition spatiale des stations des réseaux géodésiques et de proposer d'améliorer leur déploiement.

Mis à part le réseau de stations GPS permanentes qui enregistrent continûment la déformation, les autres réseaux sont réexaminés lors de campagnes, qui s'effectuent généralement une à deux fois par an. Avec un temps de retour de 35 jours, le satellite ERS possède une répétitivité intermédiaire. Pour les déplacements cosismiques, une répétitivité inférieure serait souhaitable pour mieux faire la part du déplacement cosismique et post-sismique. Toutefois, la fréquence de la mesure permet de distinguer les mouvements inter-sismiques sur plusieurs années des événements ponctuels comme les séismes. De plus, la dynamique des phénomènes tectoniques lents peut être évaluée avec une meilleure précision que les réseaux traditionnels. De ce point de vue, la couverture temporelle de l'interférométrie permet aussi de tester la pertinence de l'intervalle de mesure des réseaux géodésiques existants.

D- ETUDE GEODYNAMIQUE DE LA MEDITERRANEE OCCIDENTALE PAR GPS: PROJET TYRGEONET

La région méditerranéenne est caractérisée par la présence d'une tectonique complexe due essentiellement à la collision entre les plaques Africaine et Eurasienne. Des modèles géodynamiques globaux basés sur des observations géologiques et géophysiques décrivent un processus de collision des deux plaques tectoniques dont la mise en évidence du mouvement par techniques spatiales (VLBI, SLR, GPS) de localisation, nécessite la mise en place de réseaux géodésiques répartis sur les deux plaques tectoniques.

Contexte géodynamique de la Méditerranée:

La Méditerranée occidentale et centrale est entourée de pays caractérisés par des chaînes de montagnes situées sur les plaques Africaine et Européenne: le Rif et l'Atlas au Maghreb, les Alpes, les Pyrénées, les Apennins et la Cordillère Bétique sur la rive septentrionale de la Méditerranée. Elles constituent des déformations produites par la tectonique globale active au sein de la lithosphère continentale.

La lithosphère continentale est le siège de déformations importantes produites sous l'effet de collision continentale. Il est bien connu que les plaques Africaine et Eurasienne sont animées d'un mouvement relatif qui se traduit par un rapprochement croissant d'Ouest en Est à raison d'un demi centimètre par an au niveau d'Alger pour atteindre en moyenne le centimètre au méridien de la Sicile.

Présentation du projet TYRGEONET:

Initialement monté et piloté par l’Institut National de Géophysique (ING) d’Italie (1990) pour l’océanographie et la surveillance géodynamique de la péninsule Italienne, le projet TYRGEONET (TYRrhenian GEOdetic NETwork) a été étendu à plusieurs pays riverains de la Méditerranée: France, Tunisie, Grèce, Albanie, Slovénie, Croatie et Algérie (CTS et INC). Le réseau TYRGEONET (plus de 50 points), observé principalement par GPS, bien que certains sommets soient déterminés par les techniques VLBI et SLR, a pour but essentiel l’étude géodynamique d’une partie de la Méditerranée occidentale.

La participation du CTS de 1995 à 2004, au projet TYRGEONET concerne 14 stations (Alger, Arzew, Cagliari, Lampedusa, Madrid, Matera, Noto et Wetzell) couvrant la région Ouest Méditerranéenne dont le traitement a été effectué en fixant la station de référence Cagliari connue dans le système ITRF.

Traitement des données TYRGEONET:

Dans ce document, nous proposons les résultats des données collectées lors des campagnes d’observations de 1995 et 2004. Elles ont été traitées avec le logiciel Bernese 4.2 et le programme d’analyse statistique NETGPS en incluant les éphémérides précises. Les coordonnées définitives pour chaque campagne ont été obtenues par l’ajustement des multibases GPS quotidiennes. Les principales phases du traitement sont:

- Calcul des lignes de bases observées durant les campagnes 1995 et 2004 (éphémérides précises, angle d’élévation de 15°).
- Compensation des résultats des deux campagnes et analyse des résultats.

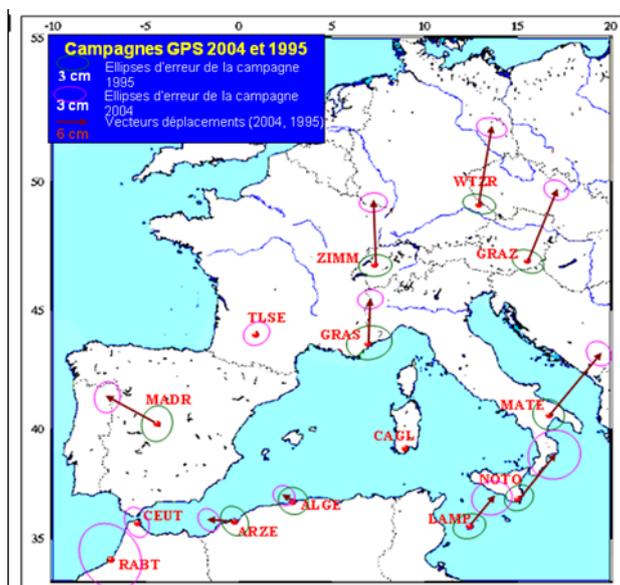


Fig.3 : Entre les deux campagnes d’observations, les variations des coordonnées des stations, les paramètres des ellipses d’erreurs avec un intervalle de confiance de 95%, ainsi que les magnitudes des vecteurs déplacements, ont été calculés avec la station Cagliari fixée (stabilité). Les résultats des deux campagnes sont fournis par la figure ci-contre :

Géodynamique de l'Algérie du Nord par GPS

En Algérie des déformations importantes se produisent au sein de la lithosphère continentale. L'origine de ce comportement mécanique particulier est attribuée au contexte tectonique de collision continentale. Le mouvement relatif convergent de l'Afrique et de l'Europe est de direction approximative Nord-Sud avec une ampleur croissante Est-Ouest au rythme d'environ 1 cm/an. Cette géodynamique régionale doit être affinée pour prendre en compte des activités tectoniques locales nécessitant des études spécifiques détaillées. La tectonique récente compressive la plus significative au sein de la chaîne Tellienne se trouve dans la zone pli-faille d'El Asnam. Des structures compressives comparables sont visibles le long de la chaîne Tellienne du Nord Algérien., particulièrement dans les bassins du Chlef, de la Mitidja, du Hodna et de la structure plissée du Murdjadjo.

Présentation du projet ALGEONET

Le projet ALGEONET bénéficie de l'infrastructure qui résulte de l'extension du réseau de TYRGEONET à l'Algérie du Nord. Il est constitué de 6 stations distribuées entre la côte Méditerranéenne et le Sud des Hauts plateaux. Les stations d'Arzew et d'Alger étant communes aux deux projets TYRGEONET et ALGEONET, les campagnes d'observations GPS ont été menées durant la même période.

Ce projet contribuera à une meilleure compréhension du phénomène géodynamique généré par le bassin Méditerranéen et servira d'appui aux études des failles sismiques.

La campagne d'observations menée du 3 au 10 juin 1998 en collaboration avec l'INCT, a été conduite selon les critères suivants :

- Sessions de 24 h, échantillonnage de 30 s.
- Angle d'élévation minimal de 15°.
- Récepteurs utilisés bifréquences (Ashtech Z-XII3 et Trimble 4000 SSE).



Fig.4: Réseau ALGEONET

Traitement des données: résultats et analyse statistique

Les traitements ont été effectués avec le soutien de l'ING de Rome, dans les mêmes conditions que la campagne TYRGEONET :

- Logiciels utilisés: Bernese 4.2 et NETGPS
- 06 stations ALGEONET: Alger (Fixée), Arzew, Ouargla, Biskra, Naama et Laghouat
- 02 stations du réseau TYRGEONET: (Cagliari, Noto)

Utilisation des éphémérides précises et un angle d'élévation minimal de 20°

Afin élargir le traitement aux zones situées au Sud des Hauts plateaux (zones stables, loin de la frontière des plaques), 02 sites ont été introduits: Tindouf et In-Salah.

Les coordonnées finales des stations sont obtenues par un ajustement à l'aide du logiciel NETGPS en fixant la station d'Alger fixe. Le tableau suivant montre les écarts-types des coordonnées WGS84 compensées de la campagne 1998 et les paramètres des ellipses d'erreurs pour chaque site.

Station	rms ϕ (m)	Rms λ (m)	rms h (m)	Smax (m)	Smin (m)	Az (deg)
Alger	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0
Arzew	0.002	0.002	0.015	0.005	0.005	70
Ouargla	0.003	0.002	0.016	0.007	0.006	126
Biskra	0.004	0.003	0.023	0.009	0.008	88
Naama	0.003	0.004	0.022	0.009	0.008	26
In Salah	0.003	0.002	0.016	0.007	0.005	89
Tindouf	0.003	0.003	0.017	0.009	0.007	39
Laghouat	0.004	0.004	0.020	0.011	0.007	38
Cagliari	0.002	0.002	0.015	0.006	0.005	49
Noto	0.002	0.003	0.015	0.008	0.005	4

Tableau 3: **Ecarts-types et paramètres des ellipses d'erreurs**

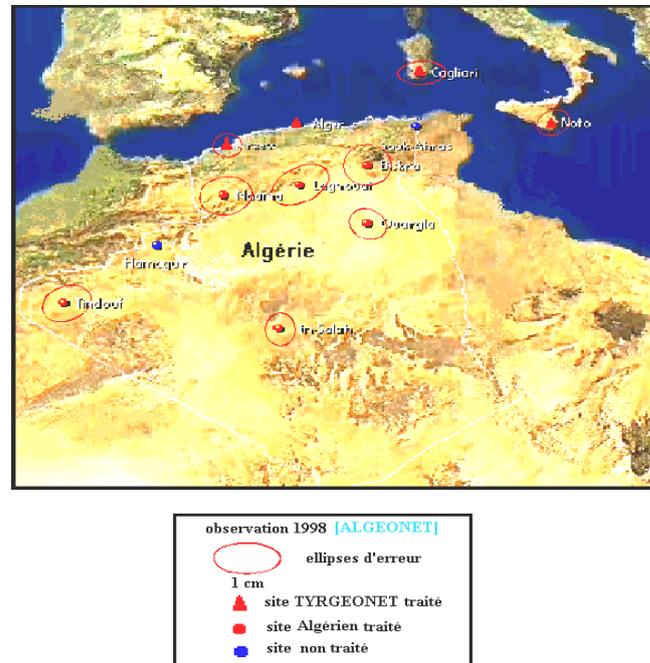


Fig.5: Ellipses d'erreurs du réseau ALGEONET

Le traitement des données GPS a contribué à la détermination de 08 points du réseau avec une précision de 2 mm (Arzew) à 4 mm (Laghouat) et les résultats obtenus confirment les performances de l'utilisation du GPS pour les applications géodynamiques en Algérie. La situation des sites GPS et les résultats obtenus sont présentés par la figure suivante :

Références bibliographiques

- Anzidei M., Baldi P., Casula C., Galvani A., Kahlouche S., Pesci A., Riguzzi F., Touam S., Zanutta A., 1999, *First GPS measurements across the central - western Mediterranean area*. Annali di Geofisica Vol. 42 N°1- ISSN N° 0365-2556 - February 1999.
- Anzidei M. et al. 1995, *Crustal deformation analysis applied to GPS observations in the frame of the TYRGEONET Project.* , XXI IUGG General Assembly, Boulder. 2-14 July 1995.
- Beutler G., et al. - 1996, *Bernese GPS Software V. 4.0* - Astronomical Institute University of Bern.
- Bonnin J., Olivet L., 1986. *Seismic Hazard in Mediterranean Regions*. Kluwer Academic Publishers for Commission of the European Communities.
- Crespi M., 1996. *Demo-Package. Version 1.0. I.T.S. Area Topografia*. Faculta di Ingegneria. Universita di Roma.
- Groten E., Straib R., 1988, *GPS-Techniques Applied to Geodesy and Surveying*,.
- Hofmann Wellenhof B . et al. 1993, *GPS : Theory and Practice* Second Edition Springer Verlag

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

- Kahlouche S., Touam S., Ghezali B., Gourine B., Mouzaia H., Abtout A., 1999, *Geodynamical study of the north of Algeria by GPS: the Algerian geodynamical network*. Symposium G5 - Geodynamics IUGG General Assembly; Birmingham July 1999.
- Kahlouche S., Zeggai A., Ayouaz A., 1998, *Positionnement temps réel par GPS différentiel en Méditerranée occidentale*. Journées Nationales d'Études sur les Sciences Marines - Tamentefoust- Mai 1998.
- Kahlouche S., Touam S., Anzidei M., 1998, *Integration of GPS algerian sites in west mediterranean geodynamical studies - case of TYRGEONET project*, 1998, in 'Geodesy on the move' - International Association of Geodesy Symposia Vol 119 [pp 425-430]-ISBN 3-540-64605 - Springer Verlag Editor.
- Leick A, 1990.: *GPS satellite surveying*.
- Meghraoui M., 1988. *Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie. Paléosismologie, Tectonique. Active et Synthèse sismotectonique*. Thèse de Doctorat d'état. Université de Paris-Sud. Orsay /France.
- Meghraoui M., Doumaz F., 1996. *Earthquake-induced flooding and paleoseismicity of the El Asnam, Algeria, fault-related fold*. Journal of Geophysical Research. Vol. 101.
- Rebaï N., 1992. *Traitement de la campagne européenne de VLBI mobile 1989. Contribution à un nouveau réseau géodésique de surveillance géodynamique Europe-Afrique au niveau de la Méditerranée occidentale*. Thèse de Doctorat, Observatoire de Paris.
- Touam S., 1997. *Contribution du GPS à l'étude géodynamique de la Méditerranée Occidentale*. Thèse de Magister, CNTS.

I. RISQUES GEOLOGIQUES

2- Glissements de Terrain

EVALUATION DU RISQUE DES GLISSEMENTS DE TERRAIN EN MILIEU URBAIN APPLIQUEE A LA VILLE DE CONSTANTINE : LES CAUSES ET LES CONSEQUENCES

BENAZZOUZ Mohamed Tahar*

BOUREBOUNE L.**

**Université Mentouri Constantine*

***université Larbi Ben M'Hidi Oum el Bouagui*

RESUME

Le noyau initial de la ville de Constantine est construit sur un rocher où se sont succédées plusieurs civilisations. L'extension au cours de la période coloniale française a nécessité l'aménagement de terrains argileux souvent instables dont la réactivation actuelle affecte l'ensemble des versants de la partie ouest de la ville évaluée à plus de 100 hectares.

De nombreux sites affectés par ces glissements affichent une grande vulnérabilité pour une population de 100 000 habitants, mais aussi pas moins de 15 000 constructions menacées de ruines : par l'ampleur des dommages spectaculaires aux constructions, la ville de Constantine offre toutes les conditions de potentiel élevé de glissements catastrophiques unique dans le monde.

Les héritages géologiques, (failles actives, séismes fréquents), voire historiques, urbanisation récente sur des sites instables, influencent fortement le déclenchement des glissements dans la ville de Constantine.

La prise en charge des glissements de terrain à Constantine traduit une certaine gestion au coup par coup et marque l'absence d'une politique de traitement global du phénomène à long terme. Le constat actuel des glissements laisse entrevoir deux types d'alternative :

- Le traitement spécifique d'un glissement et à quel type de priorité répondre ?
- Le déplacement ou transfert des populations des sites affectés accompagné par la destruction et l'abandon des constructions endommagées, décision difficile et anti sociale car cela suppose le déracinement de ces populations.

La solution de la nouvelle ville d'Ali Mendjli est adoptée et la poursuite des transferts de population des quartiers affectés par les glissements constitue probablement une forme de gestion des risques naturels dans la ville de Constantine.

Mots clés : *glissement de terrain, gestion des risques naturels, vulnérabilité, Constantine*

LES MOUVEMENTS DE TERRAIN : DEFINITIONS

Les glissements de terrain ne sont qu'un aspect des différentes déformations à la surface de la terre, et ne représentent pas toute la variété des aléas géomorphologiques et des mouvements gravitaires.

Nous adopterons le terme « mouvements de terrain » dans ce rapport pour désigner l'ensemble des déformations du sol et du sous sol à la surface de la terre.

Si, pour certains phénomènes, comme les séismes, l'Homme n'est pas responsable de leur déclenchement, pour d'autres et particulièrement pour les mouvements de terrain, il est pour une part importante responsable de leur déclenchement ou de leur aggravation.

Par ailleurs, l'Homme a une large part de responsabilité dans l'importance des conséquences directes ou indirectes de ces phénomènes dans la mesure où il a maintenu et développé des implantations et activités dans des secteurs connus à risques.

Les « risques naturels majeurs » ne sont en fait, que la combinaison d'un aléa (le phénomène naturel) et d'une vulnérabilité liée à la présence humaine (personnes, habitations, activités économiques, infrastructures etc..).

Ainsi, le nombre de victimes et le coût des dommages peuvent être élevés selon les circonstances et en fonction de l'intensité, de la soudaineté et de la durée du phénomène.

D'une grande diversité, les mouvements de terrain se rencontrent principalement en zone de montagne, (instabilité de versant et de falaises) mais aussi en plaine et en plateaux.

Des mouvements de terrain sont responsables de dommages et de préjudices importants et coûteux. Ils peuvent être à l'origine d'enjeux socio-économiques et humains qui dépassent largement les possibilités de prévention des collectivités concernées par leurs effets directs et surtout indirects (conséquences en chaîne).

Les mouvements de terrain sont souvent induits par les séismes ou déclenchés par de fortes précipitations.

Les catastrophes provoquées par les mouvements de terrain n'atteignent pas l'ampleur des inondations, des cyclones ou des séismes, dans la mesure où les mouvements de terrain sont très localisés.

Le nombre de victimes est ainsi plus faible que pour les autres aléas.

Les bilans les plus couramment avancés font état de 800 à 1000 morts par an dans le monde.

Les coûts des mouvements de terrain aux Etats Unis , au Japon, dans les régions alpines (Autriche, Suisse, France, Italie) et en Inde sont sensiblement similaires (1 à 5 Milliards d'Euro par an) bien qu'il soit probable que les coûts soient plus élevés au Japon.

La classification des mouvements de terrain

Les formes et l'ampleur des mouvements de terrain sont très diverses en raison de la multiplicité des mécanismes d'initiation et d'évolution (érosion, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique,...) , liés à :

- la topographie (pente du versant, dénivelée, etc..)
- à la lithologie (caractéristiques physiques et mécaniques et la sensibilité des matériaux solide, plastique, visqueux et liquide),
- à la structure géologique (pendage, fracturation , superposition des couches..) aux nappes aquifères ,
- à la teneur en eau, etc.

Les mouvements de terrain sont liés à un mouvement gravitaire de masses de terrain déstabilisés sous l'effet de sollicitations naturelles (fonte de neige, pluviométrie anormalement forte, secousses sismiques, diminution de butée par érosion de la mer,) ou anthropiques(terrassement, vibration, déboisement, exploitation des matériaux ou de nappes aquifères.

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

Toutes les classifications se basent sur l'association de plusieurs informations :
Les types de mouvements et types de matériel auxquels s'ajoutent des informations sur l'activité et la vitesse des déplacements.

1- les types de mouvement (mécanismes)

cinq types de mouvements sont distingués (chute, basculement, glissement, extension latérale, écoulement. Ces cinq types de mouvements peuvent se combiner ou se succéder pour former un 6^{ème} type : les mouvements dits « complexes et composites ».

chute (de bloc, de pierre, de débris , de sol,) , écroulement rocheux

- basculement
- glissement rotationnel
- déplacement latéralement
- glissement complexe et composite

2- les types d'activité

- l'activité d'un mouvement de terrain peut être regroupée sous trois aspects :
- l'état d'activité, dans lequel se trouve le mouvement de terrain : *actif, réactivé, inactif, stabilisé, ancien ou fossile* .
- la répartition de l'activité qui décrit la direction et le sens du déplacement : *progressif, bidirectionnel, régressif, limité, en mouvement , en élargissement latéral ;*
- la morphologie : *simple, complexe, composite, emboîté, multiple*.

Il est très important de décrire cette activité, pour pouvoir définir les rythmes, les potentialités d'évolution et dans l'objectif d'une prévision spatiale et temporelle de ces phénomènes.

3 – vitesse de déplacement

Les vitesses de déplacement peuvent être estimées ou mesurées de différentes manières, pour chacune de ces **sept classes de vitesse**, des types de réaction et des impacts significatifs en termes de vies humaines ou de dégâts aux constructions sont proposés.

Classe	Description	Vitesse
1	extrêmement lente	moins de 16 mm / an
2	Très lente	de 1,6 m / an à 16 mm /an
3	lente	de 13 m/ mois à 1,6 m /an
4	Modérée	de 1,8 m / h à 13 m / mois
5	Rapide	de 3 m / mn à 1,8 m / h
6	Très rapide	de 5 m / s à 3 m / min
7	Extrêmement rapide	plus de 5 m / seconde

Classe 1 : les mouvements sont imperceptibles sans recours à des instruments de mesures très précis, pas de dommages aux structures construites.

Classe 2 : quelques structures permanentes sont sans dommages ou si elles sont fissurées elles peuvent être réparées.

Classe 3 : routes et structures insensibles peuvent être conservées avec de fréquents et lourds travaux de maintenance si les mouvements totaux ne sont pas trop grands pendant la phase d'accélération.

Classe 4 : les structures résistantes peuvent être maintenues en état si elles sont localisées à une courte distance du pied de la masse déplacée ; les structures sur la masse déplacée sont extrêmement endommagées.

Classe 5 : la fuite et l'évacuation sont possibles ; structures construites et aménagements sont détruits par les masses déplacées.

Classe 6 : quelques personnes sont tuées en raison des trop grandes vitesses qui ne permettent pas à toute les personnes de s'échapper ; destruction majeure.

Classe 7 : catastrophe majeure ; les constructions exposées sont totalement détruites et de nombreuses personnes sont tués par l'impact des matériaux déplacés ou par dislocation des masses déplacées.

4- Classification pour l'aléa et le risque

Quand on considère l'aléa ou le risque, il est important de considérer la vitesse de déplacement comme critère de classification.

En effet, la vitesse de déplacement intervient directement dans l'appréciation du niveau de vulnérabilité.

Elle augmente avec la vitesse car un mouvement extrêmement rapide, quelque soit son volume entraîne un plus grand nombre de morts ou de dégâts qu'un mouvement lent.

Ainsi selon la vitesse de déplacement deux ensembles peuvent être distingués :

les mouvements lents pour lesquels la déformation est progressive avec ou sans rupture, mais en principe sans accélération brutale. Ces mouvements peuvent être surveillés et contrôlés et ne menacent pas directement la sécurité des personnes. Quant aux mouvements rapides, ils peuvent comporter des accélérations brutales ; ils sont scindés en deux groupes selon le mode de propagation des matériaux en masse ou à l'état remanié.

les mouvements lents, on distingue :

- le tassement par consolidation des terrains compressibles
- le retrait – gonflement de formations argileuses en fonction de la teneur en eau
- la solifluxion de matériaux plastiques sur faible pente.
- L'affaissement ou subsidence, déformation lente en surface avec ou sans fractures due à l'évolution de cavités naturelles ou artificielles (carrières souterraines, ou mines), des dépressions circulaires ou ovales apparaissent en surface.
- Les glissements rotationnels, qui correspondent au déplacement en masse, le long d'une surface de rupture circulaire, curviligne, plane ou complexe, de sols cohérents (marnes ou argiles).

Les mouvements rapides et brutaux,

On distingue deux sous groupes selon le mode de propagation des matériaux, en masse ou à l'état remanié :

Le premier groupe comprend :

- Les effondrements qui résultent de la rupture brutale de voûtes , de cavités souterraines naturelles ou artificielles.
- Les chutes de pierres ou de blocs provenant de l'évolution mécanique de falaises ou d'escarpements rocheux très fracturés.
- Les éboulements ou écroulements s de pans de falaises ou d'escarpement rocheux selon des plans de discontinuité préexistants.

Le second groupe comprend :

- Les laves torrentielles qui résultent du transport de matériaux en coulées visqueuses ou fluides dans le lit de torrent de montagne.
- Les coulées boueuses qui proviennent de l'évolution du front des glissements. Leur mode de propagation est intermédiaire entre le déplacement en masse et le transport fluide ou visqueux.

LA SURVEILLANCE DES MOUVEMENTS DE TERRAIN

Les sites instables dans le monde sont instrumentés par des techniques de surveillance choisies en fonction des précisions recherchées selon des dispositifs adaptés à l'intensité des phénomènes considérés (chutes de blocs, écroulements de falaises, coulées, glissements) et aux risques induits.

La caractérisation cinématique des mouvements de terrain impose des mesures de déformation de surface et en profondeur selon un *large spectre spatial*.

Sur le plan temporel, la géométrie du corps de la masse en mouvement peut évoluer sur plusieurs dizaines d'années, les champs de vitesse (verticaux et latéraux) évoluent selon les rythmes climatiques saisonniers et les déformations ou ruptures paroxysmiques se produisent souvent instantanément en fonction de conditions atmosphériques exceptionnelles et de l'évolution et préparation du matériau.

Ces ruptures sont souvent associées à des indices précurseurs.

Il est important d'insister sur le choix des techniques adaptées et leur complémentarité éventuelle.

Il faut distinguer les mesures au sol, celles établies à partir d'imagerie optique aérienne et spatiale et enfin celles élaborées à partir du traitement du signal radar.

Il est préférable de les utiliser de manière combinée pour les valider mutuellement et ainsi améliorer la compréhension des mécanismes en jeu.

Les résolutions spatiales des capteurs varient du centimètre à la dizaine de mètres permettant d'étudier alors les hétérogénéités spatiales de la déformation et ses relations avec le mouvement d'ensemble du massif.

Chaque échelle de temps nécessite des capteurs spécifiques caractérisée par une répétitivité et une date de début d'acquisition variables.

La cartographie topo- morphologique

Le principe consiste sur le terrain à dessiner les formes, limites remarquables et indices d'instabilité et à les repérer par des points topographiques numérotés et levés par Global Positionning System (GPS) .

Si le nombre de satellites reçu est suffisant, le GPS est particulièrement adapté en zone de relief marqué ou avec de nombreux obstacles.

Ce type de cartographie à partir de levés topo-morphologiques terrestres est très précis (résolution de 1 mètre et précision inférieure à 5 centimètres).

Imagerie spatiale : Radar

L'interférométrie radar utilisant les données SAR (*synthetic-aperture radar*) de satellites comme ERS - 1 et 2 ou encore RADARSAT – 1 peut permettre de réaliser un suivi temporel grâce aux images prises à des intervalles répétés d'une vingtaine de jours et d'obtenir des champs de déplacement à des précisions de quelques millimètres.

ETUDE DE CAS : LES GLISSEMENTS DE TERRAIN DANS LA VILLE DE CONSTANTINE

PREAMBULE

La problématique des glissements de terrain dans la ville de Constantine met en évidence le nombre élevé des sites d'instabilité qui se manifestent à travers de nombreux quartiers de la ville densément peuplés. Il s'agit de glissements anciens qui sont souvent réactivés ; le problème s'inscrit dans une double dimension, aussi bien spatiale que temporelle ; il s'agit de situer d'abord les glissements de terrain dans le temps, c'est-à-dire, est ce que les glissements de terrain sont contemporains de l'urbanisation de la ville, ou sont ils antécédents à la construction de la ville ?

D'autre part, est ce que les glissements de terrain se manifestent sur les mêmes sites, avec des conditions de site favorables ?

Les questions ainsi posées, la recherche s'articulera autour des étapes suivantes, à savoir :

- **Le contexte des glissements de terrain** : des glissements récurrents aux conséquences négatives sur le développement de la ville de Constantine, comment alors expliquer les facteurs de l'instabilité ?
- **La méthode: l'exploitation des temps historiques**, l'identification des différentes phases de l'évolution de l'urbanisation du site de la ville face à la poussée démographique
- **Les solutions** : face à ces risques, comment était menée la gestion des risques naturels dans la ville de Constantine et quelles sont les solutions adoptées au cours des dernières années ?

I - LES FACTEURS DE L'INSTABILITE DANS LA VILLE DE CONSTANTINE

1-1 - L'évolution tectonique et les effets d'une tectonique active à Constantine

Les effets d'une néotectonique active : les indices de rejeu de failles à travers la région de Constantine sont nombreux à l'Est de la ville où le Quaternaire ancien à calcaires lacustres se trouve à des altitudes différentes : 630 m à Békeira, 785 m à Sidi M'Cid, 675 m à Sidi Mabrouk. Ce décalage d'altitude traduit en fait, l'existence d'un rejeu de failles qui aboutit à l'émergence en horst du rocher de Constantine avec une faille particulièrement active orientée Ouest-Est limitant le rocher au Nord .

L'activité sismique est assez conséquente à Constantine, puisque l'exploitation de la sismicité historique prouve que la région a subi les effets de plusieurs chocs sismiques :

Le 4 Août 1908 à 2h 11,

Le 6 Août 1947 à 9 h 46 ,

Le 27 Octobre 1985 à 20 h 35 (Ms = 6.0)

Conséquences sur la stabilité actuelle des versants : la disposition particulière des formations géologiques à Constantine multiplie et met en évidence des discontinuités majeures sous forme de discordances ou de contacts anormaux qui accentuent l'instabilité des versants favorisée par la présence d'un binôme lithologique couche dure reposant directement sur une couche tendre ; ainsi, on trouve les calcaires durs du crétacé reposant directement sur les marnes noires telliennes, les calcaires lacustres sur les argiles, des niveaux conglomératiques mio-pliocène reposant sur des argiles ou des sables.

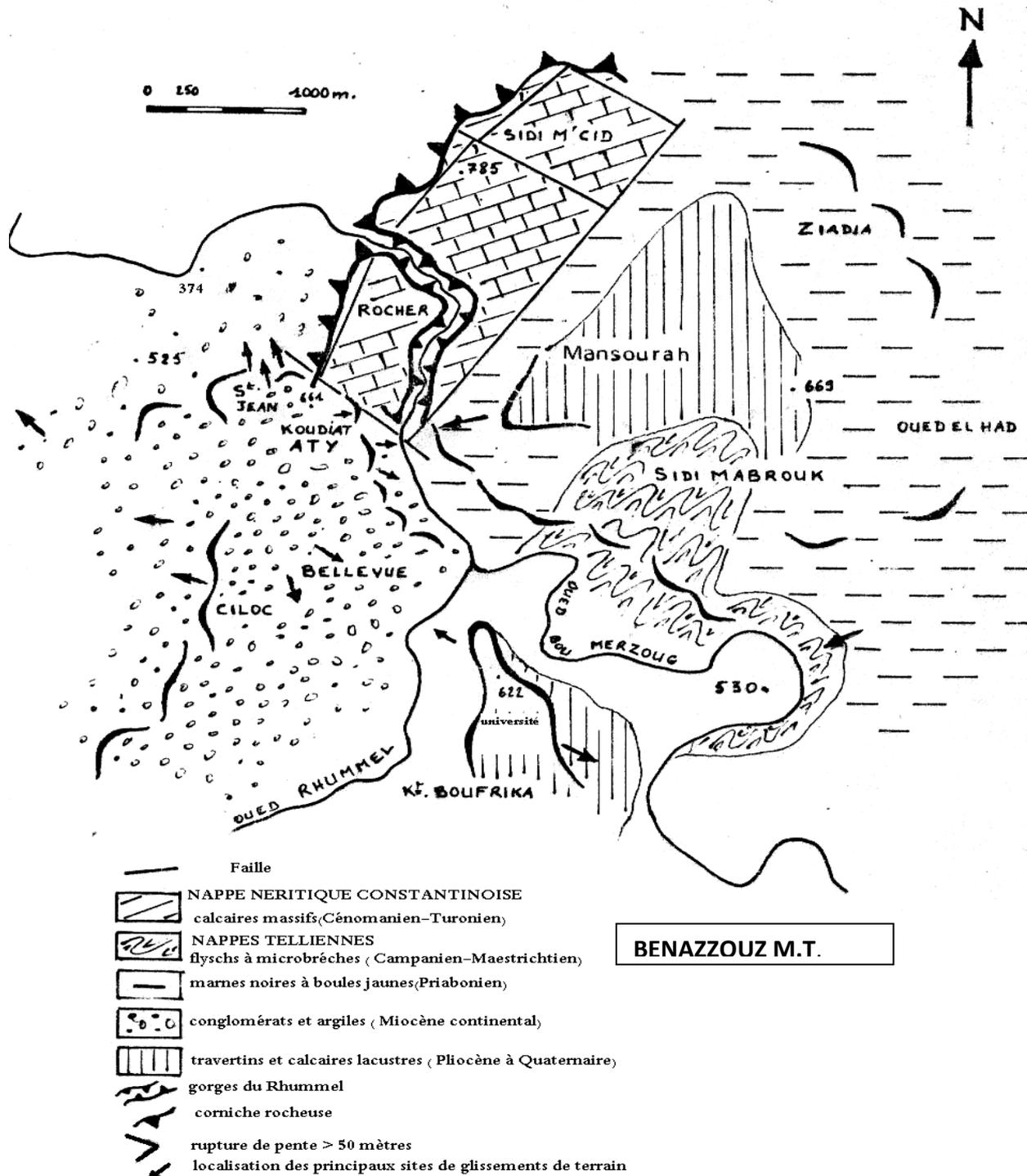


Fig.1 : carte géologique simplifiée de Constantine

1-2- les caractéristiques géomorphologiques des glissements de terrain à

Constantine et les enjeux

Les glissements de terrain à Constantine sont pour la plupart anciens et sont réactivés aujourd'hui à la suite des différents programmes d'urbanisme.

Les zones affectées se répartissent dans les parties Sud , Nord et Ouest de la ville et à l'Est en contrebas du plateau du Mansourah.

1- Les types des glissements

L'examen sur le terrain montre qu'il s'agit de glissements non circulaires, traduit en fait par la nature hétérogène des formations engagées dans les quartiers Nord et Ouest, Kitouni-Belouizded ; souvent on trouve des escarpements de glissements de terrains verticaux qui sont développés dans d'épaisses couches de conglomérats mio-pliocène et indiquent une surface de glissement bilinéaire importante sur le site du Bardo et celui d'Aouinet el Foul.

Vitesse du mouvement : les glissements de terrain se manifestent à Constantine en un mouvement lent, de l'ordre de quelques centimètres par an et les dommages subis aux constructions ne reflètent que le résultat de déplacements cumulés de plusieurs années.

Les formations géologiques actives : la principale surface de rupture de la plupart des glissements de Constantine engage une argile calcareuse moyennement à hautement plastique ou des niveaux riches en argile dans les séries du Mio-pliocène continental (sites St Jean, Ciloc) ; tandis que le glissement du pont Sidi Rached implique dans sa culée Est des marnes grises de la nappe tellienne fortement fissurées.

L'impact des eaux souterraines : l'eau joue un rôle prépondérant dans les glissements de terrain de Constantine ; de nombreuses sources sont associées à des glissements, et la nature hétérogène des séries du Mio-Pliocène continental favorise la formation de nappes phréatiques perchées rencontrées en plusieurs sites lors de l'exécution de sondages.

II - L'INTERET DE LA RECONSTITUTION DU SITE ORIGINEL DE LA VILLE DE CONSTANTINE

Le noyau initial est centré sur le rocher calcaire (fig.1, fig. 2) qui portait la ville arabe. Les différentes extensions coloniales se sont reportées à l'extérieur du rocher, sur les sommets des collines environnantes d'abord, ensuite sur les pentes.

La recherche de la reconstitution du site originel de la ville de Constantine nous a permis de consulter de nombreux documents et plans de l'époque qui nous permettent de retracer l'évolution de l'urbanisation et de l'extension de la ville à l'époque coloniale.

Nous pouvons résumer les phases de l'urbanisation de la ville coloniale au-delà du rocher portant la ville ancienne ou arabe.



Fig 2 : Constantine en 1845 , limitée au rocher

1873 : les extensions urbaines sont exécutées sur les pentes du Koudiat Aty avec modification de la géométrie des talus, et on note la *coalescence progressive des quartiers* ; la construction s'est faite en de petits groupes de maisons qui vont se rejoindre de façon à occuper l'ensemble du versant.



Fig 3 : les extensions de Constantine vers 1895

- **1900** : on décide d'exécuter le projet d'urbanisation du Koudiat Aty, (*A.C.liasse n°201*), la décision est prise de sortir de la ville arabe et de réaliser la ville européenne face au noyau urbain originel. Le projet d'urbanisation de la ville européenne prévoyait le **dérasement complet** de la Koudiat ; il consiste finalement en un **décapement** qui libère, en 1905 un plateau de **6 ha**, (*A.C.liasse n°197*).
- **1920** : la poussée urbaine se poursuit vers l'Ouest par la construction des cités ouvrières à Bellevue;

■ **1962** : poursuite de l'urbanisation sur les versants du Rhummel- Bou-Merzoug.

L'urbanisation de ces reliefs ne s'est pas réalisée sans pour autant révéler des problèmes de stabilité de ces versants. En effet, lors des travaux, des glissements de terrain et affaissements localisés sont déjà signalés au début du siècle (archives de la direction des Travaux Publics, Constantine). Par ailleurs, l'analyse des documents photographiques et cartographiques anciens du début du siècle (archives de la Wilaya de Constantine) montrent clairement la présence d'anciens glissements de terrain qui affectent surtout les versants Nord et Sud de la Koudiat Aty. Les sites d'instabilité actuelle correspondent parfaitement aux anciens glissements de terrain, en particulier sur les sites du Bardo, de Saint Jean (Belouizded-Kitouni), le versant dominant le pont de Sidi Rached, et l'Université des Sciences située sur la vallée de l'oued Bou Merzoug.

Les séries de photographies aériennes les plus anciennes disponibles (INC, Alger, 1934) confirment bien la présence de glissements de terrain anciens :

- dans l'axe concave du méandre de l'oued Bou Merzoug au lieu dit «*chabet er rassas*» sur lequel sera construite l'Université des Sciences.
 - A l'entrée des gorges du Rhumel, le site du Bardo en contrebas de l'Hotel Panoramic
- Ces difficultés de l'urbanisation de la ville de Constantine qui connaît de gros problèmes d'instabilité dans différents sites, sont amplifiées par une poussée démographique importante en ces temps.

La population de Constantine a doublé en 12 ans, elle est passée de 143 330 habitants en 1954 à 245 620 habitants en 1966;

D'autre part, en 1958, un déficit de 100 000 logements a été enregistré

Face à cette croissance urbaine on assiste à la poursuite de l'urbanisation sur des sites instables pendant la période coloniale et aussi après l'indépendance.

On assiste actuellement à l'urbanisation des fonds de vallées et des pentes escarpées inscrites dans les conglomérats du Miocène continental à forte instabilité à l'ouest de la ville sur le site de Boussouf.

III - LA MENACE SUR LA VILLE DE CONSTANTINE ET LES ENJEUX

Pour caractériser la vulnérabilité de la ville de Constantine, trois paramètres nous permettent d'apprécier la gravité de cette menace :

- Une population de **100 000 habitants** vit sur les sites les plus instables à fort risque de glissement dont certaines zones sont complètement détruites par des glissements
 - **15 000 constructions** sont directement menacées de ruines et d'effondrement et dont une bonne partie se trouve fortement endommagée,
 - la surface totale affectée par les glissements de terrain est évaluée à **100 hectares**
- Le versant marneux du plateau du Mansourah constitué par des marnes noires telliennes qui domine le pont de Sidi Rached est parsemé de pans de travertins provenant de la corniche sous l'action de glissements massifs.
 - Le versant Nord de la Koudiat Aty, s'appuyant sur la base de la corniche calcaire, porte les sites instables des quartiers d'Aouinet el Foul –Kaidi et de Saint Jean.

Quelles conséquences peut-on dégager de cette situation dangereuse et préoccupante à plus d'un titre ?

Il est clair que l'extension urbaine coloniale s'est réalisée souvent sur des terrains instables en dépit de nombreux avertissements signalés à l'époque, par les Ingénieurs dans les rapports administratifs (archives des Travaux Publics).

La prise en compte de ces glissements de terrain ne s'est pas faite de façon systématique, quelques travaux de reboisement ont pu être réalisés (forêt de la Légion d'Honneur), mais restent insuffisants face à la gravité des risques d'instabilité à Constantine.

On peut en conclure que le phénomène des glissements de terrain à Constantine est ancien et que ses différentes manifestations aujourd'hui, prennent l'ampleur de catastrophes à cause de la forte densité de l'habitat et surtout à cause d'une forte concentration de la population qui y est menacée directement.

1- Un cas de glissement complexe : un ouvrage stratégique mais menacé d'effondrement imminent : le Glissement du pont de Sidi Rached

L'ancrage du pont bute directement sur la butée du glissement qui affecte le versant du plateau du Mansourah ; les caractéristiques de ce glissement se traduisent par :

- une surface instable évaluée à 300 000 m²
 - un volume des terrains instables estimé à plus de 6 millions de m³
 - deux plans de ruptures identifiées à des profondeurs variant de 13 à 30 mètres
- L'analyse des archives de la wilaya concernant le pont Sidi Rached indiquent l'apparition d'une *déstabilisation de l'ancrage du pont depuis l'année 1909*

L'impact des glissements de terrain sur les ponts s'exprime par la poussée en pied de glissement qui a fragilisé la 1^{ère} arche du pont Sidi Rached,

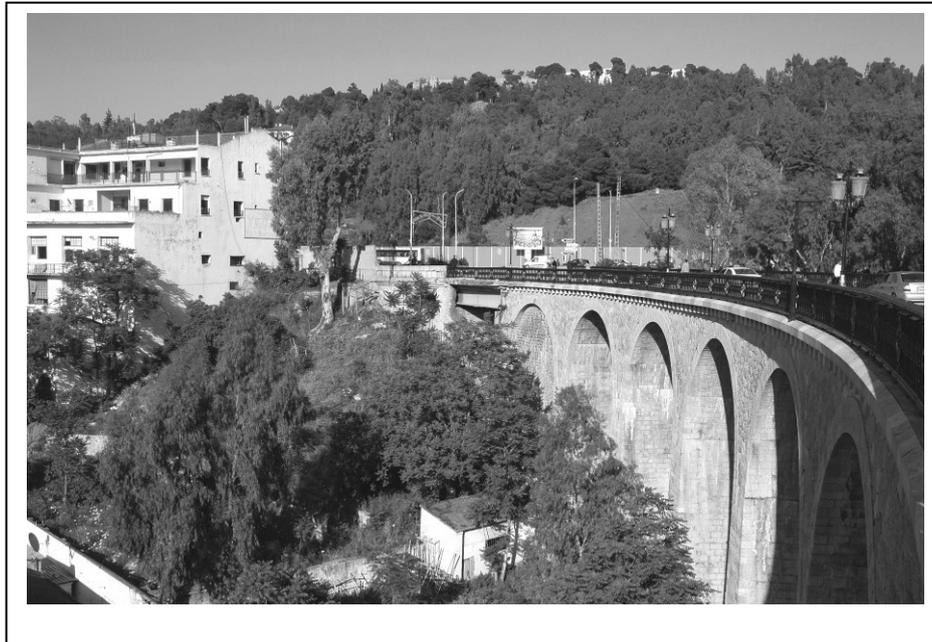


Fig 4 : le pont de Sidi Rached : le confortement de la 1^{ère} arche par un rail en acier

2 - Les solutions techniques de confortement du pont de Sidi Rached

La sauvegarde du pont de Sidi Rached offre deux alternatives:

- La première solution consiste à arrêter totalement les déplacements au niveau de la culée ou les dévier: en créant un point dur qui s'oppose aux forces de l'amont : les résultats n'offrent aucune garantie d'absence de déplacements à long terme
- Quant à la deuxième alternative, elle permet d'accepter les mouvements et adapter un dispositif d'appuis coulissants pendant une durée longue (15 ans) pour la dernière travée du pont, avec des galeries drainantes à l'amont du pont, et c'est la solution retenue par les Autorités de la wilaya.

IV - LA GESTION DES RISQUES NATURELS A CONSTANTINE ET LES PERSPECTIVES DE SOLUTIONS

Pendant longtemps, la gestion des risques naturels à Constantine, consistait en une prise en charge des familles sinistrées qui étaient relogées provisoirement dans des cités de transit installées pour la circonstance à la périphérie de la ville, sur les versants d'El Ménia. On se rappelle bien de la série de hangars en tôles ondulées visibles à la montée d'El Ménia.

Au début, la gestion des risques passait par la réalisation de centres de transit permettaient le transfert des populations dans des cités de transits installés à la périphérie de la ville

Par la suite, et devant l'ampleur des problèmes générés par les dégâts aux constructions, la solution de la ville nouvelle commence à s'imposer sur le champ politique local avec la création d'une ville nouvelle sur le plateau d'Ain El Bey situé à une dizaine de kilomètres au Sud de la ville, avec les caractéristiques suivantes :

1 500 Ha, 50 000 logements et 300 000 habitants prévus

Le transfert de population, suppose la démolition des constructions les plus affectées, mais aussi la dédensification du tissu urbain

Toutes solutions passent par une étude intégrée des glissements de terrain à Constantine qui s'articule autour de la bonne connaissance des glissements de terrain à Constantine.

L'analyse de la relation pluie- glissement doit être privilégiée pour mieux cerner si les épisodes pluvieux peuvent déclencher des mouvements de terrain, appuyée par le suivi du comportement de la nappe et surtout l'impact de l'interconnection des nappes présentes sur le site de la ville.

1- la protection et la prévision, une gestion efficace des risques naturels

La gestion des risques peut être effectuée de plusieurs manières ; quand la crise est proche, voire imminente, la prévision est fondamentale car elle permet de prévenir la population et de mettre en œuvre un système de pré alerte, puis d'alerte. La prévision traduit la préparation de la gestion de crise.

La protection est considérée comme une réponse unique à certains dangers, elle a contribué alors à mettre en évidence des réponses techniques et à développer la culture dite d'«ingénieur».

La stratégie de prévision et de protection qui est souhaitable à la ville de Constantine devrait prendre en compte la stabilisation des glissements de terrain actifs et le confortement des

constructions partiellement endommagées sur les différents sites d'instabilité. Cette stratégie sera appuyée par des procédures de démolition des constructions totalement dégradées.

2 - La mise en œuvre d'un dispositif de surveillance des glissements de terrain

L'installation de systèmes de mesures et de surveillance des différents paramètres des glissements de terrain qui ont pour but de pouvoir suivre les déplacements en profondeur et à la surface du sol ; ces multiples enregistrements des mouvements du sol permettent de pouvoir prédire le déclenchement imminent de glissements de terrain et d'alerter les Autorités avant le déclenchement de la crise. Il s'agit de contrôler en temps réel l'évolution des glissements de terrain de façon régulière et permanente,

La stratégie de surveillance développée pour la ville de Constantine consiste en un système de mesures qui comprend :

- Des sondages piézométriques avec un programme régulier de suivi piézométrique
- Des sondages carottés équipés d'inclinomètres et une surveillance du suivi inclinométrique ;
- Des essais géotechniques de laboratoire sur les échantillons prélevés des carottes des sondages pour définir les paramètres d'identification et de résistance des matériaux constitutifs des glissements.
- L'installation de repères de déplacements et de points géodésiques sur les sites d'instabilité qui faciliteront la lecture du rythme des déplacements en surface des glissements.

CONCLUSION

La ville de Constantine gère un important patrimoine urbanistique colonial très affecté par les nombreux glissements de terrain qui se sont produits par le passé et continuent de menacer sérieusement de vastes quartiers densément peuplés. La ville de Constantine est malade de son site

Une bonne partie de la ville fut construite sur les sites d'anciens glissements de terrain, qui ont été réactivés à la suite d'actions anthropiques mais aussi de précipitations exceptionnelles comme celles de la fin de l'année 1984. L'absence de réglementation spécifique des zones instables a contribué à l'aggravation de l'instabilité de nombreux sites dans la ville.

Face à la complexité des problèmes liés à l'instabilité affectant le tiers de la superficie de la ville, les Autorités n'ont pas mis en place une réglementation des zones à risques ni des mesures de protection ou de prévention des risques naturels. La gestion se limitait à l'urgence des opérations d'évacuation ou de relogement des populations sinistrées lors de l'occurrence d'un glissement de terrain. Les extensions urbaines récentes se développent sur des sites très instables et traduisent une forte vulnérabilité aux glissements de terrain

Quel type de réhabilitation à envisager sur les sites condamnés à la démolition?

Devant l'ampleur des dégâts aux constructions et la menace imminente d'une véritable catastrophe, le choix de transfert de population à l'extérieur de la ville, pourrait constituer les prémisses de l'élaboration et de la mise en œuvre d'un programme de gestion des zones à risques à Constantine.

Occuper la nouvelle ville, sur le plateau d'Ain El Bey, devient prioritaire.

REFERENCES

- [1] Archives de la Wilaya de Constantine : archives communales : liasses 197, 201, 207,209. Cartes, photos, rapports techniques.
- [2] Benazzouz M.T. (1987) : Anthropical effects and landslides in Constantine area. First International Congress of geohydrology, Firenze 2-5 Dec. 1987.
- [3] Benazzouz M.T. (1991) l'évaluation de l'aléa géomorphologique et des couts des Risques naturels à Constantine. Z. Geomorph.N.F. Suppl.-Bd 83 , pp 63-70
- [4] Boureboune L. (1989) : méthodologie d'approche spécifique et étude de stabilité du Glissement d'El Ménia à Constantine ; diplôme d'ingénieur, Université Constantine, 143p.
- [5] Bourrelet P.H. (1987) la prévention des risques naturels, rapport d'évaluation, comité Interministériel de l'évaluation des politiques publiques, la documentation française.
- [6] Bonnard Gardel (1978) : étude et travaux de protection du glissement de terrain de Bellevue, Constantine
- [7] Coiffait P.E. (1992) : un bassin post-nappe dans son cadre structural. L'exemple du Bassin de Constantine (Algérie Nord-orientale). Thèse de Doctorat es Sciences Naturelles, Nancy.
- [8] Direction de l'Urbanisme et de la Construction et de l'habitat : (1966) : P.U.D. Plan Calsat, Paris.
- [9] Dauphiné A. (2001) risques et catastrophes, Armand Colin
- [10] Dubois- Maury J. et Chaline (2002) les risques urbains, collection U , Armand Colin
- [11] Favier R. (dir) (2002) les pouvoirs publics face aux risques naturels dans l'histoire, Grenoble, publications de la MSH -Alpes
- [12] Thouret J.C. et d'Ercole R. (1996) vulnérabilité aux risques naturels Effets, acteurs, et réponses sociales, cahiers des sciences humaines, vol 32 , n° 32
- [13] Brunnsden, D. (1979). Mass movements. In progress in geomorphology (Eds C.E. Embleton and J.B. Thornes). Arnold, pp. 130- 186.
- [14] Brunnsden, D. (1988).Slope instability, planning and geomorphology in the United Kingdom. In Geomorphology in Environmental Planning (Ed. J. M. Hooke). Wiley, Chichester, pp. 105- 119.
- [15] Hutchinson, J.N. (1968).Mass movement. In encyclopaedia of geomorphology, Encyclopaedia of earth sciences (Ed. R. W. Fairbridge), Series III, Reinhold, New York, Amsterdam, London.
- [16] Dikau, R. & al (1996). Landslide Recognition; J .Wiley.
- [17] Flageollet, J. C. (1989). Mouvements de terrain et leur prévention, Collection géographique Masson, Paris.
- [18] Filliat, G. (1989). La pratique des sols et les fondations, Edition du moniteur Paris.
- [19] Garry, G & al (1987). La représentation cartographique des risques naturels, Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées Risques naturels n° 150- 151- Laboratoire Central des ponts et chaussées Paris.
- [20] Garry, G & al (1999). Plans de prévention des risques naturels prévisibles PPR. Guide général ; la documentation française.
- [21] Meghraoui, M. (2001). Failles actives et trace des séismes en surface : l'approche paléosismologique Académie des sciences ; Edition scientifique et médicale Elsevier SAS.
- [22] Pagand, B. (1989). La médina de Constantine : de la cité traditionnelle au centre de l'agglomération contemporaine ;Thèse 3ème cycle, centre universitaire d'étude méditerranéenne ; Université de Poitiers.
- [23] Veyret, Y& al. (2004). Les risques ; DIEM : Dossier des images économiques du monde ; Collection ESDES, Paris.

LANDSLIDES

Edmund Krauter

Prof. Dr. Edmund Krauter, Forschungsstelle für Rutschungen an der Johannes Gutenberg-Universität
Mainz, Germany

Contents

- 1 Introduction and definitions
- 2 Causes
- 3 Identification and investigation of instable slopes
- 4 Monitoring and early warning systems
- 5 Risk assessment
- 6 Stabilisation
- 7 Techniques for reducing landslide hazards
- 8 References

1- INTRODUCTION AND DEFINITIONS

Landslides are gravitational natural hazards. They occur worldwide and have to be seen as an increasing socioeconomical and environmental problem. Causes are the increasing of the population density and the building up of infrastructures and settlements into unstable slopes, connected with increasing of vulnerability. Deforestation plays likewise an important role by triggering superficial slides as well as mud- and debrisflows. In many cases landslides are the consequence of other natural hazards such as earthquakes, floods and heavy rain falls.

The primary cause of landslides is the geological structure [1], which is why we can speak of a Geology of Landslides“. The knowledge of the geological structure of a landslide area enables to develop cinematic models for risk assessment and securing or stabilisation methods. According to A. Heim 1932 [1] slopes have an inborn tendency to slide.

The steepness of a slope is no clue to its stability. A gentle slope of rocks of variable hardness may have the same stability as a steep slope of hard rock.

The stability of slopes is mainly controlled by external factors, so that there are phases of higher or lesser stability in one slope. The influence of gravity causes the distribution of mass to strive for a geopotential surface. The factor of stability is versus $\eta = 1.0$ (Fig. 1). In the long run (t), there are no stable slopes existent (Krauter 1990 [2]).

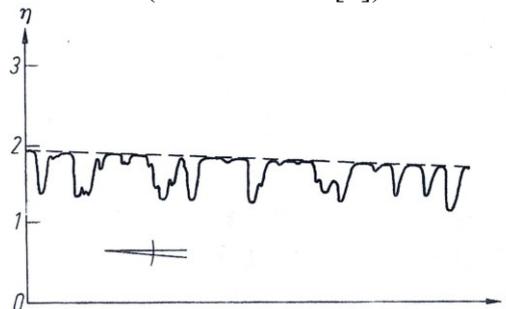


Fig. 1: Stages of various degrees of slope stability (η) as a consequence of climate influences on time (t) with a trend towards a general decrease in stability (Terzaghi [3]).

The causes of massmovements on slopes reside in the modification to the balance between the resisting forces and the driving forces within the slope by permanently or incidentally occurring factors. Human influences are ranked among the incidental ones.

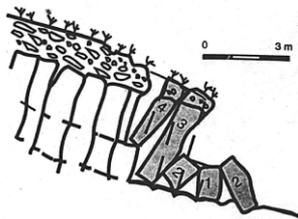
The international definition of landslides is:

“A movement of a mass of rock, earth or debris down a slope” [4].

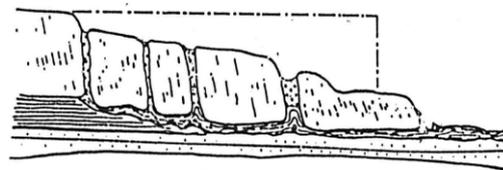
This simple definition includes also erosion phenomena as well as debris- and mudflows. In these cases the gravity is assisted by transportation means such as water or air and the term mass transportation is also used.

According to the Multilingual Landslide Glossary [5], landslides are divided into 5 types (Fig. 2), based on their cinematics.

1 Toppling – Basculement



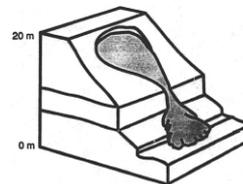
4 Spreading - Étalement



1 Falling – Éboulement



5 Flowing - Écoulement



3 Sliding - Glissement



Fig. 2: Types of landslides.

- 1 A **topple** is the forward rotation, out of the slope, of a mass of soil or rock about a point or axis below the center of gravity of the displaced mass.
- 2 A **fall** starts with the detachment of soil or rock from a steep slope along a surface on which little or no shear displacements takes place. The material then descends largely through the air by falling, saltation or rolling.
- 3 A **slide** is the downslope movement of a soil or rock mass occurring dominantly on surfaces of rupture or relatively thin zones of intense shear strain.
- 4 A **spread** is an extension of a cohesive soil or rock mass combined with a general subsidence of the fractured mass of cohesive material into softer underlying material. The rupture surface is not a surface of intense shear. Spreads may result from liquefaction or flow (and extrusion) of the softer material.
- 5 A **flow** is a spatially continuous movement in which surfaces of shear are short-lived, closely spaced and not usually preserved. The distribution of velocities in the displacing mass resembles in a viscous fluid.

In most cases landslides are of a more complex type, namely temporally and spatially there are different mechanisms of movements to be taken into consideration (Fig.3).

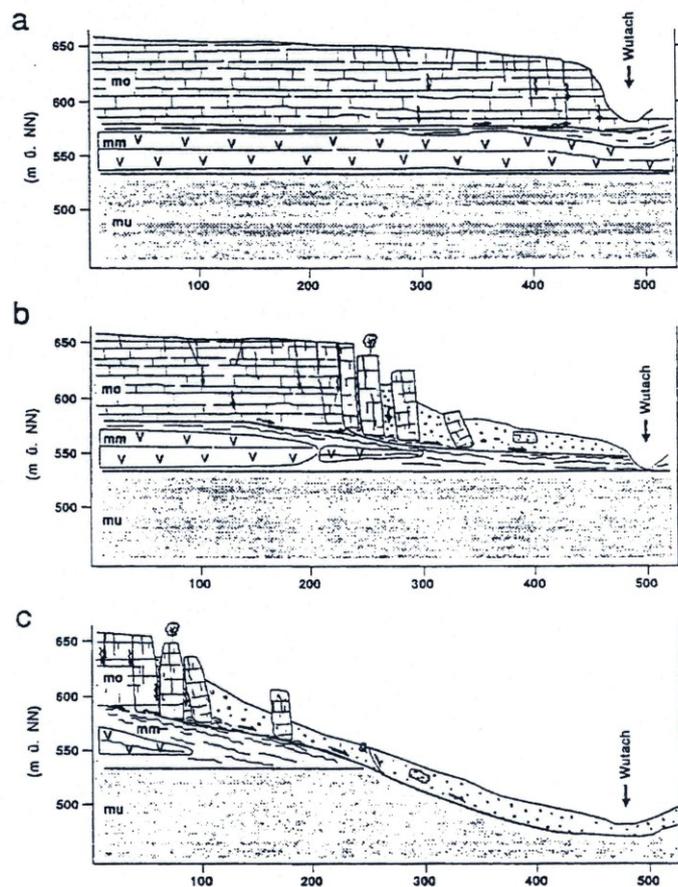


Fig.3: Complex mass movement in the Wutachklamm, Black Forest, Germany [6].

Scheme of three stages (a, b, c) deepening the valley. In stage a only a block movement occurred in the limestones due to gravity forces and joint water pressure. In stages b and c far reaching slides and spreads had taken place. The valley was clearly broadened. **mo** – Upper Muschelkalk; **mm** – Middle Muschelkalk; **mu** –



Fig. 4: Foot toppling (left) and head toppling (right) - (Lower Muschelkalk).

Toppling can be subdivided into foot rotation and head rotation (Fig. 4). In the case of foot rotation the gap (arrow) is opening in the lower part. It exists at first a horizontal movement and then the vertical movement predominate. Only a small area is affected. In the case of head rotation the gap (arrow) is opening in the upper part. The affected area is larger due to the longer horizontal movement of the upper part of the block. The falling blocks have a high energy and they can move further downhill by saltation and rolling.

In both cases is the cause failure of the contact zone on the foot of the toppling block.



Fig. 5: Rockfall from an abandoned open quarry due to desintegration of the rock in the course of time (Buntsandstein)



Fig. 6: Translational sliding of Tertiary clays. The main scarp (arrow) has a height of about 20 m.

The slide (Fig. 6) blocked the right part of the highway. The cause was steepening of a gentle slope, and was triggered by heavy rain falls.

Stabilisation took place by excavation the sled masses and a forest of grain coarsed material.



Fig. 7: Slide El Tambo (> 100 Mio m³) near Quenca – Ecuador.

The huge mass movement El Tambo (Fig 7) was caused due to irrigation measures on the highlands above the slope. The dimension of the sliding mass can be estimated at the feasting sheeps (upper part of the picture). The wellknown Panamericana road on the lower part of the slope shows deformations too.

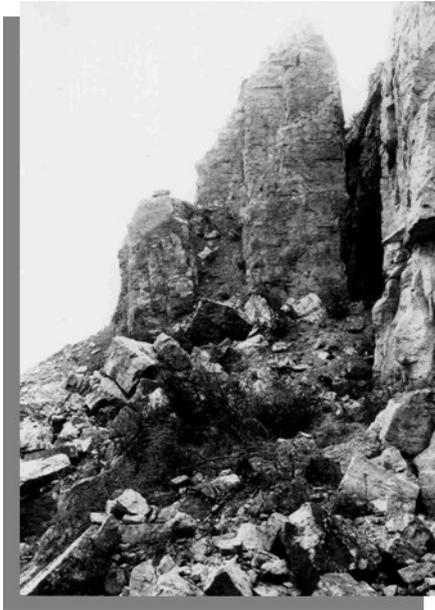


fig. 8: Spreading. Comparison in the course of time between 1981 (left) and 2004 (right). The rate of movement is 25 cm/a.



Fig. 9: Flowing (debris flow) – Gacier Lake Outburst Flood (GLOF)

Glacier lake outburst floods (Fig. 9) – a fast flowing – are caused by breaking of the moraine rampart due to the increasing of the water level of the lake as a result of glacier melting.

The distribution of the different types of landslides in dependence on morphology shows Table 1.

Table 1: Types of landslides in different morphological regions (%).

	Hill country	Mountaines region	
	<i>Quaternary and Tertiary</i> cohesive and over-consolidated soils	Weathering hard rock masses and covering layers	Hard rock masses
Toppling	1	10	35
Falling			
Sliding	80	70	35
Spreading	-	-	10
Flowing -fast	5	10	-
-slow (creeping)	14	10	20

2-CAUSES

The causing factors are different and have a varying influence of the movements. The main cause is the geology which is acting as an internal factor. Every landsilde has its own rules regarding the cinematics and the influence of the causing or triggering factors. The external factors can be devided into permanent factors (Table 2) and triggering factors (Table 3). The triggering causes are working episodically and intiate movements.

Table 2: Examples for permanent factors which promote slope movements.

Factors	Effects
Tectonics	Change of the angle or height of the slope
Erosion	Removal of the abutment at the foot of a slope, undercutting, deepening of the valley
Weathering	Loosening and disintigration of the geological stratum due to chemical and physical processes
Gravity	Loosening and disintigration of the geological stratum due to the dead weight

Atelier de Formation sur les Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de prévention et de protection

Table 3: Examples for episodic factors which trigger slope movements.

Factor	Natural causes	Human causes	Effects
Change of the groundwater level, high moistness	Animalous rainfall, sealing due to the frost, thawing, snow melt	Defective water pipes, sewerage system, faulty drainage, rising and lowering the water level in water storage basins	Changing of the consistency, plasticising of joint fillings, joint water pressure, hydrostatic uplift, weathering, hydrolysis
Vibrations	Earthquakes	Blastings, driving and drilling works, rolling traffic	Pore water excess pressure, thixotropy effect, disintegration, change of stresses
Change of loading		Embankments, stockpiles, dumps, buildings	Change of stresses
Change of the outer form	Animalous rainfall, snow water, sealing due to frost	Cutting of slopes	Change of stresses
	Underwashing		

Examples for **natural causes** are shown in Table 4, which are not influenced directly by human activities.

Table 4: Examples for natural causes (according to Reuter et al. in Krauter (2002 [7])).

Geological causes	Climatical and hydrological causes	Geomorphological causes
Nature of rock and soil	Intense rainfalls	Slope morphology and gradient
Joints and their character and spacial location	Water pressure in joints	Slope aspect
In-situ stress	Groundwater pressure	Former landslides
Tectonic and vulkanic uplift	Flow pressure	Relief energy and stage of development of landscape
Earthquakes	Artesian and perched groundwater	Erosion of toe and face of slopes
Degree of weathering	Evapotranspiration	Deposition at head of slopes
Soil- and rockmechanical properties	Floods	Erosion by seepage
	Rapid drawdown following floods and high tides	Surface- and rill-wash erosion
	Changing of the temperature	Vegetation removal by erosion, wildfire and drought

An example of natural causes is the river erosion (Fig. 10), which is steepening the river banks and remove the abutment of the slope.

The failure starts on the foot of the slope in all cases.

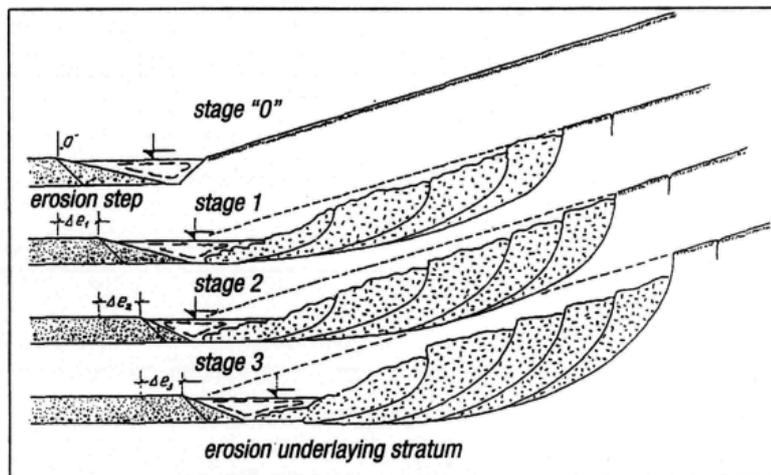


Fig. 10: Development of sliding processes depending on horizontal transfer of the river bed (after Rokic [8]).



. 11: Changing of the stream line due to sliding masses. The undulated slope area in the background is an indicator for mass movements.

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

Changing of the stream line due to sliding masses (Fig. 11) leads to an increasing of the erosion on the opposite river bank and triggers landslides - and then - vice versa. This mutual process in this small river in the Carpathien mountains lasted about 5 years. Water is a steering and triggering factor of gravitational mass movements in most cases. The natural influence on slope deformation due to water is listed in Table 5.

Table 5: Natural influences of water concerning slope deformations (slide and flow movements).

Influence of water	Causing	Effect	Influence on slope stability
Seepage	Increasing of the water content in the soil	Increasing of the dead weight Decreasing of the shear parameter	Negative
	Filling of rockjoints	Horizontal pressure in direction of the free surface.	
Groundwater	Increasing	Moistening of potential slide surfaces or – zones Weakening of the abutment due to uplift pressure	Negative
	Decreasing	Increasing of the flow pressure	
Layer water		Moistening of the base of the overlaying material Decreasing of the shear parameter Uplift pressure	Negative
	Stressed layer water	Weakening of the abutment due to uplift pressure	
		Weakening of the abutment due to the uplift	
Water level of the receiving stream	Increasing	Lowering of the groundwater level in the upper part of the slope through it, increasing of the flow pressure	Negative
	Decreasing		

The **human factor** is mostly indirect and accidental, and being a secondary effect of other actions. Examples of human causes are shown in Table 6.

Table 6. Human causes, their influences and effects.

Human causes	Influences	Effects
Cuttings Exploitation	Reduction of the resisting forces	Landslides Rockfalls
	Increasing of the acting forces	Landslides Mud – and debrisflows
Embankments		
Dams		
Dumpings		
Change of the waterflow	Increasing of the stream- and jointwater pressure.	Landslides
Missing of maintenance of water pipes and sewerages - causing of leakages	Reduction of the shear strength	
	Increasing of the stream- and jointwater pressure	Landslides
Deforestation	Increasing of penetration of rainwater, missing of deaquation due to the roots – increasing of the water content,	
	missing of the superficial consolidation by the roots	Landslides Mud- and debris flows

3 IDENTIFICATION AND INVESTIGATION OF UNSTABLE SLOPES

Generally unstable slopes may already be identified by taking notice land formations. Such indicators in the terrain are:

- irregular surface with waves, humps, hollows, gaps or scarps
- sources, ponds, wet spots or surfaces with humidity loving plants
- erosion surfaces in the slope
- bent or oblique trees (Fig. 5)
- concave shapes of the upper slope and convex ones of the lower one
- damages on buildings and infrastructures

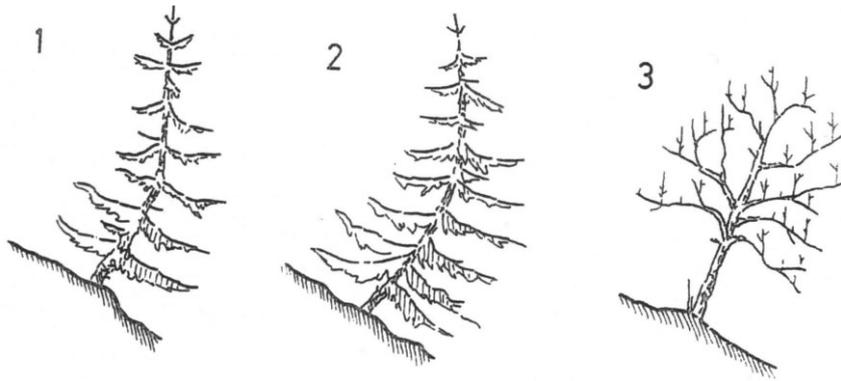


Fig. 12: Disturbance of vegetation cover reveals recent movement; the time of the movement is obtainable from the curvature of trunks (1, 2) and new growth (3).

Aerial photo or satellite picture interpretation is very useful for identification and investigation unstable slopes.

Further investigation methods are:

- field work (mapping)
- borings
- geophysics

4 MONITORING AND EARLY WARNING SYSTEMS

Monitoring of unstable slopes or landslide-prone zones is the basis of risk assessment and planning of securing- and countermeasures. The term expresses inspection in the terrain as well as measuring with monitoring devices. Goals of monitoring are shown in the following flow chart (Fig. 13).

The correlation of the steering factors and of the rate of the mass movements allows a risk assessment, which is the base for securing- and countermeasures. An exact correlation is only possible with permanent measurements. Episodical measurements allow only a trend-analysis. They are not qualified for an early warning system.

Immediate decisions, those to be frequently demanded, concerning slope stability and the risk, are based on experience. Then the causing factors will only qualitatively seized and valued. In that case the prediction and the risk assessment is only approximately possible. A quantification of the causing factors, to which generally belong long-term measurements of the movements as well as the factors of influence and their correlation, allows a more precise prediction of the behaviour of the instable slope.

Permanent measurements of the slope deformation have substantial advantages in relation to the episodical measurements.

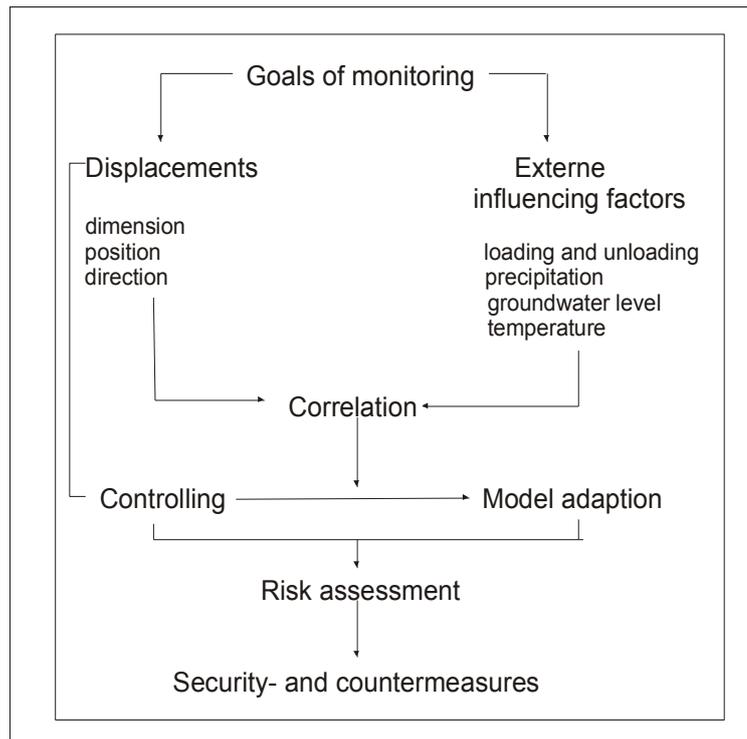


Fig. 13: Goals of monitoring.

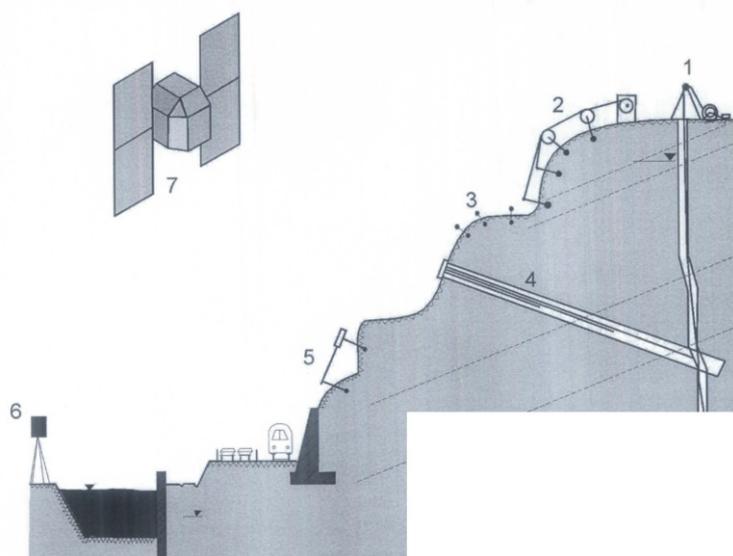
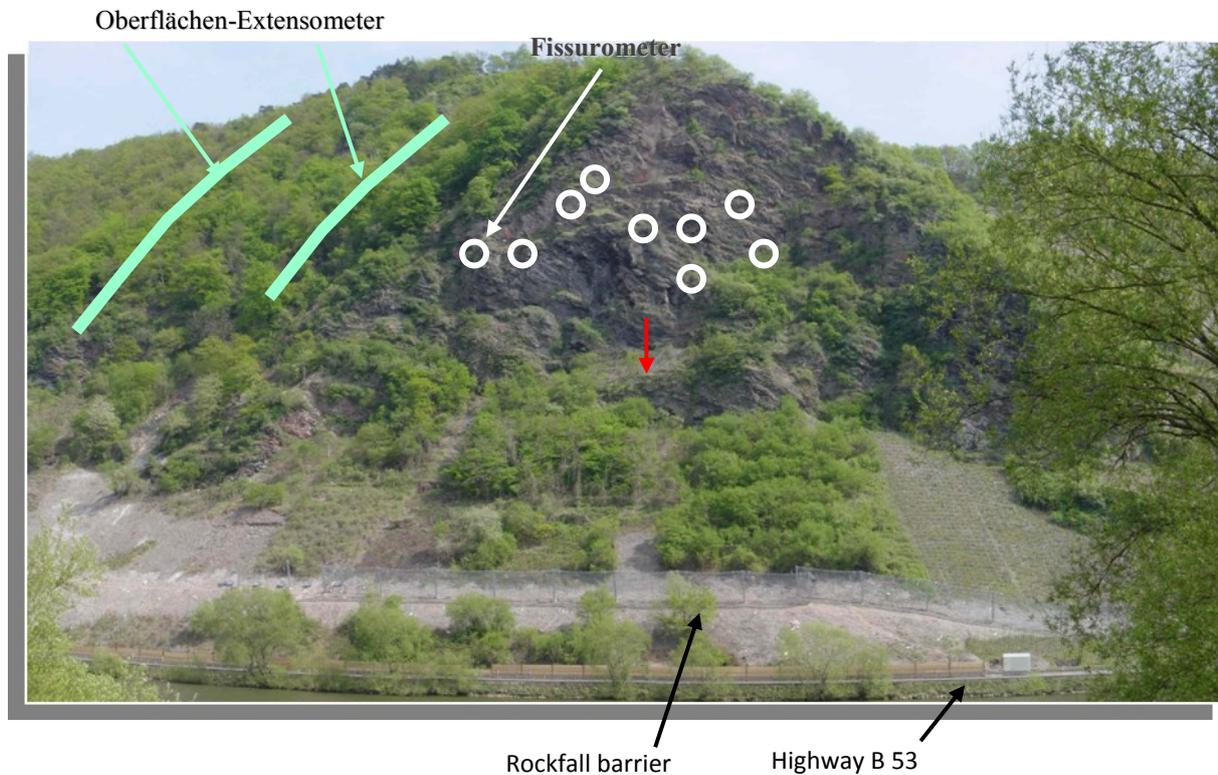


Fig. 14: Examples of measuring techniques.

- 1: Inclinometer
- 2: Surface extensometer
- 3: Geodetic measuring points
- 4: Extensometer in boreholes
- 5: Spys (Fissurometers)
- 6: Geodetic automatic measuring station
- 7 : Satellite supported measurements

All the mentioned measuring techniques (Fig. 14) can be used for episodic as well as for permanent measurements.

The installing of extensometer directly on the surface of an instable slope (Fig. 15) is a new method of monitoring. It is a low-cost method and relatively fast to install.



The amount of precipitation, the groundwater level, the water level of the receiving stream and the temperature should be recorded in addition.

An early warning system is required in two cases:

- stabilisation or other securing measures are not possible because of technical or financial problems
- getting more information about the development of the movements and how does the driving factors work.

Such a system is always working permanently. The application depends on the existing risk.

Values of the velocity of landslides may not just be transposed to another one, even in those cases in which the conditions appear to be similar.

5 RISK ASSESSMENT

The assessment of risk due to gravitational mass movements on slopes required the results of the movements controlling by visuell inspection in the terrain and/or measuring techniques. The prerequisite is the knowledge of the hazard potential and what is endangered. These prerequisites allow a classification of the risk (Fig.16)

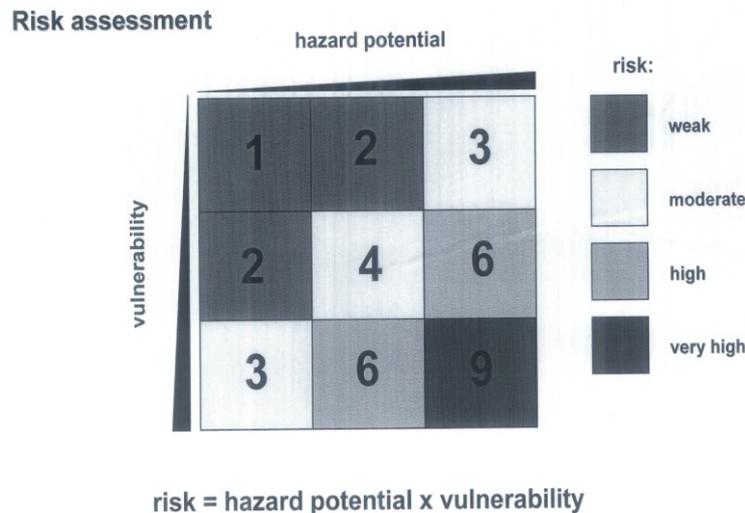


Fig.16: Classification of risk

The different classes of risk mean:

- 1, 2: no measures are required, tolerable risk
- 3, 4: surveilling methods depending on their results, planning and execution of securing measures
- 6: permanent surveilling measures and execution of securing measures
- 9: emergency securing measures

It is a fact that every gravitational mass movements announces itself in advance. There is no sudden, unexpected slope mouvement, except maybe for the case when it is triggered by an earthquake or animalous rainfalls. Nevertheless, one is constantly taken by surprise by landslides and rock falls. This comes from the fact that the danger has not been identified and controled in due time.

A prediction of actual events based exclusively on the former movement dimensions is not possible.

The sequence of movement of the Kilchenstock (Fig. 17) illustrates the possibility of hazard assessment by means of slide velocity. The acceleration is of crucial importance in the hazard assessment of mass movements. Experience shows that an event does not occur due to the first acceleration stages in movement with damaging velocity. If acceleration follows a steady movement or after it slowing down, one faces direct danger, provided the movement is larger, or it lasts longer than the previous one, then exists a high danger of a collapse.

The time-deformation curve also shows, that the sliding mass is composed of several bodies, moving differently in space and time (arrows in Fig. 17).

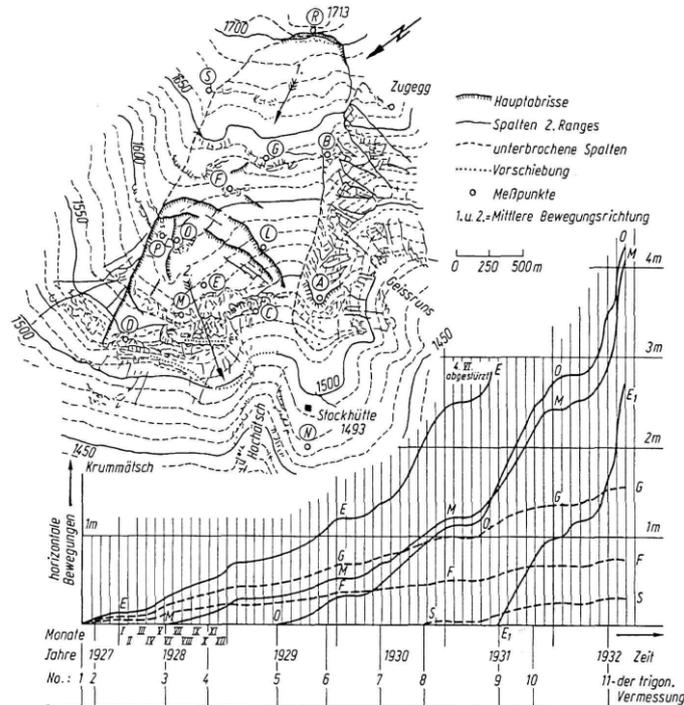


Fig. 17: Risk assessment with the help of the rate of movement, Kilchenstock, Switzerland (A. Heim 1932 [1]).

The rate of movements is normally the base for the prediction of a landslide event. A continual acceleration is an indicator for an imminent event (Fig. 18).

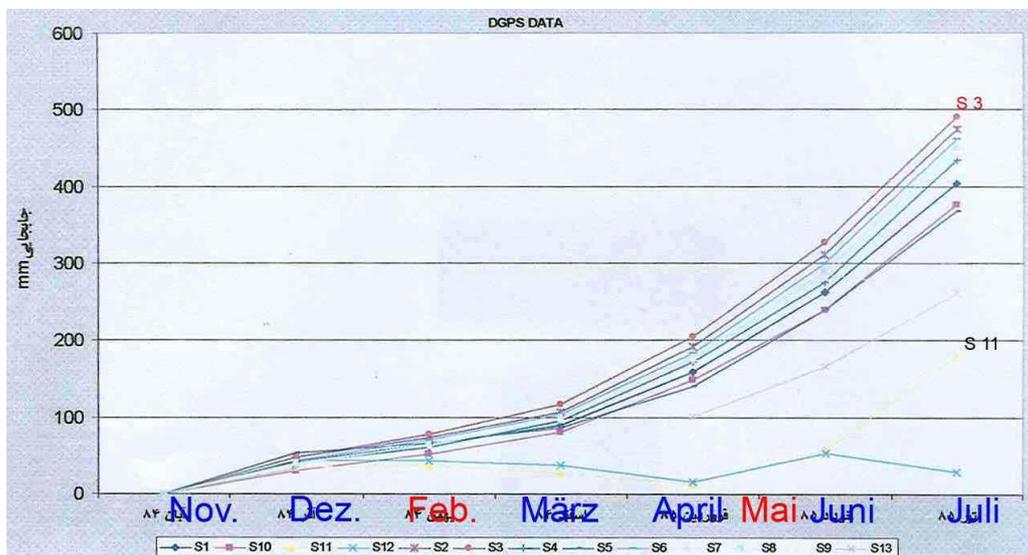


Fig. 18: Continual acceleration of slope movements announces the event

6 STABILISATION Goals of stabilisation are:

- reducing of the acting forces or
- increasing of the resisting forces

The stabilisation depends on:

- cinematics
- steering factors
- hazard potential
- stage of danger

Prerequisites for a long-term effective stabilisation is the knowledge of the

- geological and hydrological situation,
- causes of the slope deformation and the way a cause works,
- cinematics,
- soil- and rock parameter as well as
- controlling and maintenance.

Examples for stabilisation techniques of sliding mass movements are:

- dewatering measures
- cutting of the slit mass
- cutting of the slit mass and refilling with coarse grained soil
- borepiles
- borepiles with prestressed anchors
- nailing
- supporting stripes made of earth concrete

The soil- and rock parameter can be obtained by laboratory investigations and/or back calculations. The planned stabilisation measures should be proved due to stability calculations.

A rockfall simulation [9] should be the basics for the planning of rockfall barriers.

Dewatering of an instable slope should be envisaged as the first measure. In general, drainage measures for reducing the movement of landslides are only as long effective as the working order is maintained. If maintenance will omit it exists the danger that it come to additional slope irrigation, which leads to an acceleration of slope movements.

The fundamental prerequisite for the stabilisation is the **experience** however in the field of engineering geology and geotechnics

7 TECHNIQUES FOR REDUCING LANDSLIDE HAZARDS

Landslide risk can be reduced by **four approaches** [10]:

Restriction of development in landslide-prone areas.

1. Codes for excavation, grading, landscaping, and construction.

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

- 2. Physical measures (drainage, slope-geometry modification, and structures) to prevent or control landslides.**
- 3. Development of warning systems.**

The prerequisites for these approaches are the documentation and the evaluation of the gravitational natural hazards. With the help of these data landslide hazard or risk maps can be worked out, which are the basis for plannings in future.

The goal is protecting existing development and population (property and structures as well as people and livestock) by physical control measures or by monitoring and warning systems [11].

The technical and financial possibilities should be taken into consideration by all measures of mitigation gravitational natural hazards.

The Table 7 shows steps for the documentation and evaluation of gravitational natural hazards.

Table 7: Step by step documentation and evaluation of gravitational natural hazards [12].

Step 1	Step 2	Step 3
<p>Identification of natural hazards: “What can happen and when?”</p> <p>Documentation of phenomena in regard to the causes by:</p> <ul style="list-style-type: none"> • basics maps surveillance measurments • documentation of occurrences • • map of phenomena 	<p>Hazard assessment: “How often can it occur?”</p> <p>Evaluation in regard of impact and area by:</p> <ul style="list-style-type: none"> • hazard maps 	<p>Planning of measures: “How can we protect ourselves?”</p> <p>Conversions into the fields:</p> <ul style="list-style-type: none"> • development of planning • • securing measures • • emergency planning

The concept of prevention of landslide disasters by propriate land use development or structural retention is becoming increasingly important.

All this mentioned measures for reducing landslides hazards should be promoted by public legislation.

8 REFERENCES

- [1] Heim, A., 1932, Bergsturz und Menschenleben, 1. Edition, Zürich, Verlag Fretz & Wasmuth
- [2] Krauter, E., 2002, Phänomenologie natürlicher Böschungen (Hänge) und ihrer Massenbewegungen, in: Smolczyk, U. (Hrsg): Grundbautaschenbuch, 6. Aufl. Teil 1
- [3] Terzaghi, K., 1950, Mechanics of Landslides, Geological Society of America, New York
- [4] Cruden, D.M., 1991, A simple definition of a landslide, Bulletin IAEG, **43**
- [5] Multilingual Landslide Glossary, 1993, The International Geotechnical Societies UNESCO Working Party for World Landslide Inventory, The Canadian Geotechnical Society, BiTech Publishers Ltd.
- [6] Matthesius, H.-J., 1994, Entwicklung eines Geotechnischen Informationssystems zur Kontrolle von Hangrutschungen, Dissertation, Mainz, Johannes Gutenberg-Universität
- [7] Krauter, E., 2002, Phenomenology of natural slopes and their mass movement, in: Smolczyk, U. (Editor), Geotechnical Engineering Handbook, Vol. 1, Fundamentals, Ernst & Sohn
- [8] Rokic, L., 1997, Origins of landslides on the right bank of Danube River near NoviSad, Proceedings of the IAEG Symposium Engineering Geology and the Environment, Balkema, Rotterdam
- [9] Spang, M.R. & Krauter, E., 2001, Rock Fall Simulation – A State of the Art Tool for Risk Assessment and Dimensional of Rockfall Barriers, International Conference of Landslides, Causes, Impacts and Countermeasures, Davos, Switzerland
- [10] Kockelmann, W.J., 1986, Some techniques for reducing landslide hazards, Bulletin of the Association of Engineering Geologists, Vol. 23, No. 1
- [11] Schuster, R.L. & Kockelmann, W.J., 1996, Principles of Landslide Hazard Reduction, in: Landslides Investigation and Mitigation, Special Report 247, Transportation Research Board, National Research Council
- [12] Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL), 1999, Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren, Bern, Switzerland

III. AMENAGEMENTS ET GESTION DES RISQUES

L'AMENAGEMENT ET L'UTILISATION DES ESPACES DANS LE CADRE DE LA PREVENTION DES EFFETS DES CATASTROPHES

Mohamed BOUBKEUR, Expert en risques majeurs

- Objectif général à la fin de cette présentation : vous connaîtrez la démarche permettant de prendre les mesures nécessaires à prévenir et atténuer les effets des catastrophes naturelles principalement en milieu urbain.
- Objectifs spécifiques

Afin d'atteindre cet objectif nous allons traiter les points suivants:

- Particularités des catastrophes en milieu urbain
- Origines des catastrophes
- Évaluation des effets d'une catastrophe
- L'exemple de Boumerdes
- Analyse de vulnérabilité
- Critères d'occupation des sols
- Plan d'aménagement et de prévention des catastrophes
- Mesures de planification de l'espace en vue de la prévention et de l'atténuation des risques de catastrophes naturelles

L'origine des catastrophes

- Les catastrophes peuvent être d'origine:
 - Naturelle (séismes, inondations...)
 - Humaine (accident industriel ...)
- Parfois les conséquences d'une catastrophe naturelle sont aggravées par les activités humaines
 - Urbanisation anarchique
 - Construction en zone dangereuse



Évaluation des effets des catastrophes

- **Perte de patrimoine : habitation, entreprises équipements, revenus....**



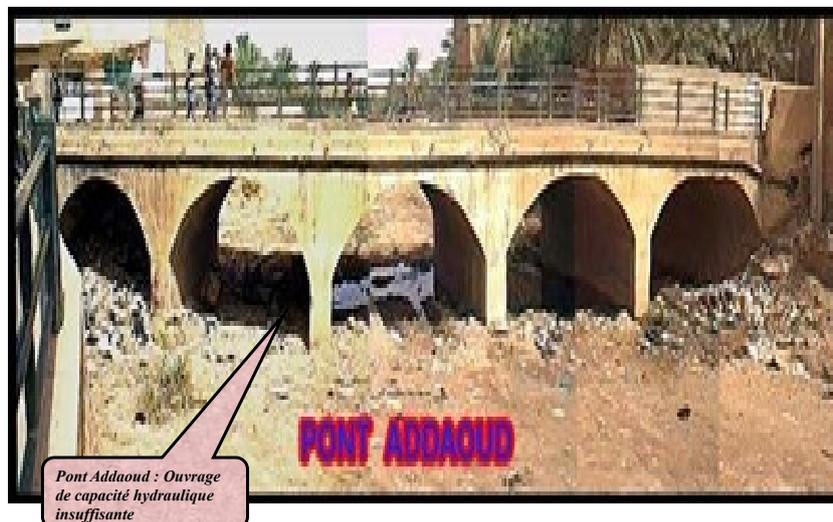
Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

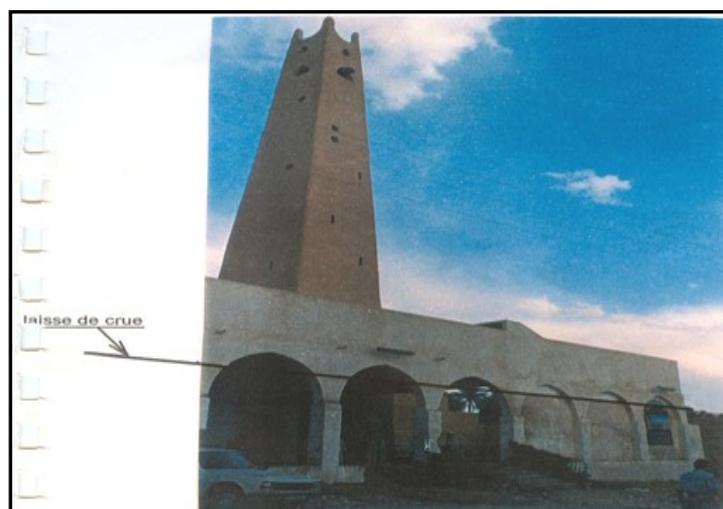
- Pertes indirectes: baisse de revenu des ménages et baisse de production des entreprises par effet domino....
- Effets indirects tels que épidémie, appauvrissement, inflation enclavement



CAS DE GHARDAIA



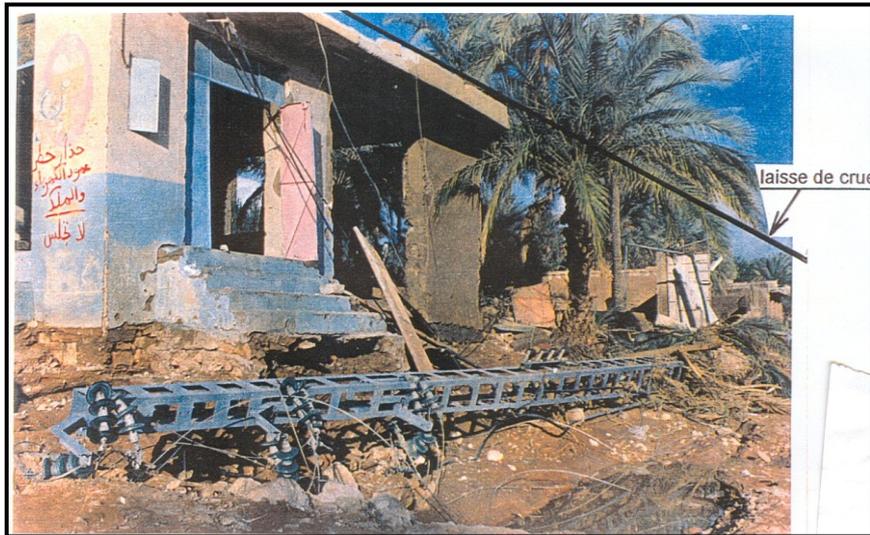
Laisse de crue du 2 juin 1991, à l'extérieur de la Mosquée de Touzouz.



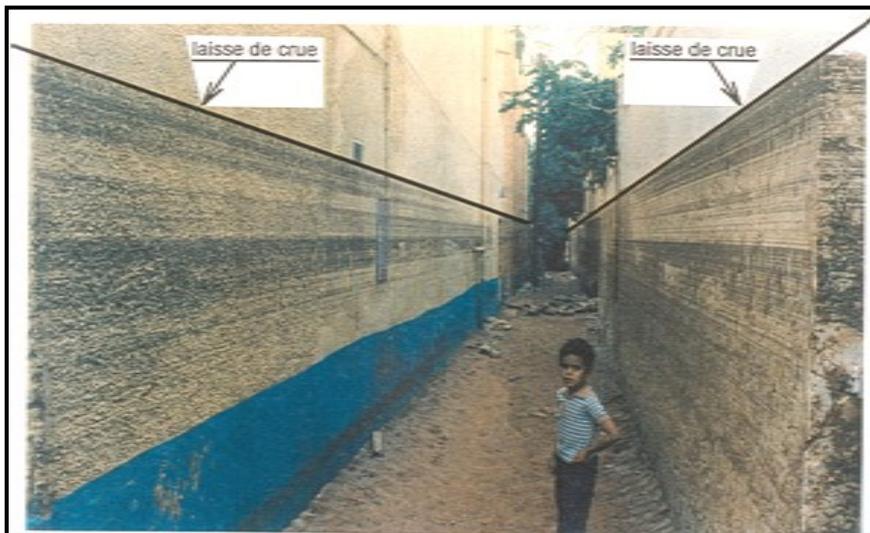
Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

Laisse de crue du 2 juin 1991, et dégât dans l'oued au niveau de la localité de Touzouz.



Laisse de crue du 2 juin 1991, au niveau de la rue parallèle au lit de l'oued en rive droite à environ 30m de la berge dans la localité de Touzouz.



L'exemple de Boumerdes

- La puissance publique a:
 - Rétabli les voies de communication



- Importé des chalets préfabriqués



- Ce qui a eu pour effet:
 - De permettre la reprise de certains domaines d'activité

Analyse de vulnérabilité

- L'occupation des sols:
 - La pression démographique et de développement soulèvent de graves problèmes dans les zones à risques.



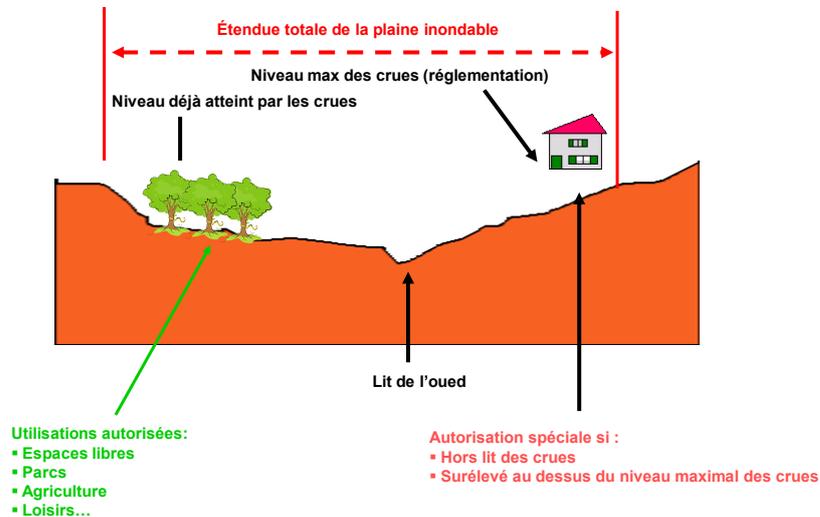
Habitat précaire



Usine

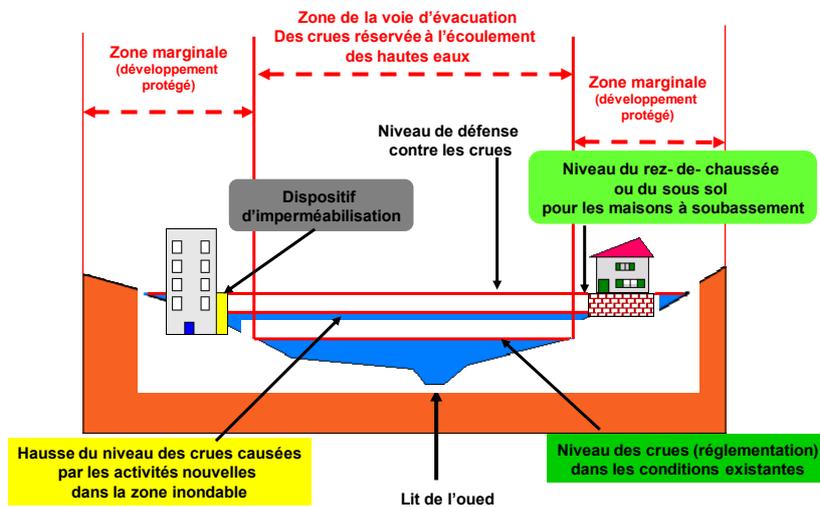
Critères d'occupation des sols

Zonage d'une plaine inondable aux fins de réglementation d'occupation des sols



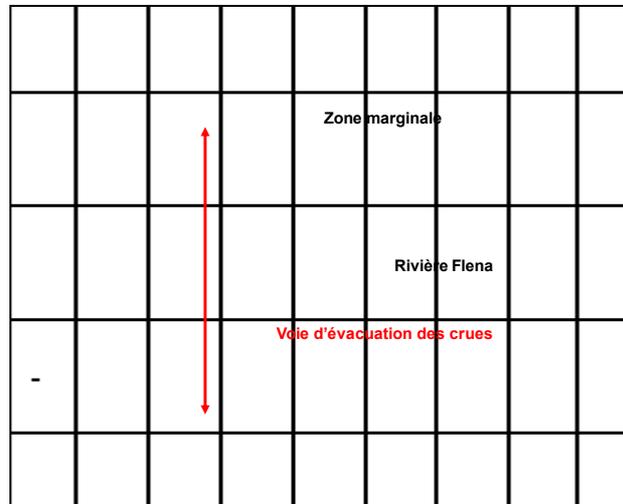
Critères d'occupation des sols

Zonage d'une plaine inondable en deux zones aux fins de réglementation d'occupation des sols



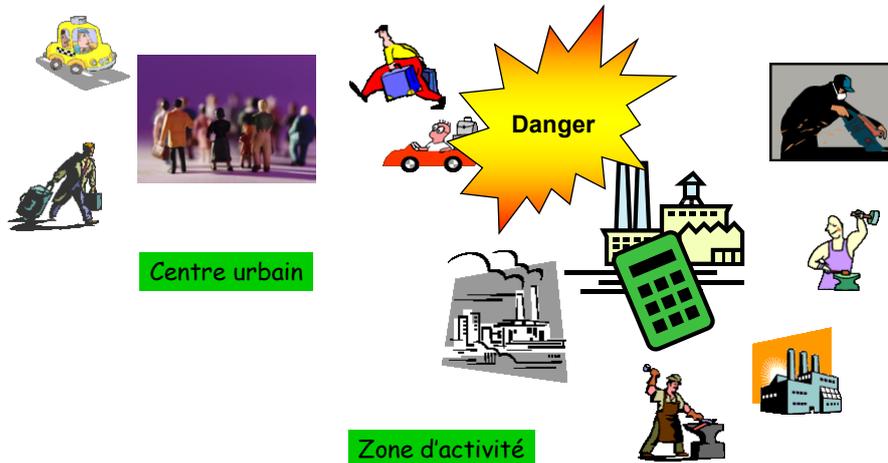
Critères d'occupation des sols

Zonage aux fins de l'utilisation des terres des rives de la rivière Flena



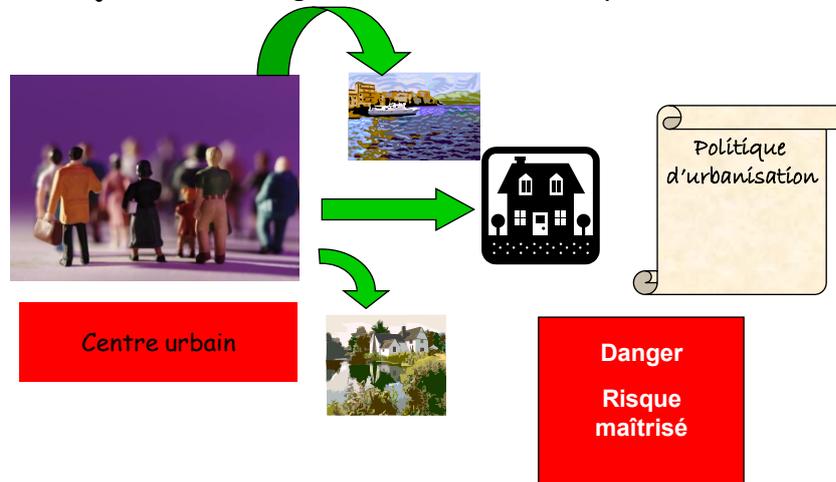
Plan d'aménagement et de prévention des catastrophes

- Les populations et les activités s'implantent souvent spontanément, provoquant des déséquilibres inter régionaux et une congestion des grands centres urbains.



Plan d'aménagement et de prévention des catastrophes

- Les autorités doivent veiller à orienter la croissance selon des objectifs d'aménagement rationnel de l'espace.

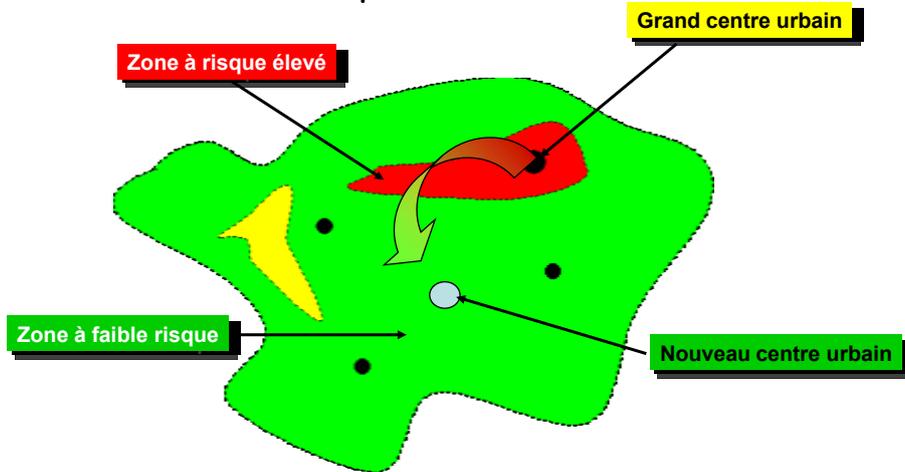


Plan d'aménagement et de prévention des catastrophes



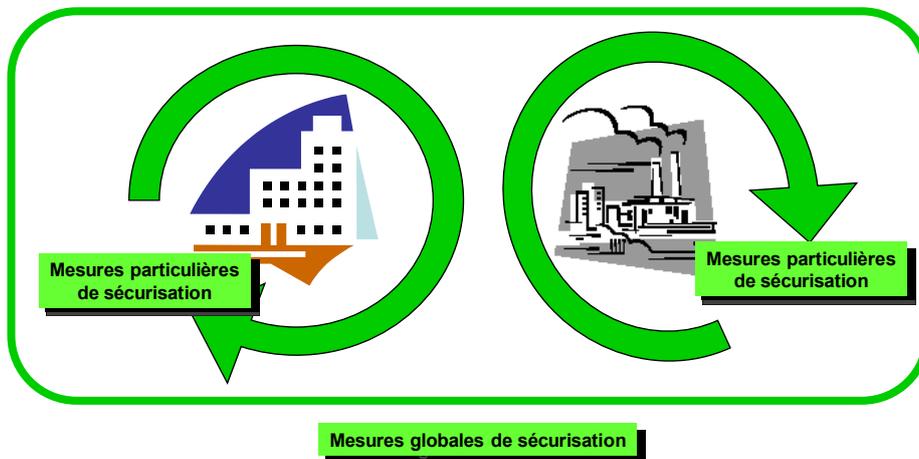
Mesures à prendre par les aménageurs

- Orienter les populations et les activités humaines vers les zones de moindres risques



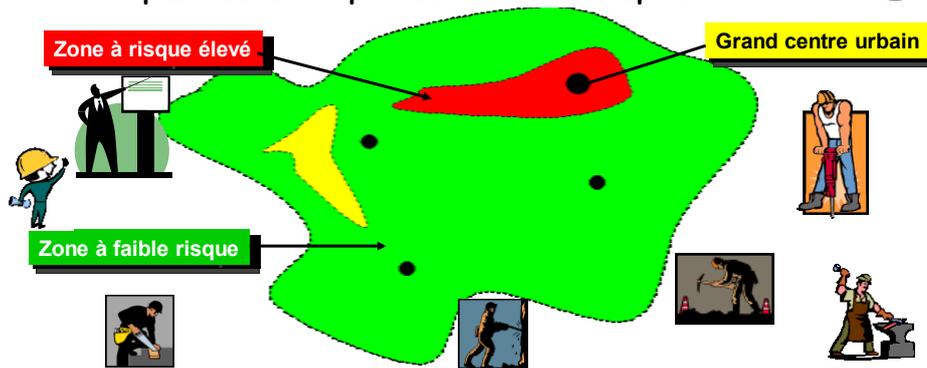
Mesures à prendre par les aménageurs

- Mieux protéger les établissements humains actuellement situés dans des zones dangereuses



La carte des risques

- Ces cartes servent à identifier les zones d'occupation actuelles qui sont sous la menace et auxquelles il faut donner la priorité d'action en matière de :
 - restructuration et confortement des bâtiments
 - renouvellement urbain
 - planification et prévision des catastrophes



Évaluation de la probabilité :

- L'analyse des cartes de risque porte sur :
 - L'identification des zones
 - L'arbitrage Coût / avantage ou coût / efficacité
 - La répercussion des différents schémas sur l'environnement, et l'applicabilité des mesures d'atténuation



Intérêt économique des mesures de prévention

- Ces actions de prévention sont par nature très diverses elles peuvent porter sur :
 - Le choix judicieux des zones d'habitation
 - Le choix judicieux des zones d'activités

- **La construction de digue pour protéger des inondations**
- **L'application des règles parasismiques**
- **La plantation d'une ceinture verte contre l'ensablement (Bou Saada, In Salah)**

Mesures de planification de l'espace en vue de la prévention et de l'atténuation des risques de catastrophes naturelles.

- On a trop compté sur les mesures de protection pour résister aux effets des phénomènes naturels, et singulièrement sur les secours extérieurs (protection civile)
- Ces mesures découlent d'une analyse des risques selon les divers types de catastrophes auxquels l'agglomération est sujette.
- Par exemple :
 - les risques sismiques pour lesquels on tiendra compte notamment de la fréquence, de l'intensité des séismes ainsi que de la nature géologique des sols.
 - Ou encore les risques d'inondation, pour lesquels il convient de considérer la pluviométrie, le régime des cours d'eau ainsi que la topographie.

Les infrastructures

- Il est important que les infrastructures restent opérationnelles en situation d'urgence ceci est particulièrement vrai pour:
 - La distribution d'eau
 - Les ponts
 - Les barrages

Les techniques de construction

- Dans les zones où la sismicité est moyenne ou forte, les bâtiments doivent être réalisés conformément aux normes antisismiques en vigueur en Algérie.

La formation des acteurs

- Dans un pays exposé aux risques il est important que les cadres supérieurs reçoivent une formation spéciale afin qu'ils connaissent les principes fondamentaux de la prévision et de la prévention et de la gestion des crises.
- Il est également souhaitable que les sujets liés à l'économie des catastrophes naturelles ou technologiques fassent partie de la formation

**GEOGRAPHIE DES RISQUES ET AMENAGEMENT
DE L'ESPACE : L'EXEMPLE FRANÇAIS**

Yvette Veyret* Professeur de géographie
Université Paris Ouest, Nanterre-la Défense

* y.veyret@wanadoo.fr

La France est soumise à des aléas divers qui sans être d'intensité égale à ceux existant dans certaines régions tropicales par exemple, n'en affectent pas moins la façade atlantique (tempêtes), les vallées (inondations), les massifs montagneux (avalanches ou incendies de forêts) de manière plus ou moins régulière...

Ces aléas quand ils sont perçus par les populations deviennent des risques pris en charge par l'Etat et les autorités locales afin d'éviter qu'ils donnent naissance à des crises ou des catastrophes. Les aléas qui traduisent la dynamique des milieux physiques peuvent résulter du fonctionnement de l'atmosphère : grosses averses responsables d'inondations, épisodes neigeux de grande ampleur, épisode froid ou caniculaire. Ils peuvent être d'origine géologique : phénomènes volcaniques, sismiques, mouvements de terrain. Les aléas constituent des épisodes « normaux » de cette dynamique terrestre y compris quand leur intensité semble « anormale » ou « extraordinaire ». Le déroulement des processus qui agissent à la surface terrestre, n'offre pas la régularité à laquelle l'établissement de moyennes (notamment climatiques) pourrait laisser croire, il présente des « temps forts » d'ampleur et de fréquence variables qui peuvent être source de risques pour une population ou un individu à un moment donné de son histoire. Ces temps forts atteignent la dimension de crise ou de catastrophe en fonction des enjeux (humains ou/et matériels) affectés

Par ailleurs certains aléas sont aggravés par les activités des sociétés et les aménagements, c'est le cas de l'érosion accélérée des sols, de la désertification, des inondations... Le risque peut se définir comme la sensibilité des sociétés à l'aléa. La capacité humaine et économique à affronter le danger, à surmonter la crise recouvre la notion de vulnérabilité. Cette capacité varie avec la relation que la société entretient avec son environnement, elle varie aussi avec l'organisation sociale, avec le niveau de développement de la population concernée

I- LA LONGUE HISTOIRE DU RISQUE EN FRANCE

Ce que l'on définit aujourd'hui comme risque n'était pas perçu comme tel dans les sociétés anciennes. Les hommes devaient alors affronter des situations difficiles (froid, inondations, sécheresse) qui donnaient à leur existence une perpétuelle précarité. Les catastrophes, les épidémies, les famines étaient alors perçues comme des « signes de damnation » (Marc Bloch). Le terme de sécurité n'avait aucune signification puisque le salut résidait exclusivement ou presque dans la confiance en Dieu. Dans l'Ancien Régime, la population essentiellement rurale acceptait les calamités agricoles qui n'étaient pas considérées comme des risques. Tout aussi dépendante des fléaux naturels, la population d'une ville comme Paris subissait difficilement les hivers très froids qui empêchaient l'approvisionnement de la ville. Les grandes sécheresses comme les grandes pluies et les inondations laissaient la capitale démunie et en situation de grande précarité ; dans des cas très graves l'ultime recours était alors d'implorer Sainte Geneviève, patronne de Paris et de faire procession pour la supplier de remettre le temps en ordre » (A. Farge)

A partir de la Révolution française la sécurité est définie comme un droit, le terme de sécurité figurant dans l'article 2 de la déclaration des Droits de l'homme et du Citoyen du 28 août 1789 « le but de toute association politique est la conservation des droits naturels et imprescriptibles de l'homme. Ces droits sont la liberté, la propriété, la sûreté et la résistance à l'oppression ». L'article 26 de la constitution française de 1793 stipule que « les secours publics sont une dette sacrée ».

La notion de risques naturels se substitue à celle de calamité agricole dans le courant du XXe siècle et la question des risques prend une place importante dans le domaine politique notamment quand en 1982 le volcanologue Haroun Tazieff est nommé Délégué aux Risques naturels majeurs. A la même date le législateur caractérise l'état de catastrophe naturelle. Une garantie « catastrophe naturelle » sous la forme d'une surprime pour tous les assurés s'ajoute alors aux contrats d'assurances déjà existants. L'Etat crée aussi un fonds de réassurance par le biais de la caisse centrale de réassurances.

Ainsi, au XXème siècle l'exigence de la sécurité ne cesse d'augmenter dans la société française. Face aux risques la société développe des dispositifs de prévision, de prévention et de protection. Elle multiplie les réglementations qui se traduisent par des types d'aménagement et de gestion de l'espace destinés à réduire les dangers.

Le risque se définit par rapport à l'aléa. Un aléa qui affecte un espace vide ne provoque pas de victimes et ne fait pas de dégâts, il ne peut être considéré comme un risque. La notion de risque est avant tout sociale. Le risque est l'aléa perçu, vécu comme dangereux par les populations qui subissent le processus physique. L'aléa peut parfois ne pas être perçu comme dangereux, il peut être accepté par les populations comme une fatalité, on ne peut alors parler de risque. Comment dès lors, gérer l'aléa ? Puisque cela nécessite que les populations le connaissent, le vivent comme dangereux. En précurseur Jean-Jacques Rousseau, philosophe de l'Epoque des Lumières écrit dans sa lettre à Voltaire après le grand séisme de Lisbonne de 1755 « ce n'est qu'à Lisbonne que l'on s'émeut des tremblements de terre, alors que l'on en peut douter qu'il s'en forme aussi dans les déserts. Convenez que la nature n'avait point rassemblé là vingt mille maisons de cinq à six étages et que, si les habitants de cette grande ville eussent été dispersés plus également et plus légèrement logés, le dégât eût été beaucoup moindre et peut-être nul ». Jean Jacques Rousseau rompt ainsi radicalement avec l'idée que la

nature, émanation divine, est seule responsable de toutes les calamités ; il affirme que l'homme et la société sont capables d'agir sur leur destin. Jean-Jacques Rousseau laïcise l'aléa et le risque.

La manière dont une société perçoit les risques, évolue en fonction du rapport qu'elle entretient avec son environnement. Ce rapport intervient dans la définition de seuil d'acceptabilité du risque sachant que le risque zéro n'existe pas et qu'il faut accepter un degré de danger possible. Ainsi à la suite d'avalanches, ou d'épisodes volcaniques, certains habitants quittent les lieux exposés car pour eux le seuil d'acceptabilité est franchi tandis que d'autres demeurent, soit parce qu'ils ne peuvent faire autrement, soit parce qu'ils considèrent que le seuil de l'inacceptable n'est pas atteint. Ces seuils ne sont pas permanents, ils varient avec l'époque, avec le degré de développement de la société.

II-LA VARIETE DES ALEAS ET LES RISQUES ASSOCIES

Etablir une typologie des aléas consiste à définir les espaces dangereux à la surface de la planète. Plusieurs classifications des aléas existent. On peut ainsi distinguer ceux qui correspondent à des aléas purement naturels, séismes, cyclones tropicaux, volcans et ceux qui résultent d'aléas naturels aggravés par les activités humaines (mouvements de terrain, inondations, incendies, désertification, érosion accélérée des sols). Il existe par ailleurs des risques technologiques liés à l'industrialisation, à l'urbanisation, aux transports... qui affectent à des degrés divers les composantes du géosystème (eau, air, végétation, sols...) et peuvent donc être source de risque à forte dimension naturelle..

Des aléas potentiellement très violents ou très dommageables pour les populations constituent les « risques » majeurs. (séismes, cyclones) mais cela signifie-t-il qu'existent des risques d'ampleur moindre ? Certains auteurs opposent ainsi un fort séisme et les effets de la désertification. Certes les conséquences du premier comme en témoigne l'exemple récent d'Haïti peuvent être catastrophiques, mais les conséquences de la désertification plus longues à s'exprimer, affectent à terme un nombre de personnes souvent bien plus important que le séisme le plus dramatique. La différence entre les deux types de risque ne provient-elle pas de la plus ou moins grande médiatisation des deux événements ? Les événements définis comme risques majeurs, les lahars d'Armero en 1985 (Colombie), les inondations du Bangladesh (1974), le tsunami d'Indonésie (2004) ou le séisme d'Haïti (2010) sont particulièrement impressionnants par le nombre de victimes qu'ils ont provoquées, ils sont aussi très médiatisés ; ce n'est pas le cas du risque diffus, plus difficile à saisir, tel que la désertification.

Aléa et risques associés peuvent aussi se distinguer selon leur impact spatial. On distingue des aléas ponctuels et d'autres qui s'exercent sur de vastes superficies, régionale voire planétaire (changement climatique). Les aléas dus à une éruption volcanique peuvent demeurer très localisés tandis que l'impact d'un cyclone ou la désertification affectent de vastes espaces.

Le danger peut être brutal, bref, intense ou se manifester sur la longue durée, plusieurs mois, plusieurs années. Il peut survenir de manière récurrente au cours de certaines saisons (c'est le cas des cyclones), bien que son déroulement demeure aléatoire. Or, même dans ce

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

cas le calcul de probabilité permet de définir des temps de retour décennal, centennal, millénaire. Ces résultats ne sont fiables que s'ils sont acquis à partir de longues séries d'événements survenus dans le même lieu. Ce qui nécessite un travail d'historien pour reconstituer avec précision les événements passés.

Il est donc possible d'analyser le risque en fonction de l'intensité et de la fréquence potentielles des aléas. Les événements plus rares sont souvent à l'origine du plus grand nombre de dégâts ou des victimes, les processus les plus fréquents sont de moindre intensité, ils sont aussi les mieux connus et généralement ils ont des effets plus réduits. Cependant ce type de relation demande à être nuancé. Un événement de faible intensité peut provoquer beaucoup plus de dégâts si de nombreux aménagements sont exposés. En outre, la comparaison de deux séismes de magnitude proche, celui de Loma Prieta en Californie en 1969 (magnitude 7,1) et celui de Spitak en Arménie(1988, magnitude 6,9) est très parlante. Lors du premier il y a eu 62 morts, 12000 personnes se trouvèrent sans abri et plus de 18000 bâtiments furent endommagés. Le coût du séisme a été évalué à 6 milliards de dollars. Les dégâts les plus importants ont touché les ponts et quelques immeubles. Le second a rayé de la carte les villes de Leninakan et de Spitak. Il a provoqué au moins 100 000 victimes, fait 514 000 sans abri. De grands dommages ont été causés à l'économie nationale. Des écoles, des hôpitaux, des musées ou monuments historiques ont été détruits ou sérieusement endommagés. Ces situations témoignent du fait que l'aléa ne suffit pas pour envisager l'ampleur du risque. Il faut aussi considérer ce qui est exposé, et comment la société prépare la survenue d'un événement de forte intensité.

Les aléas d'origine géologique, atmosphérique et hydrologique affectent des secteurs spécifiques à la surface de la planète. Ainsi les séismes et les volcans parfois associés, concernent des domaines clairement identifiables que la tectonique des plaques justifie : domaine péripacifique, sud de l'Eurasie et Maghreb. Les cyclones balaient la partie occidentale des océans tropicaux, les tempêtes la façade atlantique de l'Europe. Les sécheresses marquent préférentiellement les secteurs semi-arides, mais peut survenir aussi dans l'espace méditerranéen et plus largement aux moyennes latitudes.. et les avalanches affectent la montagne. Les mouvements de terrain, l'érosion de sols peuvent survenir à peu près n'importe où pour peu qu'existent une pente même faible, un couvert végétal ouvert, et que les quantités d'eau et de matériaux mobilisable (roches ou sol) le permettent.

Il est nécessaire de distinguer risques et catastrophes. La catastrophe est le danger devenu réalité. Chronologiquement le risque précède la catastrophe mais en pratique la catastrophe contribue souvent à révéler le risque. Même connu le risque n'est vraiment pris en compte qu'après qu'ait eu lieu une crise ou une catastrophe. Les catastrophes liées à des aléas naturels ont marqué à des degrés divers l'histoire de l'humanité. Les légendes et les

croyanances sont nombreuses qui, pour faire face aux peurs associées aux catastrophes intègrent des forces « surnaturelles », des mythes pour expliquer les conséquences de tels événements. Les pertes humaines dues aux catastrophes sont variables au cours des années, globalement elles ont progressé au cours de la deuxième moitié du XXe siècle à l'échelle planétaire. Cela résulte de la concentration de population en ville, dans les espaces dangereux, les littoraux et les bords de cours d'eau notamment. Les pertes économiques augmentent aussi beaucoup dans le même temps en raison surtout de l'importance des biens exposés et assurés (seuls ceux-là sont pris en compte dans la comptabilité de la société de réassurances Munich Ré). Les pertes financières et les pertes humaines ne concernent pas les mêmes espaces, les premières affectent surtout les pays riches, les secondes les pays pauvres (l'Inde, la Chine, l'Amérique tropicale).

Définir une catastrophe est difficile. Quels seuils permettent de parler de catastrophe ? A. Dauphiné (2001) propose une échelle des catastrophes selon le nombre de victimes, les pertes financières et les pertes écologiques, il distingue les accidents, les désastres, les catastrophes, les catastrophes majeures et les super-catastrophes.

III- LA PLACE ENCORE CONSIDERABLE ACCORDEE A L'ALEA

Les aléas ont fait et font encore l'objet de nombreux travaux, soit sur le terrain, soit en termes de modélisation.. Nous n'insisterons pas sur ce volet aléa, le mieux connu et le plus étudié en général. Nous en rappellerons quelques aspects importants à partir de l'exemple des inondations lentes en région parisienne.

L'aléa inondation est un processus naturel, lié à des précipitations importantes responsables de la montée d'un cours d'eau qui sort du lit mineur, pour s'étaler dans son lit majeur. Ce phénomène se caractérise par son intensité et sa fréquence. On distingue des inondations fréquentes d'intensité faible dont les effets sont généralement assez bien maîtrisés et des inondations plus rares et de grande ampleur dont les conséquences sont beaucoup plus importantes et plus difficiles à envisager (tableau n°1) (tableau n°2)

Tableau n°1 Les données quantitatives sur les cours d'eau

En France, les données quantitatives mesurées dans les cours d'eau (4500 stations de mesure) et les calculs hydrologiques associés sont capitalisés au sein d'HYDRO, la banque nationale de données pour l'hydrométrie et l'hydrologie. C'est la base de données de référence qui permet le stockage et l'archivage, en un lieu unique, de l'ensemble des données concernant les eaux de surface. Cette base est consultable sur Internet sur le site www.hydro.eaufrance.fr. Les données d'HYDRO sont utilisées pour une grande variété d'usages.

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

Tableau n° 2 Différents aléas (modéré, fort) , crues lentes et rapides

Hauteur d'eau	Crue lente	Crue semi-rapide	Crue torrentielle
< 0,5 m	MODERE	MODERE	MODERE à FORT
Entre 0,5 m et 1 m	MODERE	FORT	FORT
> 1m	FORT	FORT	FORT

Le bassin versant de la Seine bordé de hauts plateaux et de collines (Morvan, plateau de Langres...) est composé de roches variées, inégalement perméables. Les calcaires ou la craie très représentés dans le bassin (calcaire de Brie, de Beauce, craie de Champagne...), sont favorables à l'infiltration à condition toutefois que les sols permettent celle-ci. Or, en raison des modes de culture, des calendriers culturels de la grande agriculture (céréales, betteraves...), les sols laissés nus plusieurs mois sont parfois affectés par la battance qui s'accompagne d'une très faible infiltration.

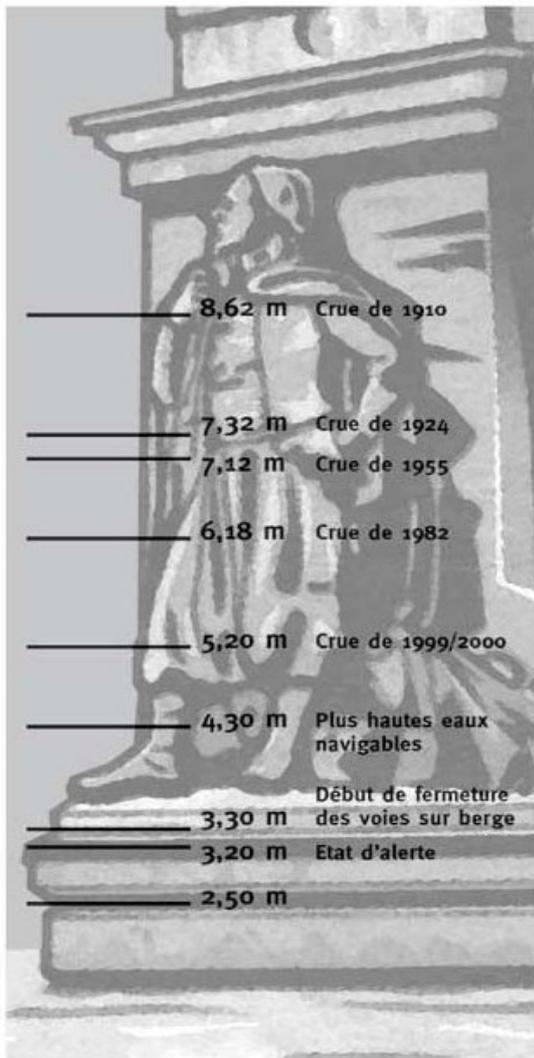
Les crues de la Seine à la différence des crues méditerranéennes, sont lentes, en relation avec les spécificités du climat océanique qui prévaut dans le bassin. Elles sont généralement associées aux trains de perturbations qui se succèdent en hiver et au printemps (entre décembre et mars).

Chaque affluent de la Seine a des caractéristiques propres. En cas de fortes pluies sur le bassin de l'Yonne, l'onde de crue met 5 à 6 jours pour parvenir en région parisienne depuis le Morvan, alors qu'il faut environ 8 jours pour que la crue de la Marne supérieure, de l'Aisne et de l'Oise atteigne la Seine. Dans la plupart des cas, les différents affluents et la Seine elle-même sont en crue de manière indépendante, il n'y a pas superposition des ondes de crues des affluents et du fleuve. Mais, quand il y a concomitance, une très forte crue peut se produire comme celles de 1924, de 1955 et surtout celle de 1910. La crue de 1910 correspond à la conjonction d'une crue centennale sur la Seine amont, une crue de période de retour de 150 ans sur l'Yonne et de 60 ans sur la Marne. Les crues de 1924 et 1955 correspondent à la conjonction d'ondes de crue de période de retour moindre (de 20 à 50 ans).

Par convention, on nomme "crue majeure" de la Seine, une crue de l'ordre de 6 mètres ou plus à l'échelle de Paris – pont d'Austerlitz, elle correspond à une période de retour au moins décennale. La crue de 7 à 8 mètres ou davantage, à l'échelle de Paris- Austerlitz a une fréquence cinquantennale, centennale ou plus, elle est dite exceptionnelle. Des crues de plus de 8 m au Pont d'Austerlitz se sont déroulées en 1658, en 1740, celle de 1910, à atteint 8, 63 m. Les crues supérieures à 5 m qui sont surtout responsables de problèmes de circulation sur les voies routières construites en bordure du fleuve sont dites « crues moyennes » (**tableau n°2) (photo n°1)**

Tableau n°3 Les crues récentes, exceptionnelle ou majeure de la Seine en Ile -de -France

1910	8,63 crue centennale	2400 m3/s
1924	7,30 crue cinquantennale	2100 m3/s
1955	7,12m crue cinquantennale	2120 m3/s
1945	6,85 crue décennale	1990m3/s
1982	6,18m crue décennale	1800 m3/s
2001	5,21 crue quinquennale	1510 m3/s



5,50 m activation du centre opérationnel zonal

3,20 m seuil d'alerte, début de la fermeture des voies sur berge

2,50 m seuil de vigilance

Photo n°1 L'indicateur de crue à paris. Le Zouave du Pont de l'Alma.

La connaissance des événements passés est fondamentale pour envisager les temps de retour t pour fixer, en fonction des données historiques, la ligne de plus hautes eaux connues (LHEC) utilisée pour établir la hauteur des digues et le zonage des plans de prévention des risques.(fig n°1)

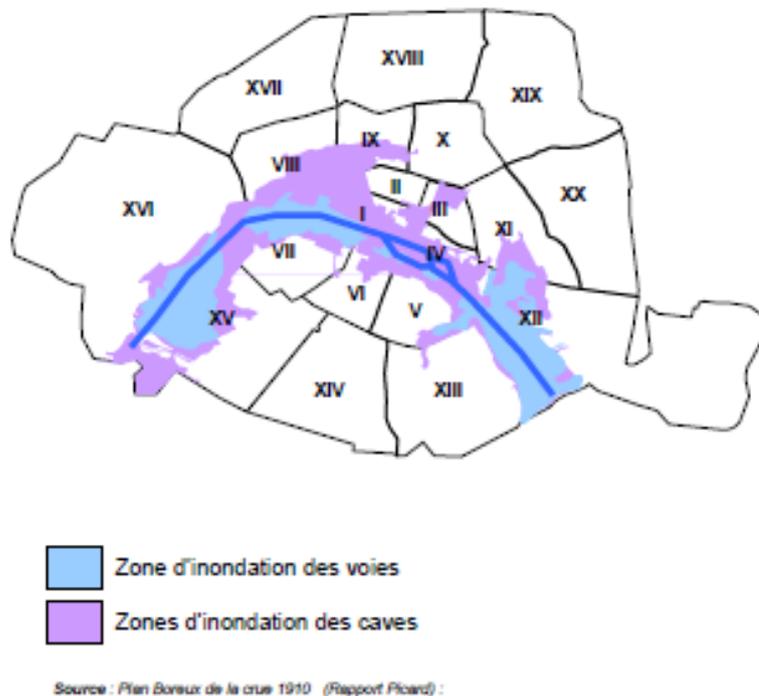


Fig n° 1 Les surfaces inondées à Paris en 1910

La compréhension du fonctionnement de l'aléa a été pendant longtemps considérée comme suffisante pour gérer l'inondation. En fait si cette connaissance est indispensable, elle ne suffit pas pour maîtriser le risque et le gérer. La vulnérabilité constitue un aspect majeur de la compréhension du risque et de sa gestion.

IV LA VULNERABILITE

La vulnérabilité des mégapoles ; exemple de la région capitale

La vulnérabilité est en France une notion assez récente qui met l'accent sur les enjeux, les biens et les personnes exposés à l'aléa, sur les modes de gestion des risques pour réduire l'effet des crises..

On peut ainsi envisager quelques facteurs de vulnérabilité (tableau n°4)

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

Tableau n°4 Quelques facteurs de vulnérabilité

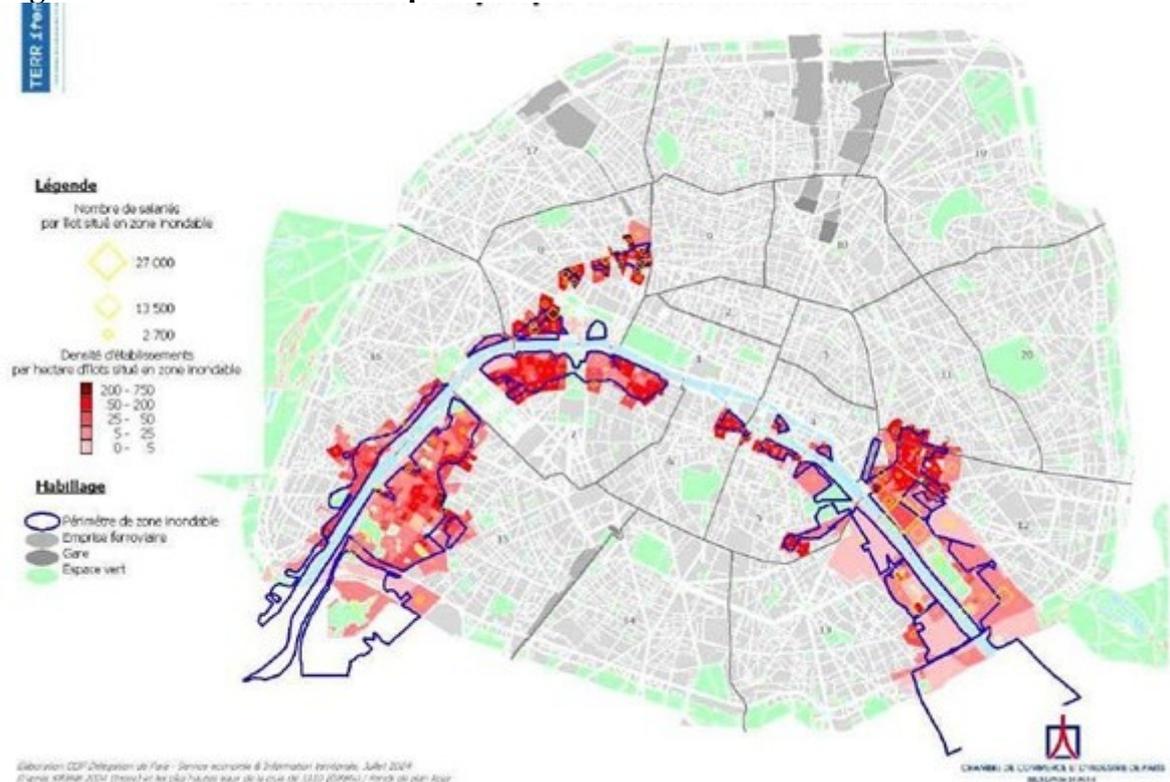
La densité de population, l'extension du bâti
Facteurs techniques (quelques exemples parmi beaucoup d'autres) Mauvaise qualité de la construction Mauvaise maîtrise de l'eau Sous-dimensionnement des ouvrages d'évacuation et de traitement des eaux usées Absence d'utilisation de normes anti-sismiques de construction
Facteurs économiques Population pauvre, dépourvue de moyens de transports et souvent de système d'information Habitat de médiocre qualité (bidonville) Activités économiques installées dans des zones à risque sans véritable politique de prévention.
Facteurs culturels Ignorance du danger, absence de conscience du risque (risque banalisé, intégré au quotidien) Acceptation pour raisons religieuses Difficulté à laisser les maigres biens que la population possède (refus de l'évacuation)
Facteurs institutionnels et politico-administratifs Trop de niveaux politico-administratifs de décision Manque de coordination entre ces différents acteurs Absence de programme de prévention Absence de réflexion sur les programmes de planification Législation laxiste Acteurs politiques, gestionnaires parfois peu impliqués. Corruption
Facteurs fonctionnels Absence d'une prévision efficace Absence de système d'alerte Mauvaise gestion de crise, Mauvaise organisation des aspects techniques et humains
Facteurs spatiaux Intégration des enjeux au système mondialisé Dimension réticulaire (risque induit, risque reporté)

Pour envisager certains de ces éléments, nous prendrons l'exemple de l'inondation en Ile-de-France. Le déroulement d'une inondation de type 1910 aurait aujourd'hui des conséquences considérables sur les populations, l'économie régionale et nationale et l'image de Paris. Peu de solutions efficaces existent pour tenter de réduire les effets d'un tel événement. Si le risque apparaît dans bien des discours, il est souvent considéré par les habitants d'Ile-de-France comme quasi improbable ou comme ne pouvant avoir que des effets réduits, les aménageurs l'évoquent mais les choix d'aménagement font souvent passer les aspects économiques avant la gestion du risque.

S'agissant des secteurs de la ville de Paris et de l'agglomération parisienne soumis au risque d'inondation, **la surveillance permanente** est un enjeu majeur, en effet une inondation de type 1910 affecterait directement environ 170.000 habitants à Paris : caves inondées, interruption de l'électricité...et dans l'ensemble de l'agglomération, 5 millions de personnes seraient diversement concernées. Certaines communes seraient totalement inondées comme Villeneuve-la-Garenne ou Alfortville. Les effets induits ou reportés (effets économiques à plus long terme sur les sous traitants par exemple, y compris ceux qui sont implantés loin de

la zone inondée...) d'un tel événement s'ajoutent aux effets directs. En fait les estimations du coût varient selon les auteurs de 5 à 10 ou 12 milliards d'euros, voire 70 milliards d'euros ! Ces chiffres rappellent que l'inondation en Ile de France affecte une métropole aux fonctions multiples et vitales pour l'économie de notre pays.

Fig n°2 Les activités économiques situées en zone inondable à Paris.



Les inondations à Paris et en Ile de France concernent en effet une agglomération qui concentre diverses fonctions, politiques, économiques, culturelles...(fig n°2). La métropole parisienne est vulnérable en raison de la forte densité de population qui expose au danger un grand nombre de personnes, de la présence de réseaux denses (SNCF, RATP, eau, électricité), de l'existence d'industries, de sites de stockage de produits dangereux. La vulnérabilité dépasse les seuls éléments bâtis, elle s'exprime à d'autres échelles dans la mesure où Paris est intégré à un système économique et d'échanges mondialisé. (tableau n°5)

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

Tableau n°5 Une métropole, espace vulnérable

<p>Une métropole se définit par</p> <ul style="list-style-type: none">*sa taille*sa place centrale dans le réseau urbain, elle est un nœud décisionnel dans un réseau*son caractère de lieu d'impulsion, de créativité, d'émission d'ordre, de connexion de flux*ses fonctions de commandement, de décision, d'encadrement économique et politique (sièges sociaux, place financières, assurances, banques)*la présence de très grandes entreprises*l'importance des infrastructures de transports, internes et externes* la place de la recherche innovation, des laboratoires, des universités,* l'importance de la culture : musées, salles de théâtres, bibliothèques*L'importance des équipements de soins <p>S'agissant de la capitale (Paris et banlieues), elle regroupe 23% des emplois nationaux, 38% des cadres, 40% des professions intellectuelles, 50% des cadres administratifs et commerciaux d'entreprises, plus de la moitié des sièges des grandes entreprises (celles qui ont plus de 500 employés), 100% des entreprises de plus de 1000 salariés ont leur siège social à Paris</p>
--

Une inondation de type de celle de 1910 mettrait en évidence la vulnérabilité du bâti, des réseaux, voire de la population. A la vulnérabilité « dite physique » qui dépend de l'aléa et de la valeur des objets (enjeux) affectés, s'ajoute la vulnérabilité « sociale » intégrant la capacité à faire face au risque et à la crise ; la vulnérabilité prend en compte les modes d'adaptation possible et les aspects de la résilience, définie comme la capacité de tout ou partie d'un système à réagir au déroulement d'un aléa afin que ce système puisse recommencer à fonctionner dans les meilleures conditions..

Une crue du type de celle de 1910 pourrait paralyser l'économie. Les services postaux, les banques, la distribution alimentaire, celle de l'eau ; nombre d'entreprises seraient affectées pour lesquelles, la Chambre de commerce et d'industrie de Paris a mis en ligne un certain nombre d'informations et de conseils pour le cas où surviendrait l'inondation.

A Paris et en région parisienne, plusieurs monuments historiques se situent en zone inondable c'est le cas du Louvre par exemple. La Présidence de la République, l'Assemblée Nationale, des ministères seraient affectés comme la Cour des Comptes, le Conseil d'État, le Conseil Supérieur de l'Audiovisuel, la Commission des Opérations de Bourses, ..., ainsi que de nombreux services déconcentrés de l'État (Commissariats de police..). Des hôpitaux, divers établissements de soin, des lieux d'hébergement des personnes âgées et handicapées seraient également affectés ainsi que des écoles, des lycées, des Universités, des bibliothèques...

Les réseaux de transports de la SNCF, de la RATP pourraient aussi être touchés : trois gares (Saint-Lazare, Lyon, et Austerlitz), de nombreuses stations du métropolitain et jusqu'à l'héliport de Paris- Issy-les-Moulineaux qui seraient pour partie au moins menacés.

On admet que la crue centennale priverait d'électricité plus de 2 millions et demi de franciliens, 4 millions manqueraient d'eau, de gaz, de téléphone, de chauffage ; des perturbations se produiraient dans l'alimentation en eau potable, des remontées d'eaux par les réseaux d'égouts poseraient le problème de l'évacuation des eaux usées. Qu'en serait-il des déchets (ordures ménagères...) ? (M. Reghezza 2010)

La lenteur de la montée des eaux devrait permettre de déplacer toutes les personnes qui vivent, travaillent ou sont hospitalisées dans les secteurs susceptibles d'être inondés. Cependant la crue affectera aussi les particuliers qui n'habitent pas directement en zone inondable, en provoquant des difficultés de déplacement en raison des voies de circulation coupées, des coupures d'électricité.

Les dommages environnementaux ne sont pas à exclure, l'inondation de secteurs industriels ou de stockage pourrait provoquer la pollution des eaux de surface, des eaux souterraines, des sols, et pourrait avoir des effets sur la végétation.

Une analyse de la vulnérabilité devrait aider les communes à, intégrer les spécificités de leur territoire dans leur politique de gestion des risques. Cela pourrait se traduire par d'autres modes de construction qui réduiraient la vulnérabilité des bâtiments, et par une réflexion sur la manière d'intégrer les plans de secours en amont des projets urbains.

V- COMMENT REDUIRE LES RISQUES?

Les solutions sont multiples, elles vont de la protection, à la prévention, en passant par l'information. Outre l'invocation de la clémence divine, la lutte contre les inondations a été depuis longtemps envisagée dans le cadre de la protection, la réduction des effets de l'aléa. Pour ce faire des digues ont été très tôt construites avant que ne soient implantés des barrages. La gestion était le fait des ingénieurs, ce qui explique encore aujourd'hui la vision techniciste souvent présente dans la gestion du risque.

1-Ancienneté de la protection, implantation de digues de protection

Que l'on prenne le cas de la Loire, de la Marne et de la Seine, ou d'autres cours d'eau français, leurs vallées ont depuis longtemps été protégées (depuis au moins le Xème siècle sur la Loire) par des systèmes de digues. Ces ouvrages qui nécessitent de fréquents travaux d'entretien, ne sont cependant pas présents partout. En outre, ces murettes, efficaces pour des crues moyennes, seraient dans bien des secteurs de la Seine et de la Marne submergées si survenait une crue de type 1910 et l'on peut craindre des ruptures de digues entraînant à l'aval, une montée rapide des eaux comme ce fut le cas en 1856 et en 1866 sur la Loire..

Des barrages ont également été implantés. Dans le bassin de la Seine existent 6 barrages, : Pannecièrre (1949) , Seine (1966), Marne (1974), Aube (1990), auxquels s'ajoutent dans le Morvan deux barrages gérés par Electricité de France (EDF), Chaumeçon et Crescent L'Institution interdépartementale des barrages-réservoirs du bassin de la Seine (IIBRBS) s'occupe de la gestion et de l'entretien des ouvrages dont elle a la responsabilité. Les barrages-réservoirs du bassin de la Seine, qui concernent seulement 17% du bassin versant, assurent deux fonctions, le soutien d'étiage (70 m³ /s à Paris), notamment pour l'alimentation

en eau potable et l'écroulement des crues. Pour les crues petites ou moyennes, ce rôle écrêteur n'est pas négligeable, il n'en est pas de même pour de très grosses crues. La capacité totale des barrages est de 870 millions de mètres cubes, ce qui correspond à peu près à la quantité d'eau qui est passée à Paris en 4 jours lors de la crue de 1910 dont le volume est estimé à 7 milliards de mètres cube écoulés en deux mois. Or, depuis 1910 l'imperméabilisation des bassins versants a accru les volumes ruisselés et les débits de pointe, elle se conjugue à la réduction des champs d'expansion des crues qui jouaient aussi un rôle écrêteur.

Pourtant L'Institution interdépartementale des barrages-réservoirs du bassin de la Seine (IIBRBS) envisage de réaliser à la Bassée entre Montereau, Fault-Yonne et Mery-sur-Seine, à 100 km de Paris, des unités de stockage, de type « polder », d'une capacité de 55 millions de m³ et qui seraient remplies par pompage lors des fortes crues de l'Yonne. La Bassée, vaste de 2300 hectares est traditionnellement un lieu d'expansion des crues. Son aménagement qui impliquerait la construction de près de 60 km de digues en terre, permettrait de réduire de 20 à 60 cm la hauteur d'eau lors d'une forte crue. Ainsi les communes d'Ivry et d'Alfortville seraient vraisemblablement mises hors d'eau pour les crues de type 1910 ; la ligne C du RER, à Paris, serait partiellement protégée.

Les types d'aménagements évoqués ont permis au fil du temps de protéger certains biens et la population, mais leur efficacité a été toute relative lors de la crue de 1910. En fait, construire des **barrages et des digues rassure la population mais augmente sa vulnérabilité (fig n°2)**. Généralement la fausse sécurité que génèrent ces constructions conduit à s'installer dans les secteurs à risques en les considérant comme hors de danger en raison des aménagements évoqués, mais les digues peuvent être soit submergées, soit défoncées et les barrages sont loin de tout régler notamment en cas de très forte crue.

Il est très difficile de passer de la lutte contre l'aléa à la prise en compte de la vulnérabilité. L'accent a longtemps été mis et le demeure encore sur la seule tentative de maîtrise de l'aléa par des mesures techniques. L'action sur l'aléa est encore envisagée comme plus scientifique, plus visible aussi pour la population concernée et plus « payantes » pour les élus, Pourtant, d'autres approches prévalent désormais et doivent être largement diffusées et utilisées, il s'agit en particulier de la prévention et de l'information

2-L'information préventive

L'information préventive a pour but de prévenir le citoyen des risques qu'il encourt en certains points du territoire et de l'informer sur les mesures de sauvegarde pour s'en protéger, en application du droit à l'information tel que défini par l'article 21 de la loi du 22 juillet 1987. L'information est d'abord le fait de l'Etat par le biais de ses services déconcentrés et des mairies. Le maire doit organiser des réunions pour expliquer le risque. Développer une culture du risque en maintenant la mémoire des événements passés (pose des marqueurs indiquant les hauteurs d'eau atteintes par les crues précédentes) est indispensable.

Les services des préfetures doivent établir un **Dossier Départemental des Risques Majeurs (DDRM)** recensant les risques et les zones à risque du département. Ce dossier est mis à jour régulièrement. A partir de ce document, doit être établi le **Dossier Communal Synthétique (DCS)** qui présente les risques naturels et technologiques encourus par les habitants de chaque commune à risque. Consultable en mairie, ce dossier a pour objectif d'informer et de sensibiliser les citoyens. Sur la base du DCS, le maire est dans l'obligation de réaliser le **Dossier d'Information Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM)**. Ce dernier énonce les mesures de prévention prises par la commune, elles doivent être adressées aux principaux

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

acteurs du risque majeur de la commune et faire l'objet de publicité auprès des citoyens. Les services de la préfecture du Val de Marne par exemple ont établi dès 1995 un DDRM, tandis que le maire de Vitry sur Seine a établi le DICRIM. Grâce au DICRIM, la population doit savoir quel comportement avoir en cas de crise.(tableau n°6)

Depuis le 1er juin 2006, les propriétaires d'un bien immobilier dans une zone exposée à des risques naturels doivent fournir aux acquéreurs et locataires un état des risques naturels et des sinistres pour lesquels ils ont été indemnisés.

L'information passe aussi par la connaissance de l'aléa permise par la réalisation d'atlas des zones inondables, sans valeur juridique mais en principe aisément consultables et qui permettent de disposer d'information sur l'ampleur du risque.

Tableau n° 6 le DICRIM de la commune de Vitry-sur-Seine

Consignes de sécurité aux populations ex de Vitry-sur-Seine

DICRIM *Ville de Vitry-sur-Seine*

11 août 2006

Les consignes de sécurité :

Avant

- S'informer des risques encourus et des consignes
- Disposer d'un poste de radio à piles
- Prévoir les actions et le matériel nécessaire pour la protection de l'habitation : par exemple, de quoi surélever les meubles, de quoi amarrer les objets qui pourraient flotter, une réserve d'eau de Javel pour désinfecter après la crue...)

A l'annonce de la crue

- Ecouter la radio (France Inter 87.8MHz ou France Info

105.5MHz) et attendre les consignes des autorités

Pour se tenir au courant de l'évolution de la situation

- Couper l'électricité et le gaz *Pour éviter électrocution et explosion*
- Fermer les portes, fenêtres, soupiraux, aérations... *Pour ralentir l'entrée de l'eau et limiter les dégâts*
- Amarrer les objet susceptibles d'être emportés, surélever

les meubles ou les monter dans les étages *Pour minimiser les dégâts*

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

- Ne pas prendre l'ascenseur. *Pour éviter de rester bloqué*
- Monter dans les étages avec : eau potable, vivres, radio à piles, lampe de poche, piles de rechange, vêtements chauds et surtout papiers d'identité, argent et médicaments pour une éventuelle évacuation.

Pour attendre les secours dans les meilleures conditions

- Ne pas aller à pied ni en voiture dans une zone inondée. *Pour ne pas aller au devant du danger*

Après

- Inspecter soigneusement le bâtiment, faire appel à un expert en cas de fissures ou de doute sur la solidité des structures. En général, se conformer à l'avis des services de secours.
- Nettoyer les parties inondées visibles à l'eau javellisée.
- Ne faire remettre l'électricité et le gaz qu'après la vérification de l'installation par un professionnel.
- Continuer à utiliser de l'eau embouteillée pour l'alimentation en eau potable jusqu'à avis positif des autorités sanitaires
- Sécher : Ventiler les pièces et faire appel à une société spécialisée « assèchement » ou « traitement de l'humidité »
- Ne pas engager trop tôt des travaux de remise en état : l'eau contenue dans les matériaux mettra un certain temps à s'évaporer ; les travaux qui auraient déjà été réalisés seront probablement dégradés par l'évaporation ; ces dégâts ne seront pas pris en charge par votre assurance

3-La prévention

En dépit d'une connaissance de plus en plus fine de l'aléa (histoire, fréquence...), le risque demeure très présent et dans la plupart des cas, les effets des événements de forte intensité sont plus importants que dans le passé, la raison de cette situation tient à l'augmentation de la vulnérabilité, à la multiplication des constructions en zone inondable, ce dont témoignent les vallées d'Ile de France. A côté et au-delà de la protection, la prévention consiste à prendre en compte le risque dans les politiques d'aménagement et d'urbanisme (tableau n°7).

Tableau n°7 Les textes réglementaires de traitement du risque

Plan de surface submersible (décret-loi 1935) Assurer le libre écoulement des eaux et de préserver les champs d'inondation.

Périmètre R.111-3 :(1955), l'article R. 111-3 du Code de l'Urbanisme permet au préfet de délimiter par arrêté un périmètre de risques à l'intérieur duquel le permis de construire et les autres autorisations d'occuper le sol peuvent être refusés ou autorisés en les subordonnant à des conditions spéciales.

Plan d'exposition aux risques (PER) : (loi du 13 juillet 1982 relative à

l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles). Ce plan détermine les zones exposées à un risque majeur et les techniques de prévention qui doivent être mises en oeuvre. Il constitue une servitude d'utilité publique qui s'impose aux documents d'urbanisme et aux autorisations d'occupation du sol.

La loi du 22 juillet 1987 et son décret d'application (décret n° 90-918 du 11 octobre 1990) Information des citoyens sur les risques naturels auxquels ils sont exposés.

Plans de Prévention des Risques : Le PPR a été institué par la loi n° 95-101 du 2 février 1995, en remplacement des PER, PSS et des périmètres de l'article R.111-3. Le PPR est élaboré et mis en application par l'État en prévention des risques naturels prévisibles. Une fois approuvé par arrêté préfectoral, le PPR vaut servitude d'utilité publique et est annexé au Plan local d'urbanisme (PLU).

Loi de 2003, loi Bachelot : affirmation de l'importance de la prévention et de l'information en matière de risques naturels

Loi de 2006 loi sur l'eau et les milieux aquatiques.

Directive européenne 2007 relative à l'évaluation et la gestion des risques d'inondation. Elle doit être transposée en droit français en 2009

Le PPRI permet de déterminer les zones de dangers (carte des aléas) et les zones de précaution où en fonction de la gravité du danger pourront être interdits tous nouveaux aménagements, toutes constructions et où des restrictions spécifiques seront aussi imposées aux nouvelles constructions, ainsi qu'aux constructions et aménagements préexistants.

L'arrêté émis par le préfet qui prescrit le PPR indique la nature du risque, le périmètre concerné, les services chargés d'instruire le projet. Cet arrêté est notifié aux maires et aux présidents des Etablissements publics de coopération intercommunale (EPCI), il est affiché. Le projet de plan est soumis à enquête publique. Quand le PPR est approuvé, il vaut alors servitude d'utilité publique et doit être annexé au Plans locaux d'urbanisme (PLU), les servitudes résultant de ce plan ne sont pas indemnisables (fig n°3) (fig n°4).

Le plan est composé d'une carte d'aléa, d'une carte de zonage et d'un règlement précisant les mesures d'interdiction applicables dans les différentes zones.

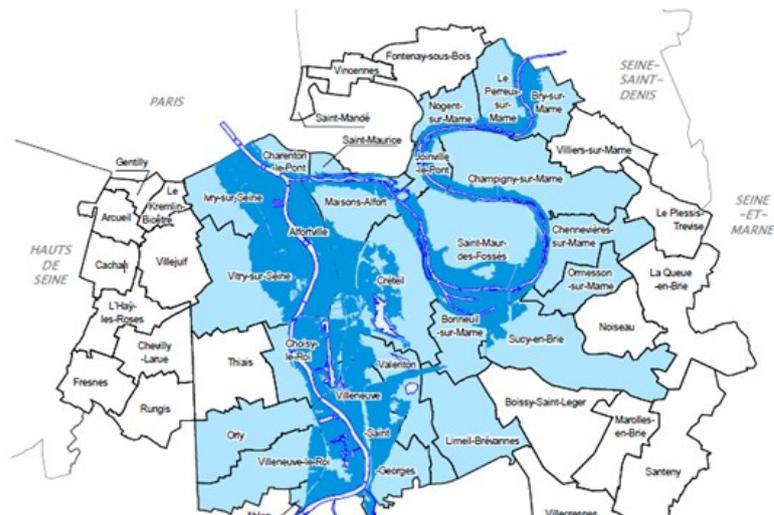


Fig n° 3 L'espace du PPRI du Val de Marne . Source DDE Val-de-Marne)

Bleu foncé espace inondé par l'inondation de 1910

En bleu clair, les communes touchées par l'inondation de 1910

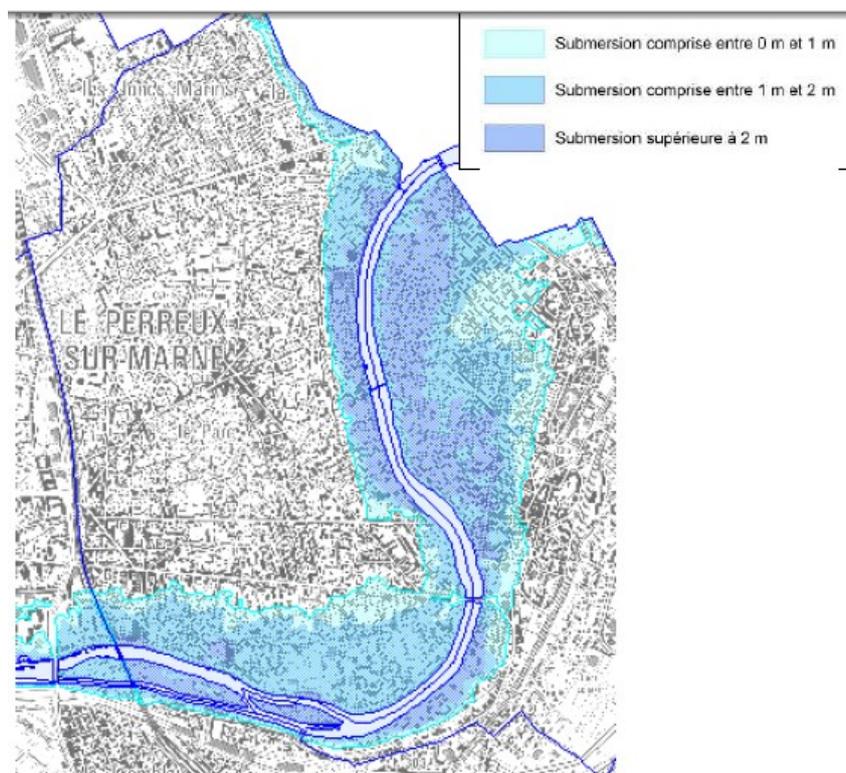


Fig n° 4 Carte de l'aléa inondation Le Perreux-sur Marne (PPRI Val-de -Marne) (site internet DDE Val-de -Marne)

Le PPR du Val de Marne fut, en 1998, le premier prescrit dans la région Ile de France. En effet, 20% du territoire de ce secteur sont inondables si survenait une crue de type 1910. Le

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

zonage a été préparé par la direction départementale de l'équipement selon des indications fournies par la charte régionale réalisée par la Direction régionale de l'équipement et par la direction régionale de l'environnement (DIREN) en 1997 afin de parvenir à homogénéiser les PPR d'Ile de France.

Le PPRI Val- de- Marne a suscité de vigoureuses oppositions. Les premiers conflits ont surgi à propos de la commune d'Alfortville, la carte d'aléa indiquant en effet que la commune est totalement inondable et que les hauteurs d'eau seraient souvent supérieures à 2 m en cas de crue type 1910. Or, les préconisations de la charte régionale reprises dans le PPR limitent voire interdisent dans ces conditions, tout développement de la commune. Le maire a proposé le système du « duplex », pour ne pas empêcher toute nouvelle implantation dans sa commune (**fig n°5 et photo n°2**). L'autorisation de construire au-dessous de la cote de 1910 serait donnée à la condition qu'existe un refuge au-dessus de la cote, système refusé par la DIREN. Le préfet du Val-de-Marne a alors demandé l'arbitrage du préfet de région et finalement la règle du « duplex » a été acceptée (S. Beucher, 2008)

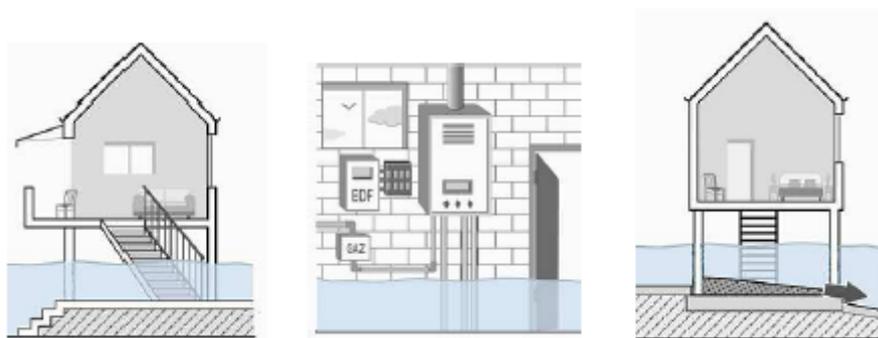


Fig n°5 Les modes de construction en zone inondable. La règle du « duplex » (in site Internet Val-de-Marne.developpement –durable.gouv.fr)



Photo n° 2 adaptation aux inondations, habitat sur pilotis (Val-de Marne) (site Val- de- Marne In Revision des PPRI Val-de-Marne. Site Internet Val-de-Marne. Developpement- durable.gouv.fr)

Le conflit s'est poursuivi lors de l'enquête publique de 2000, il portait sur certains quais et sur les îles habitées et cependant classées en zone rouge parce que ces secteurs correspondent à des zones de grand écoulement où aucune construction n'est impossible. L'objectif du PPR

étant de reconquérir ces territoires comme zones d'expansion des crues. Les communes concernées se sont insurgées, les riverains se sont regroupés en association (les inondables de Choisy, association de lutte pour un PPRI équitable au Perreux-sur-Marne, association pour la protection des riverains et des iliens à Bry sur Marne). Soutenus par des élus, ils ont obtenu la modification des zonages qui désormais semblent difficiles à lire. En effet au lieu des trois couleurs : rouge synonyme d'interdiction de construire, bleu indiquant des aménagements possibles en suivant des prescriptions précises, blanc signifiant l'absence de risque, le zonage réglementaire comprend neuf zones (rouge, orange hachuré de rouge et rouge hachuré d'orange, bleu, violet foncé et clair, orange foncé, vert) (tableau n°8). Il est vrai que les prescriptions sont plus complexes en terrain déjà bâti qu'elles ne le sont en terrain non bâti (S. Beucher 2008).

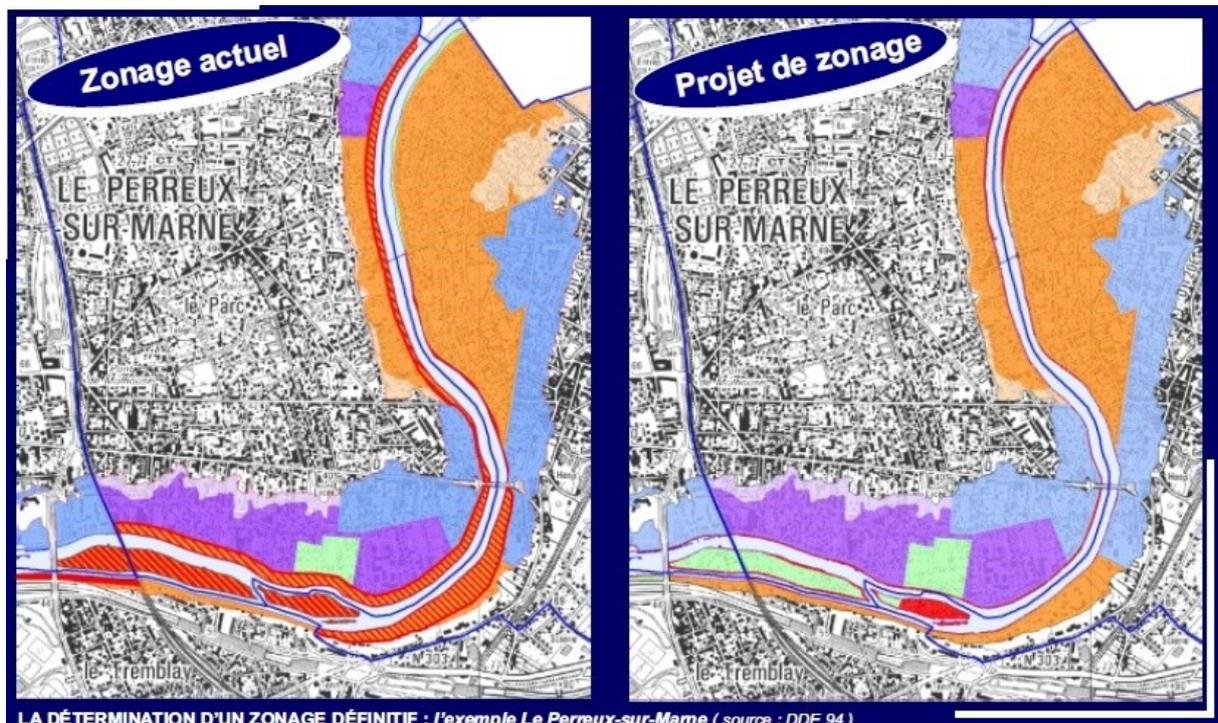


Fig n°6 Carte du PPRI . Commune du Perreux (à gauche, le zonage adopté puis remis en cause , à droite, futur zonage).

Les couleurs des zones

Zone rouge, grand écoulement

Zone verte espace naturels et de loisirs

Zone orange foncé, espaces urbanisés en aléa fort à très fort

Zone orange clair, autres espaces urbanisés et autres aléas

Zone violet foncé, zone urbaine dense en aléas fort à très fort

Zone violet clair, zone urbaine dense en autres aléas

Zone bleu centre urbain

Tableau n°8 Le zonage

Neuf zones ont été distinguées dans le Val –de- Marne . Elles valent pour les autres PPRI:

– Zone rouge, elle correspond aux zones de grand écoulement pas ou peu urbanisées où toute nouvelle construction (hors activité fluviale) est interdite et où les travaux sur l'existant sont strictement encadrés.

– Zones hachurées orange et rouge qui correspondent aux zones de grand écoulement urbanisées.

Ces zones se divisent en en deux :

- la zone rouge hachurée orange qui correspond aux îles situées sensiblement dans l'axe de la rivière et aux berges particulièrement exposées à des inondations très fréquentes. La reconstruction après sinistre d'une surface équivalente y est autorisée sous conditions.

- la zone orange hachurée rouge qui correspond aux autres îles et aux autres berges. Seules les constructions permises en zone orange foncé décrite ci-dessous y sont autorisées.

–Zone bleue, elle correspond aux centres urbains (hors zones de grand écoulement) où les contraintes sont réduites; toutes les constructions sont autorisées sous réserve de prescriptions visant à réduire les risques pour la vie humaine.

– Zone violet foncé qui correspond aux zones urbaines denses (hors zones de grand écoulement) situées en aléas forts ou très forts; dans cette zone, on distingue les constructions diffuses, et les "grandes opérations" où les règles sont plus strictes.

– Zone violet clair, elle correspond aux zones urbaines denses situées en secteur d'autres aléas; les règles y sont voisines de celles de la zone violet foncé.

– Zone orange foncé elle correspond aux autres espaces urbanisés (hors zones de grand écoulement) en aléas forts ou très forts; dans cette zone seule les constructions diffuses sont autorisées avec une exception pour les sites stratégiques, les installations portuaires, ainsi que les Zones d'Aménagement Concerté. d'activités disposant d'un Plan d'Aménagement de Zone. approuvé et dont la réalisation est avancée de façon significative à la date d'approbation du présent P.P.R.I..

– Zone orange clair elle correspond aux autres espaces urbanisés situés en secteur d'autres aléas; les règles y sont voisines de celles de la zone orange foncé.

– Zone verte elle correspond aux espaces naturels ou de loisirs ayant vocation à ne pas être urbanisés et à servir de zone d'expansion des crues; seules les constructions liées aux activités sportives ou de loisir y sont autorisées sous conditions.

Le règlement

Le règlement évoque successivement les règles d'urbanisme, les règles de constructions, les prescriptions d'aménagement et les prescriptions sur les biens et activités existants.

– Règles d'urbanisme :

Cinq principes précisent les prescriptions particulières qui portent notamment sur :

*la nature des constructions qui peuvent être autorisées (avec ou sans prescriptions) ou interdites, en distinguant particulièrement les constructions à usage de logement et les constructions à usage autre que logement ainsi que les établissements sensibles.

*les opérations de constructions nouvelles et d'extension de bâtiments existants.

*l'emprise au sol des bâtiments à construire afin de préserver l'écoulement et l'expansion des eaux.

*la cote de niveau du premier plancher habitable par rapport à la crue cinquantennale et à la crue centennale (P.H.E.C.).

Le règlement introduit la règle du " duplex " qui permet, notamment en centre urbain et en zone urbaine dense, un plancher habitable sous la cote des P.H.E.C. à condition qu'il existe

dans chaque logement un plancher complet habitable au-dessus de la cote des P.H.E.C..

Dans les zones de grand écoulement, les principales prescriptions sont les suivantes :

- Dans la zone rouge toute construction est interdite à l'exception d'extensions limitées à 20 m² pour l'amélioration de l'hygiène des locaux. Les constructions liées à l'activité fluviale sont toutefois autorisées.

- Dans la zone rouge hachurée orange, le règlement est identique à celui de la zone rouge à la différence près que la reconstruction après sinistre y est autorisée sous conditions.

- Dans la zone orange hachurée rouge, le règlement est identique à celui de la zone orange.

Dans la zone verte, seuls les bâtiments liés au fonctionnement des installations sportives et de loisirs sont autorisés ; les planchers habitables doivent être situés au-dessus de la cote des P.H.E.C..

– Règles de construction communes à toutes les zones :

Elles ont pour but d'assurer la pérennité des ouvrages et de permettre le fonctionnement durable des installations :

- sous-sols inondables, stabilité des ouvrages, utilisation de matériaux insensibles à l'eau ;

- appareillages et réseaux de distribution de fluides hors d'eau ou confinés ;

- prévoir une issue au-dessus des P.H.E.C., pour les constructions à usage d'habitation.

– Prescriptions pour l'aménagement des terrains :

Elles visent à conserver le champ d'expansion de la crue et les conditions d'écoulement ainsi qu'à protéger les infrastructures de transport de fluides :

-interdiction des endiguements ;

- interdiction des remblais, sauf mesures compensatoires et, le cas échéant, étude hydraulique;

- obligation de mesures compensatoires et études hydrauliques pour les infrastructures de transport ;

- protection ou mise hors d'eau des réseaux ;

- clôtures et plantations n'entravant pas l'écoulement des eaux ;

- arrimage ou mise hors d'eau des citernes.

– Prescriptions pour les biens et activités existants :

Il s'agit d'empêcher les produits dangereux ou polluants de se disperser, de confiner ou de pouvoir évacuer les objets susceptibles d'être emportés par le courant et d'assurer l'évacuation des véhicules

Sources: PPRI de la Marne et de la Seine dans le département du Val-de-Marne. Notice de présentation Annexé à l'arrêté Préfectoral du 28 juillet 2000

Les PPRI établis dans les secteurs déjà construits devraient éviter une augmentation significative du nombre d'habitants dans les zones soumises aux aléas forts ou très forts. Ils doivent notamment permettre de réglementer strictement les établissements sensibles qui accueillent de façon permanente des personnes non valides, des malades, des personnes âgées ou des enfants. Ils doivent aussi contribuer à ne pas dégrader les conditions d'écoulement et d'expansion des crues.

Pourtant dans les espaces déjà construits, les PPR montrent rapidement leurs limites. Que faire des aménagements soumis aux risques ? Dans le cas d'opérations de restructuration de quartiers, il est nécessaire de mettre les nouvelles surfaces habitables hors d'eau par rapport à la crue de référence ou d'utiliser le système du duplex. Les activités économiques et les établissements non sensibles peuvent être tolérés, le niveau de plancher pouvant se situer sous le niveau de la crue de référence, selon certaines conditions cependant. Aujourd'hui, on sait que l'on ne peut atteindre le risque zéro et qu'il faut apprendre à vivre avec le risque.

L'évolution qui semble se dessiner, paraît aller en Ile-de-France vers l'aménagement des espaces à risques en appliquant cependant des normes de construction spécifiques.

Gérer le risque aujourd'hui revient encore à mettre en avant le paradigme techniciste. La cartographie réglementaire reste avant tout établie par l'aléa. Dans la vallée de la Seine les riverains qui ont contesté le PPRI prescrit en 1998 et qui continuent à douter de l'intérêt d'un PPRI révisé en 2003 et approuvé en 2007 sont certains que seule une politique de construction d'infrastructures lourdes (digues et barrages) réglera la question des inondations. Les services de l'Etat devraient donc, si on écoute ces acteurs, investir dans de nouveaux barrages ou dans des digues... Dans le bassin de la Seine et plus généralement dans l'ensemble des bassins versants français, il est difficile de passer d'une « logique de l'ouvrage » (Descrop et al 1997) à une logique de prévention. Il demeure difficile de raisonner non plus en termes d'aléa mais en termes de vulnérabilité.

Il est vrai que le zonage du PPR ne contraint guère les programmes d'aménagement (S. Beucher thèse 2008). Ainsi, Vitry qui a pourtant mené une politique active d'information des populations en matière d'inondation dans le cadre du plan d'aménagement et de développement durable de la commune, souhaite mettre en valeur plusieurs secteurs de son territoire. Pour ce faire, la commune travaille plus à la réhabilitation des berges de la Seine, à la mise en œuvre d'une trame verte qu'à l'intégration du risque à la politique d'aménagement. Pour Vitry comme pour la plupart des communes riveraines de la Seine, le fleuve constitue désormais un élément de valorisation territoriale qui entre en conflit avec l'idée de risque, aspect qui n'est pas prioritaire dans les choix envisagés, en dépit de son importance. Quelques communes intègrent mieux le risque à leur projet d'aménagement. C'est le cas de Villeneuve le Roi où la moitié de la commune est en zone inondable, des constructions sur pilotis sont envisagées pourvues d'un double réseau d'eau. Un traitement paysager permettrait de ménager des secteurs d'expansion de crue (S. Beucher, op.cité).

Le risque est parfois intégré aux projets d'aménagement dans le but de « légitimer la conquête de certains territoires ». S. Rode (thèse 2009) montre ainsi sur la Loire que dans l'agglomération de Tours, le quartier de la Riche, située entre la Loire et sa digue, véritable marge urbaine où demeurent des populations socialement modestes, est perçu par les habitants de l'agglomération tourangelles comme un « point noir » à résorber. Les pouvoirs publics utilisent l'argument des inondations pour parvenir à intégrer cet espace à des bords de Loire pourvus désormais de l'image positive d'un espace de loisir. Ainsi une Zone d'Aménagement différé ZAD a été créée et la communauté de Tours peut mettre en œuvre un droit de préemption et acquérir la maîtrise foncière d'une partie du site. « Le risque participe, souligne S. Rode, des stratégies d'exercice du pouvoir, il est mis au service de politiques visant à mieux contrôler le territoire ». (S. Beucher et S. Rode Cybergéo.2009)

De manière générale, la mise en application des PPRI témoigne à la fois de l'importance accordée à la vulnérabilité et des difficultés de prise en compte de cette nouvelle approche, en raison notamment du poids des enjeux économiques du secteur à risque. D'autres approches existent encore pour tenter de mieux gérer le risque.

4- Le risque à l'échelle du bassin versant :

Des Etablissements publics territoriaux de bassin EPTB, aux Programmes d'actions de prévention des inondations PAPI

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

Les EPTB s'inscrivent dans le dispositif de la loi sur l'eau de 1964 qui envisage en France, trois grands types d'acteurs de l'eau : les comités de bassin, les agences financières de bassin (aujourd'hui "agences de l'eau") et des établissements publics pouvant se porter maître d'ouvrage d'opérations à l'échelle du bassin versant ou d'un sous-bassin (fig n°7).



Fig n° 7 les EPTB en France et notamment dans le bassin de la Seine

Ces derniers ou EPTB ont été reconnus comme acteurs légitimes de la gestion des fleuves et rivières et de la prévention des inondations par la loi de 2003. La loi rappelle que «pour faciliter, à l'échelle d'un bassin ou d'un sous-bassin hydrographique, la prévention des inondations et la gestion équilibrée de la ressource en eau ainsi que la préservation et la gestion des zones humides, les collectivités territoriales intéressées et leurs groupements peuvent s'associer au sein d'un établissement public territorial de bassin. Le préfet coordonnateur de bassin délimite, par arrêté et après avis du comité de bassin et des collectivités territoriales concernées et, s'il y a lieu, après avis de la commission locale de l'eau, le périmètre d'intervention de cet établissement public. L'agence de l'eau peut percevoir, à la demande d'un établissement public territorial de bassin et pour le compte de celui-ci, des redevances intégralement reversées au budget de l'établissement public territorial de bassin, déduction faite des frais de gestion. » Trois EPTB existent dans le bassin de la Seine : EPTB Seine, institution interdépartementale des barrages réservoirs du bassin de la Seine—les grands lacs de Seine, EPTB Oise-Aisne, EPTB Marne, d'autres sont en cours de création. Ces

organismes qui travaillent à l'échelle de vastes sous bassins tentent de développer les solidarités amont-aval. Dans le cas de l'EPTB Oise-Aisne, les travaux réalisés relèvent principalement de la restauration des zones d'expansion des crues (J.Y. Bonnard thèse 2006)

Les EPTB sont réunies dans une association dont le but est de promouvoir l'aménagement intégré et le développement durable des bassins versants, de favoriser les échanges d'informations entre EPTB, de permettre le dialogue entre les acteurs concernés par les activités des EPTB. L'association doit aussi être le lien entre les EPTB eux-mêmes et les pouvoirs publics

Les PAPI, une approche globale

Les **programmes d'actions de prévention des inondations (PAPI)** ont pour but de gérer « l'inondabilité » de manière globale, dans une perspective de développement durable. Ils rassemblent l'Etat et les collectivités territoriales autour d'initiatives communes intégrées dans des programmes destinés à réduire les conséquences des inondations. Les EPTB sont des acteurs des PAPI. 42 programmes d'actions ont été retenus en 2004, 15 ont encore vu le jour en 2007. L'Etat, les collectivités territoriales, les communes, les entreprises et les particuliers participent à la mise en œuvre des programmes d'actions de prévention des inondations. (photo n°4). Les programmes d'actions concernent aussi bien les crues dites lentes (crues de plaine ou crues de nappes) que les crues torrentielles. Ils portent sur la :régulation du débit en amont des bassins versants, grâce à la création ou à la restauration des champs d'expansion des crues, l'aménagement hydraulique et la protection des lieux habités, la réduction de la vulnérabilité des constructions établies en zone inondable, les mesures de prévention par les communes et la prévision des crues ainsi que la mise en place de maîtres d'ouvrages agissant à l'échelle des bassins versants. (photo n°4). Ces programmes d'actions préfigurent la mise en œuvre de la directive "inondation" 2007/60/EC du 23 octobre 2007 relative à l'évaluation et la gestion des inondations (tableau n°9)

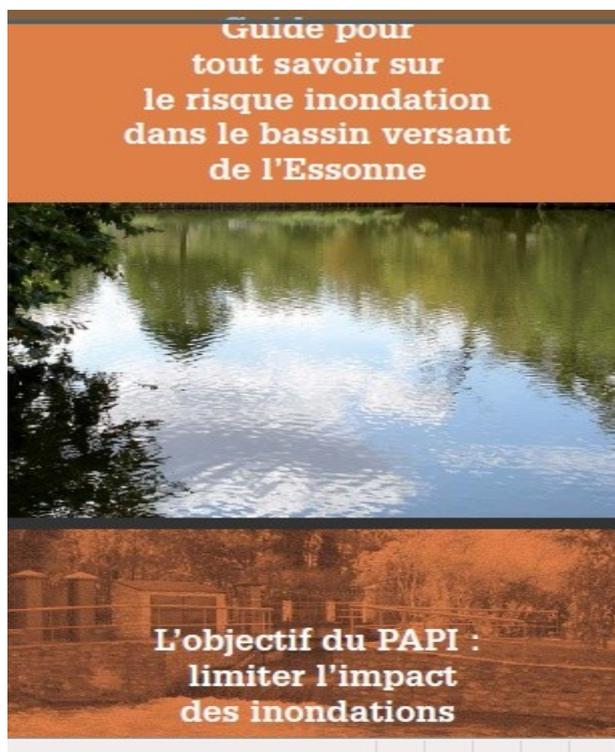


Photo n°4 Un exemple de PAPI

Tableau n°9 La directive européenne sur les inondations

La directive européenne sur les risques d'inondations du 23 octobre 2007

La commission européenne rappelle que les inondations sont un phénomène naturel, qui peut être aggravé par les activités humaines, les pratiques d'aménagement du territoire voire le changement climatique. Depuis 1988 l'Europe a enregistré plus de cent inondations responsables de 700 morts, du déplacement de plus d'un demi-million de personnes et de plus de 25 milliards d'euros de dégâts.

La nouvelle directive consacrée à la gestion des inondations en Europe a été élaborée pour être compatible avec la directive cadre sur l'eau. Tous les types d'inondation sont concernés : crues lentes ou rapides des cours d'eau, crues en zone urbaine ou côtière, conséquences de marées de tempête ou de tsunamis. Cette réglementation a pour but de réduire les risques d'inondation et leurs conséquences négatives dans l'Union européenne. Pour cela, elle impose aux États membres d'envisager une planification à long terme. La mise en œuvre de la directive s'effectuera en trois étapes.

Les États membres doivent d'abord recenser les bassins hydrographiques et les zones côtières à risque. Pour ce faire, seront envisagés la topographie des espaces à risque, l'hydrologie, les inondations passées, l'occupation des sols, les infrastructures artificielles, etc. Cette première étape devrait être réalisée fin 2011.

Les États membres doivent ensuite élaborer pour chaque zone à risque des cartes des secteurs inondables selon l'ampleur possible de l'inondation (faible, moyenne ou forte).

Ces cartes porteront les niveaux que pourrait atteindre l'eau, le débit des crues, les activités économiques qui pourraient être touchées, les installations susceptibles de provoquer une pollution accidentelle, le nombre d'habitants qui serait concerné et les dégâts sur l'environnement pour les différents niveaux d'eau envisagés. Ces cartes doivent être réalisées pour la fin de l'année 2013

Enfin, sur la base de ces cartes, les États membres devront établir des plans de gestion des risques. Il s'agira de réduire les conséquences des inondations pour les populations, l'environnement, le patrimoine culturel et les activités économiques. La prévision des inondations et les systèmes d'alerte précoce seront également envisagés. Des modes durables d'occupation des sols, doivent être envisagés ainsi que l'amélioration de la rétention de l'eau, et l'inondation contrôlée de certaines zones en cas d'épisode de crue. Ces plans de gestion devront être opérationnels fin 2015

Dans le cas de bassins fluviaux internationaux, les États membres doivent se coordonner pour une gestion efficace.

Les États membres ont deux ans pour mettre en vigueur les dispositions législatives, réglementaires et administratives nécessaires pour se conformer à cette directive.

VI- LA GESTION DE CRISE

« Elle n'est pas le seul apanage des préfets et des maires. Chacun doit se préparer à faire face, pour être sûr de minimiser les dommages » néanmoins, le préfet et le maire occupent une position centrale dans la gestion de crise, mais toutes les collectivités sont concernées à des degrés divers. En outre, l'article 4 de la loi de Modernisation de la sécurité civile stipule que « toute personne concourt par son comportement à la sécurité civile. En fonction des situations auxquelles elle est confrontée et dans la mesure de ses possibilités, elle veille à prévenir les services de secours et à prendre les premières dispositions nécessaires ». Sont cités « les exploitants d'un service destiné au public, services d'assainissement, de production ou de distribution d'eau pour la consommation humaine, d'électricité ou de gaz, ainsi que les opérateurs des réseaux de communications électroniques » mais « les exploitants et maîtres d'ouvrage routiers, ferroviaires ou fluviaux ainsi que les exploitants de certaines catégories d'établissement recevant du public » ou encore « des établissements de santé et les établissements médico-sociaux pratiquant un hébergement collectif à titre permanent ». L'autonomisation est devenue l'élément-clé de la gestion de crise.

Au-delà des aspects classiques de la gestion de crise, alerter, évacuer, héberger, ravitailler la population, d'autres aspects semblent aujourd'hui de plus en plus pris en compte. Comment faire en sorte que les populations retrouvent rapidement un logement ? Comment assurer le maintien ou le retour rapide de services essentiels à la population ? Comment faire en sorte que les réseaux d'assainissement ne soient pas affectés par la crise ou soient rapidement en état de refonctionner ? Il en est de même pour la collecte et le traitement des ordures ménagères, pour l'usage de certaines voies routières ou ferroviaires.

1-La prévision constitue une étape majeure. Elle s'effectue dans le cadre du système « vigilance crue »

Depuis le milieu du 19^{ème} siècle, l'Etat avait mis en place un service d'annonce des crues sur les principaux cours d'eau. Ce service souffrait d'une grande dispersion des moyens et d'une efficacité limitée. En 2002, le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable a engagé la réforme du service d'annonce des crues, afin d'améliorer le service rendu au public et aux maires des communes inondables. La loi relative aux risques naturels et technologiques adoptée le 30 juillet 2003 a défini le cadre légal de la prévision des crues. Ont été créés

*Un service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations (le SCHAPI) installé à Toulouse.

*Vingt deux services de prévision des crues (SPC) qui remplacent les 52 services d'annonce des crues (SAC) préexistants. Ces services de prévision ont pour mission de surveiller en permanence la pluie et les écoulements des rivières alimentant les cours d'eau dont ils ont la charge. L'Etat a créé en 2006 un système de « vigilance crue », fondé sur le même principe que la vigilance météorologique. Pour un cours d'eau donné, une carte de vigilance crues et des bulletins d'information locaux sont disponibles en permanence et actualisés au moins 2 fois par jour à 10 h et à 16 h. (fig n°8). En période de crues, quand cela est justifié par la rapidité d'évolution de la situation, les bulletins sont réactualisés plus fréquemment. Chaque cours d'eau est caractérisé par un niveau de risque exprimé par des couleurs (vert, jaune, orange et rouge). Ces informations permettent aux services préfectoraux et aux services municipaux, si cela devenait nécessaire, de prendre les mesures d'alerte et de sauvegarde. Accessibles à tous sur Internet, les cartes sont une source d'information pour la presse et

peuvent être consultées directement par les populations concernées. Cette organisation nouvelle contribue à aider les maires dans leur mission de prévention des inondations



Fig n°8 « Vigilance crue ». Les cours le 26 février 2010

2-Gérer la crise

Le maire des communes sinistrées est responsable du maintien de l'ordre et de la sécurité dans sa commune ; en cas de crise il devient « directeur des opérations de secours ». Il doit réaliser un Plan communal de sauvegarde (PCS) qui organise la protection et le soutien de la population en cas de crise. Le préfet du département a pour mission le maintien de l'ordre et la sécurité des biens et des personnes à l'échelle départementale. Il est assisté dans sa gestion des crises par le SIDPC service interministériel de défense et de protection civiles. Il déclare le plan ORSEC (organisation des secours) quand cela est nécessaire. Ce plan recense les risques connus à l'échelle du département et organise la gestion de la crise et des secours. L'organisation des secours comprend les dispositions générales de gestion de crise applicables en toutes circonstances et des dispositifs spécifiques pour répondre à la crise qui se déroule (inondation, incendie...). Ainsi existent des plans spécialisés et des plans particuliers d'intervention (le plan rouge par exemple) Dès qu'une inondation concerne plusieurs communes, le préfet prend en charge la gestion des opérations de secours et peut déclencher tout ou une partie du plan ORSEC départemental. En cas de crise concernant plusieurs départements, le centre opérationnel de Zone dans chaque zone de défense et le centre opérationnel de gestion interministériel de crise (COGIC) au niveau national sont mobilisés.

Le Plan communal de sauvegarde. Pour assurer ses fonctions en cas de crise, le maire doit réaliser préalablement un plan communal de sauvegarde (PCS). Cela est valable dans toutes les communes qui disposent d'un plan approuvé de prévention aux risques (risques d'inondation notamment). Le maire qui dispose de deux ans pour réaliser ce plan, à compter de l'approbation du PPRI, est ensuite responsable de sa mise en œuvre. Le PCS doit permettre

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

d'organiser la gestion de crise, il doit couvrir l'ensemble des risques connus. Ainsi le maire a donc à organiser la sauvegarde qui recouvre l'alerte, la protection, le soutien aux populations. Pour parvenir à cela, le PCS doit contenir diverses informations, notamment l'identification des risques et de la vulnérabilité de la commune, l'organisation prévue pour assurer l'alerte, l'information, la protection et le soutien de la population face aux risques connus. Le DICRIM, document d'information sur les risques majeurs, est associé au PCS ainsi que les modalités de mise en œuvre de la réserve de sécurité civile lorsque que celle-ci existe. Le PCS peut aussi recenser les moyens de transport, d'hébergement et de ravitaillement de la population mobilisables en cas de crise. Le PCS contient la liste des actions à effectuer pendant la crise, l'après- crise et la période de retour à la normale. Les modalités d'exercice permettant de tester le PCS doivent être jointes.

Le PCS doit être compatible avec le plan ORSEC départemental. L'intercommunalité peut être utilisée pour organiser la sauvegarde des populations et un plan intercommunal de sauvegarde peut ainsi être établi en lieu et à la place du PCS. Cela conduit à mutualiser les équipements, à s'organiser de manière cohérente sur le territoire de l'intercommunalité. Pourtant même dans ce cas, le maire conserve ses responsabilités, le maintien de la sécurité publique et la direction des opérations de secours.

La loi de modernisation de la sécurité civile de 2004 a en outre créé un nouvel outil de mobilisation civique qui doit apporter soutien et assistance à la population. Il **s'agit des réserves communales de sécurité civile**. Cette structure a pour but d'organiser l'action des bénévoles et cela avant la crise afin d'en faire un complément de l'action des services de secours. La création d'une réserve communale de sécurité civile est facultative. Chaque commune est libre de l'organiser comme elle l'entend. La loi reconnaît aussi la capacité des associations agréées (par le préfet ou le ministre chargé de la sécurité) à intervenir également.

3-L'exemple de Paris, La zone de défense de Paris :

Face aux enjeux importants précédemment évoqués qui caractérisent Paris et l'agglomération parisienne, le Préfet de Police, qui depuis 1960 est aussi préfet de la zone de défense de Paris, a engagé en 2001 une collaboration avec les préfetures de chaque département d'Ile-de-France, avec la ville de Paris, les administrations, les opérateurs économiques publics et privés (EDF, RATP, SNCF, FRANCE TELECOM, les gestionnaires des réseaux d'eau potable et de chauffage urbain, des réseaux d'assainissement, l'Assistance Publique des Hôpitaux de Paris, les musées, ...) dans le but de mettre en place un Plan de Secours Spécialisé Inondations Zonal (PSSIZ) établi sur une approche globale du problème. Il s'agit de préparer et de coordonner l'action des secours des huit départements d'Ile- de- France. Ce Plan contient la description du déroulement d'une crue centennale, une analyse des conséquences sur les différents réseaux et les mesures préventives et post- crise à mettre en œuvre, notamment par les concessionnaires des réseaux dans le but de protéger les installations et de permettre un retour rapide à la normale.

Il prévoit la coordination de tous les intervenants pour une gestion optimale des secours, avec par exemple des procédures spécifiques pour la fermeture des brèches afin d'assurer la continuité des digues le long de la Seine. Sont aussi prévus des plans d'hébergement et la mise en œuvre des moyens de la Brigade des Sapeurs Pompiers de Paris (BSPP). Les entreprises doivent prendre les mesures de précaution nécessaires, chaque établissement, devant prévoir de mobiliser ses propres dispositions préventives pour

protéger son activité, à partir du moment où l'eau atteint un seuil critique Dans sa commune, le maire est responsable de l'organisation des secours de première urgence. Ces travaux mériteraient probablement un peu plus de publicité, une crue centennale ne pourrait être gérée que collectivement, l'information des victimes potentielles est donc aussi importante que celle des personnels de secours.

VII- GESTION DE CRISE ET ASSURANCES

La loi de 1982 sur l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles : stipule qu'en cas de catastrophes les assureurs se substituent en partie à l'Etat. Les catastrophes naturelles ne sont pas assurables selon les principes du droit de l'assurance classique (code des assurances) car elles ne sont pas toutes modélisables faute de statistiques suffisantes. Or, seul ce qui est mesurable est assurable, les catastrophes sont en outre des événements quasiment impossible à prévoir et la répartition des risques est inégale sur le territoire et largement aléatoire. La loi de 1982 instaure un système dit de solidarité. L'Etat intervient dans la procédure à plusieurs niveaux :

1- ***L'Etat déclenche la procédure d'indemnisation par la reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle*** (avis d'une commission interministérielle comprenant des représentants des ministères chargés de la tutelle des assurances, de la sécurité civile et de l'écologie, avant arrêté interministériel de constatation de l'état de catastrophe naturelle). La loi n'énumère pas les risques couverts, l'état de catastrophe naturelle est défini par « l'intensité anormale d'un agent naturel ». Ainsi, ce n'est pas la nature du fait générateur (séisme, inondation...) qui est déterminante mais son « intensité anormale » qui crée l'état de catastrophe naturelle. C'est donc l'autorité administrative qui donne réalité à l'indemnisation. La garantie n'est mise en jeu qu'après publication de l'arrêté interministériel au Journal officiel (JO).

2- ***L'Etat fixe le montant de la prime additionnelle*** à appliquer « aux contrats socle » (contrats garantissant les dommages aux véhicules terrestres à moteur, contrats d'habitation, contrats garantissant les pertes d'exploitation...). L'indemnisation ne concerne que les dommages sur des biens assurés. Le taux unique a pour objectif de répartir sur l'ensemble de la collectivité des assurés la charge des indemnités versées aux sinistrés. Ce taux de prime est donc fixé par les pouvoirs publics et est calculé en pourcentage de la prime perçue pour les autres garanties (12 % des primes ou cotisations afférentes aux contrats socle, exception de 6 % pour les contrats-véhicules). Ainsi, la garantie est imposée à tous les assurés et le taux de prime est unique pour tous, que l'on habite dans les zones les plus dangereuses ou les moins menacées.

3- Compte tenu de l'importance des phénomènes naturels, ***L'Etat a élargi la capacité financière des assureurs*** par la réassurance auprès de la Caisse Centrale de Réassurance. En cas de catastrophe majeure dépassant la capacité de remboursement des sociétés d'assurance, la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) intervient.

Le système « catnat » est un régime dérogatoire du droit commun de l'assurance, un compromis entre mécanismes de mutualisation, par l'assurance librement contractée, et de solidarité, par la garantie obligatoire, dont la tarification est fixée par l'Etat, qui apporte sa garantie à la solvabilité du régime par le biais de la CCR

4 -Le remboursement des dommages

Après la crise, le préfet recueille auprès de la ou des communes concernées les informations sur l'évènement déclencheur des dommages. Si les dommages sont importants, le préfet peut décider de proposer une déclaration de l'état de catastrophe naturelle. Il adresse alors son rapport (informations météorologiques, liste des communes touchées, type de dommages et évaluation financière) à la direction de la Sécurité civile du Ministère de l'Intérieur. Le Ministère saisit la commission interministérielle chargée de préparer les arrêtés constatant l'état de catastrophe naturelle. Dès que l'arrêté interministériel est publié, le processus d'indemnisation se met en place. Les assureurs mandatent leurs experts qui établissent le lien de causalité entre les dommages et l'aléa naturel.

La loi prévoit que l'assuré paie en cas de sinistre une franchise pour les biens à usage d'habitation et les autres biens à usage non professionnel.

Le système **catnat** pose un certain nombre de problèmes, il est parfois responsable de lenteur et d'iniquité (délai de plus d'une année entre la crise et la mise en route de la procédure d'indemnisation, différence de traitement constatée entre communes). En outre le régime d'indemnisation comporte peu d'incitations à la prévention (quelques mesures liées à l'augmentation du montant de la franchise dans les communes non dotées d'un PPR faisant l'objet de catastrophes naturelles répétées et refus de couverture des assurés n'ayant pas procédé aux travaux prévus dans un PPR dans un délai de 5 ans). On peut se demander si le mécanisme d'indemnisation ne contribue pas à affaiblir la politique de prévention : la perspective d'être indemnisé réduirait l'intérêt de la prévention et par conséquent la sensibilité de la population aux mesures préventives que les pouvoirs publics mettent en œuvre.

Une réforme est envisagée pour renforcer les réserves de la CCR, créer des incitations à la prévention et rendre la gestion du régime plus rigoureuse et plus transparente, et cela sans que les principes de l'assurance et de la mutualisation des primes ne soient remis en cause. Un des premiers objectifs consisterait à renforcer la CCR afin de permettre de faire face à un évènement catastrophique du type de l'inondation de la Seine de 1910. La suppression de l'intervention de la commission interministérielle est aussi en cours d'étude (suppression des arrêtés déclarant l'état de catastrophe naturelle). Un organe collégial bénéficiant d'une autorité incontestable remplacerait la commission. Il devrait notamment contribuer à définir des critères objectifs et scientifiques permettant de caractériser les catastrophes naturelles.

Enfin, une relation plus étroite entre politique de prévention et mécanisme d'indemnisation avec par exemple la mise en place réelle de modulation de l'indemnisation des catastrophes naturelles en fonction de l'application de mesures de prévention et la réduction de tarif (modulation de la prime additionnelle) pour les propriétaires prenant des mesures de prévention.

VIII - LE RETOUR D'EXPERIENCE : REX

Le retour d'expérience est essentiel. Il permet à travers l'analyse détaillée d'un événement passé de comprendre son déroulement et de tirer les enseignements utiles pour améliorer la gestion des risques et de la crise et renforcer, si nécessaire, la politique de prévention

Le retour d'expérience est une composante de la prévention des risques. Il implique la collecte des informations, le traitement et l'analyse des données.

Les objectifs du REX sont multiples :

- Mieux connaître l'aléa;
- Mieux envisager les conséquences d'un phénomène ;
- Définir les dommages occasionnés (humains et économiques) ;
- Estimer l'efficacité des mesures prises antérieurement et en tirer les conséquences ;
- Faire des propositions afin d'améliorer les dispositions en vigueur ;
- Conserver la mémoire de l'événement

Il s'agit donc de :

- centraliser et analyser les données relatives aux catastrophes
- constituer des pôles de compétences capable pour l'établissement des REX dans le but de définir la politique générale en matière de prévention des risques naturels, et de mieux envisager résilience
- assurer la diffusion des enseignements tirés de l'analyse des catastrophes

Seuls les grands événements font l'objet de REX interministériels. L'Inspection Générale de l'Environnement (IGE), créée en 2000 et placée directement auprès du Ministre en charge de l'écologie et du développement durable, a établi des expertises notamment sur les épisodes de crues majeures, et sur le séisme de 2009 en Italie.

S'agissant des inondations, le retour d'expérience traite du phénomène pluvieux générateur des crues, du comportement hydrologique des cours d'eau, du fonctionnement des réseaux d'observation, de la pertinence de l'information de vigilance, du fonctionnement opérationnel des services mais aussi des conséquences sur le terrain. Une fiche de synthèse de l'épisode est établie. Les documents de retours d'expérience doivent être mis en ligne à destination du réseau des services en charge de la prévision des crues. Les informations recueillies servent également à alimenter une base de données d'expertise hydrologique, permettant de faciliter leur réutilisation.

REFERENCES

Beucher S. 2008 Risque d'inondation et dynamiques territoriales des espaces de renouvellement urbain. Le cas de Seine-Amont et de l'Est Londonien. Thèse de doctorat Université Paris Ouest, Nanterre la Défense. 2 tomes

Beucher S. et Rode S. 2009 L'aménagement des territoires face au risque d'inondation: regards croisés sur la Loire moyenne et le Val-de-Marne. Mappemonde n°94, (2)

Beucher S., Bonnard J.-Y., Reghezza M., de Richemond N. 2010 les risques d'inondation de la région capitale. numéro de TDC collection du CNDP

Dauphiné A. 2001 risques et catastrophes Colin ed.

Reghezza 2006 Réflexions sur la vulnérabilité métropolitaine. La métropole parisienne face au risque de crue centennale Université de Paris Ouest Nanterre- La Défense

Rode S. 2009, Au risque du fleuve. La territorialisation de la politique de prévention du risque d'inondation en Loire moyenne. Thèse : Université de Nanterre - Paris X : 2009

Veyret Y. 2002 Géographie des risques naturels en France. Hatier . Paris

Veyret Y. (dir) 2003, les risques Paris. SEDES

Veyret Y., Beucher S., Bonnard J.-Y., Meschinet de Richemond N. 2010 Les risques d'inondation de la région capitale. numéro de TDC

Vinet F. 2003 Crues et inondations dans la France méditerranéenne – les crues torrentielles des 12 et 13 novembre 1999, éd. du temps, coll. Questions de géographie,

Internet, site www.prim.net, www.ecologie.gouv.fr ; www.ladocumentationfrancaise.fr ; www.prevention2000.org

METHODOLOGIE DE REHABILITATION ET DE RECONSTRUCTION DES KSOUR

Messaoud SOUICI, CNERIB

INTRODUCTION

La loi N° 04 – 05 du 25 décembre 2004 qualifie comme risque majeur toute menace probable pour l'homme et son environnement pouvant survenir du fait d'aléas naturels exceptionnels et / ou du fait d'activités technologiques.

A ce titre, cette loi exige la définition et la mise en oeuvre de procédures et de règles visant à limiter la vulnérabilité des hommes et des biens aux aléas naturels et technologiques.

Ce système de prévention a pour objectifs :

- L'amélioration de la connaissance des risques, le renforcement de leur surveillance et de leur prévision ainsi que le développement de l'information préventive sur ces risques ;
- la prise en compte des risques dans l'utilisation des sols et dans la construction ainsi que la réduction de la vulnérabilité des personnes et des biens aux aléas ;
- la mise en place de dispositifs ayant pour objectif la prise en charge cohérente, intégrée et adaptée de toute catastrophe d'origine naturelle ou technologique

Parmi les risques naturels majeurs auxquels l'Algérie fait face, les inondations font partie des catastrophes les plus fréquentes et les plus dévastatrices sur les plans humain et matériel.

1. Historique

Les inondations peuvent se montrer très dévastatrices. Parmi les inondations récurrentes que le pays a subi, on peut citer (ref. : seconde communication nationale de l'Algérie sur les changements climatiques) :

- les inondations exceptionnelles de l'automne 1969 ont fait 50 morts, 62000 sans-abri, 23 000 maisons détruites. Pendant ces inondations, il a été enregistré le 28 septembre 1969 une pluviosité de 208 mm sur 24 heures, ce qui dépasse celle d'un pays tropical comme la Martinique ;
- les inondations qui se sont produites du 25 au 31 mars 1974 ont été également très ravageuses. Les précipitations quotidiennes maximales ont atteint de 80 à 224 mm. Ces inondations ont fait 45 morts, 11 disparus, 11 blessés et 22 000 sans-abri.
- Le 10 novembre 2001, des inondations d'une ampleur sans précédent ont frappé la région d'Alger en particulier la commune de Bab El Oued. Une pluviométrie enregistrée était de 290 mm en moins de 17 heures. (soit 40 % de la moyenne inter annuelle). Les dégâts ont été particulièrement catastrophiques (le bilan arrêté fait état : 712 morts, 115 disparus, 311 blessés et plus de 1 454 familles sans abri et des pertes matérielles évaluées à environ 30 milliards de DA.
- Le 1er octobre 2008, des pluies diluviennes ont provoqué de graves inondations, à Ghardaïa. Le bilan des pertes humaines s'est élevé à 43 morts, 86 blessés et 4 disparus. Il a été enregistré 2 000 habitations détruites, plus de 2600 fortement endommagées et 11 000 logements nécessitent des réparations limitées.
- Plus récemment encore, aux mois de janvier 2009 et Novembre 2009, des pluies d'une grande intensité se sont abattues respectivement sur la région d'Aoulaf et Illizi.



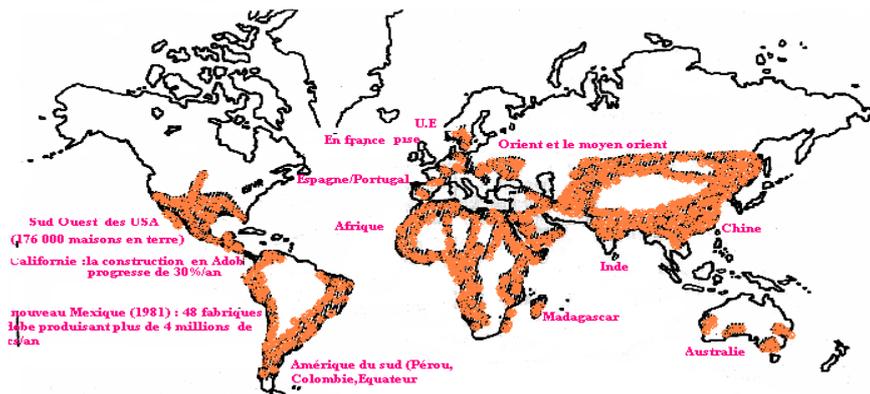
2. L'habitat saharien

Comme dans toutes les constructions traditionnelles, l'utilisation des matériaux locaux provenant du site même est systématique. Ces matériaux sont différents d'une région à l'autre. Le matériau de base reste la terre sous différentes formes, mais on trouve aussi la pierre, le sable, le plâtre, le gypse, le timchent qui est un matériau de parement et de maçonnerie de remplissage (utilisé dans les régions de Touggourt).

Néanmoins, ces matériaux sont particulièrement sensibles à l'action de l'eau. Leurs perméabilité et solubilité à l'eau obligent le constructeur à prévoir un traitement spécifique des zones atteintes directement par l'action des pluies : la base du mur, le sommet du mur et le parement extérieur. La durabilité de ces constructions est également assurée quand un minimum d'entretien est assuré : les terrasses étaient réparées à la suite des grandes pluies, les enduits renouvelés et les systèmes d'évacuation et de drainage des eaux usées et pluviales étaient toujours opérationnels.

Ceci nous permet de dire que contrairement à l'idée qui se fait de la dégradation de l'habitat saharien (y compris les ksour), la terre en tant que matériau n'est pas directement responsable de l'état de dégradation observé sur ces constructions. En effet, certaines constructions ont résisté très longtemps et ont même montré leurs preuves face aux intempéries quand elles étaient convenablement entretenues. Les terrasses étaient réparées à la suite des grandes pluies, les enduits renouvelés et les systèmes d'évacuation et de drainage des eaux usées et pluviales étaient toujours opérationnels.

Il est admis que plus de la moitié de la population mondiale vit dans des maisons construites avec des matériaux à base de terre (statistique, ONU), comme le montre la figure ci-dessous. Parmi cette richesse de constructions en terre, nous retrouvons les Ksour qui désignent toute agglomération saharienne anciennement construite et de tendance rurale.



2.1. L'habitat Ksourien

Etymologiquement, le Ksar signifie palais, mais localement le Ksar est un ensemble de maisons entassées, accolées les unes aux autres pour former un habitat compact, répondant à la fois à une organisation politique d'autodéfense et à une organisation sociale. De nos jours et avec la disparition des préoccupations défensives, le Ksar désigne toute agglomération saharienne anciennement construite et de tendance rurale.

Pour les maisons composant les Ksour, l'organisation spatiale, reste généralement homogène et s'articule autour d'un espace central multifonctionnel et de distribution, appelé *wast eddar*. Cet espace est couvert et clos, éclairé seulement par une petite ouverture dans la toiture. Les chambres (*biout*) et la *skifa* qui est en chicane, pour préserver l'intimité même si la porte reste ouverte, s'agglutinent autour du *wast eddar*.

Les constatations faites ont montré que ce type d'habitat est confronté aujourd'hui à la dégradation et dans un futur proche à la disparition, si des mesures ne sont pas prises dans l'immédiat pour sa réhabilitation, sa protection et sa sauvegarde.

Le système constructif Ksourien se caractérise par une grande simplicité : des murs porteurs, parfois suppléés par des éléments verticaux porteurs du type poteau en brique de terre, sur lesquels sont posés des troncs de palmier et des branchages de palmier recouverts d'une couche d'argile. Les fondations sont du type filant en rigole, avec parfois un soubassement en pierres qui permet de protéger les murs de la remontée capillaire et des eaux de pluie.

2.2. Etat et causes de dégradation

Plusieurs facteurs se sont combinés pour accélérer la dégradation des Ksour, et d'après les constatations faites lors des différentes visites effectuées au sud, le degré de chaque facteur varie d'une région à une autre et d'un Ksar à un autre. Mais l'abandon consommé et l'inexistence d'entretien dans ces structures reste la cause principale des dégradations, et on peut citer parmi les autres facteurs :

- la terre crue qui représente le matériau de base, constitue le talon d'Achille pour ces habitations du fait qu'elle nécessite des entretiens périodiques ;
- Le vent altère aussi très fortement les constructions en terre. Il cause des dégradations plus ou moins aggravées par l'impact des objets transportés et par l'impact du sable (vents de sables) ;
- l'eau sous toutes ses formes, contribue au dépérissement des Ksour (remontées capillaires, les eaux pluviales sous forme d'averses, des fuites des canalisations mal conçues) ;

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

- nouvelles pratiques apportées par les habitants, auxquelles les Ksour n'étaient pas conçus (insertion des climatiseurs) ;
- Les fortes précipitations enregistrées durant les dernières années notamment en 2008 dans les régions d'Aoulef (wilaya d'Adrar) et de Ghardaïa sont les conséquences du phénomène des changements climatiques, dû au réchauffement planétaire. La communauté scientifique attribue à ce réchauffement global une origine humaine liée à la surconsommation d'énergie d'origine fossile induisant des émissions atmosphériques de Gaz à Effet de Serre (GES). Il est certain que les précipitations enregistrées se reproduiront à l'avenir et probablement avec une intensité plus forte.

2.3. Pathologie et désordres

Par pathologie, on entend, les états et les manifestations de désordres observés sur ces constructions. Pour le diagnostic des causes des désordres, il ne doit pas s'arrêter aux simples caractéristiques du matériau, mais doit prendre en compte la conception, les techniques de mise en œuvre, l'usage et l'histoire du bâtiment.

Suite toujours aux visites effectuées dans les régions du sud, il a été constaté que les pathologies et les désordres, dont souffrent les Ksour sont en général ceux propres aux constructions en terre. Ces pathologies peuvent être classées en deux grandes catégories à savoir : les pathologies humides et les pathologies structurelles.

Pathologies humides

- Erosion des murs,
- Présence de coloration foncée de terre mouillée sur les murs,
- Présence d'eau en bas des murs (remontées capillaires),
- Gonflement et décollement des enduits,
- Remontée du niveau du sol extérieur.

Pathologies structurelles

- Ecartement des murs,
- Déchaussement des briques,
- Fléchissement des murs (formation des creux et ventres),
- Présence de fissures aux liaisons et sur la hauteur des murs,
- Fléchissement des linteaux (insuffisance d'ancrage),
- Absence de linteaux,
- Fléchissement et dégradation des bois des planchers.

3. Méthodologie de prise en charge des Ksour

La stratégie de prise en charge de l'habitat ksourien doit être définie en fonction de son état de dégradation, des possibilités de réhabilitation et des possibilités de changement d'usage des ksour de l'habitat vers le commerce ou le tourisme, par exemple. C'est ainsi qu'on peut envisager les scénarios suivants :

- Réhabilitation des ksour avec introduction des différentes viabilités pour un usage résidentiel ;
- Réhabilitation des ksour avec introduction de certaines viabilités pour un usage commercial et touristique ;
- Remplacement progressif du bâti ancien en tenant compte des spécificités locales à travers la construction de nouveaux programmes adaptés.

3. 1. Réhabilitation des Ksour pour l'habitat

L'originalité des Ksour s'exprime dans l'utilisation des matériaux, les formes et l'agencement des espaces, mais aussi à travers l'utilité et le rôle de chaque espace bâti. Cependant la connaissance des matériaux utilisés, les techniques de mise en œuvre et le fonctionnement de la vie dans les Ksour sont nécessaires pour mener à bien le projet de leur réhabilitation.

Par réhabilitation, on entend la valorisation et la sauvegarde, qui situent les Ksour dans leur réalité socio-économique, historique et culturelle, pour prévoir leur mise à niveau et la relance de leur dynamisme.

Pour réintégrer ces constructions dans la vie courante, la méthodologie doit être axée sur les étapes suivantes :

- Inventaire détaillé sur l'état de dégradation des ksour ;
- Confortement de l'assise des murs d'enceinte ;
- Le renforcement des bases des murs par la maçonnerie de pierres ;
- la reprise et la consolidation des points névralgiques et des effondrements de la maçonnerie en élévation ;
- La mise en place des revêtements du sol et des revêtements des ruelles par le matériau adéquat ;
- Travaux permanents d'entretien et de maintenance ;
- Amélioration des caractéristiques mécaniques du matériau terre (par les procédés de stabilisation) et utilisation des enduits compatibles aux constructions en terre ;
- Utilisation des systèmes pour reprendre les efforts de traction.

Ces différentes actions sont développées ci-après :

3. 1. 1. Traitement des soubassements

Si la nécessité de réaliser des soubassements pour lutter contre les effets des remontées capillaires est justifiée, ceux-ci seront réalisés selon l'importance des cas de figure qui pourront se présenter soit en maçonnerie de pierres ou en tout type de matériau inaltérable ou encore en confinant à l'aide d'un grillage, une carapace en pierre comme renforcement contre les premières assises de la maçonnerie en toub déjà existante.

Le choix de la solution à préconiser découlera de l'analyse de la situation particulière du site dans lequel se trouve le ksar.

3. 1. 2. Renforcement des angles

Les angles des murs extérieurs seront repris selon le cas soit en reconstruisant les murs tout en assurant une liaison entre eux conformément aux recommandations pour la production et la mise en œuvre des bétons de terre stabilisée édition 1993-CNERIB, soit en réalisant des renforcements des angles à l'aide de contreforts, à réaliser en bloc de toub sur toute la hauteur du mur.

3. 1. 3. Réfection des toitures

Toutes les toitures doivent être reprises en utilisant des blocs de terre (toub) placés en entrevous et s'appuyant sur des quart de palmier. Les blocs de toub à préconiser seront des blocs sur stabilisés et ce, à l'effet de minimiser leur sensibilité à l'eau. Les troncs de palmiers à utiliser seront ceux issus de la dépose des toitures.

3. 1. 4. Réfection des enduits intérieurs et extérieurs

Pour des raisons d'adaptation et de compatibilité, les enduits à base de terre sont les mieux adaptés. Ces derniers, peuvent être exécutés en trois couches ou en deux couches en respectant la règle de la dégression du dosage entre les couches depuis le support jusqu'à la dernière couche. Les recettes doivent tenir compte du contexte et du savoir faire local (pas de recette universelle). Les meilleurs enduits sont les enduits en terre et à la chaux aérienne (plu

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

mou, plus doux et moins résistant possible). Aussi, on évite d'appliquer l'enduit jusqu'au niveau du sol.

3. 1. 5. Réfection des étanchéités

Il est proposé de réaliser des étanchéités sahariennes dites « étanchéité locale ». Les travaux seront menés conformément aux recommandations de conception et mise en œuvre de l'étanchéité saharienne, édition-2006, CNERIB. Cela consiste à réaliser une chape en mortier bâtard de 2 cm, badigeonnée à la chaux.

Comme la terrasse étant la partie de l'édifice la plus exposée au soleil, son isolation est donc nécessaire pour, d'une part, éviter les désordres dans les planchers hauts et d'autre part assurer un confort thermique à l'intérieur des logements. Pour ce faire, celle-ci (l'isolation thermique) sera réalisée à l'aide de produits locaux par exemple à l'aide de la « terre battue » ou à l'aide d'une couche de sable stabilisé par un lait de chaux (inertie thermique). Aussi, un soin particulier sera accordé à la réfection des gargouilles ainsi qu'à leur nombre.

3. 1. 6. Revêtements de sol et des ruelles

Il est proposé de réaliser les revêtements de sol et des ruelles en chape de terre damée. Ce revêtement en « terre battue », est constitué d'un mélange de sable, d'argile et d'eau, avec adjonction de fibre végétale et des déchets d'animaux pour augmenter la cohésion du mélange.

En plus de toutes ces étapes, la stratégie de réhabilitation doit être accompagnée de la mise en place des voiries et réseaux divers (l'électricité, l'eau potable et le réseau d'assainissement) pour avoir un minimum de confort pour les habitants ; ce qui entraînerait la démolition de certains logements pour laisser place aux viabilités nécessaires.

3. 2. Réhabilitation des Ksour pour l'usage commercial et touristique

La réhabilitation des ksour pour un usage commercial et touristique doit s'entreprendre de la même manière que celle précédemment préconisée avec introduction d'un minimum de viabilités sans voiries n'engendrant pas ainsi des démolitions de certaines parties du Ksar.

3. 3. Reconstruction

Le remplacement progressif du bâti ancien saharien doit se faire en tenant compte des spécificités locales à travers la construction de nouveaux programmes adaptés. Le système constructif en maçonnerie porteuse chaînée, à base de matériaux localement disponibles, est proposé.

Les matériaux dits locaux sont ceux utilisés (ou à utiliser) localement depuis longtemps par les populations en place sans avoir recours à de moyens importants, onéreux ou mécaniques pour leur exploitation ou leur mise en œuvre. Ces matériaux, dont quelques définitions sont données ci-après, sont directement mis en œuvre à partir de gisements naturels, sans subir de transformations industrielles significatives.

Le plâtre

Le plâtre peut être utilisé en pâte pure, en mortier ou en béton de plâtre ; il est fabriqué traditionnellement ou industriellement à partir du gypse se trouvant en abondance à travers une grande partie du territoire national. Le plâtre peut être utilisé en tant que moellons de

gypse, enduits et mortiers, cloisonnement et remplissage, faux plafonds et éléments porteurs du système constructif. Le plâtre peut aussi être utilisé avec beaucoup d'avantages pour la confection des blocs pleins ou creux de béton de plâtre pour la maçonnerie porteuse ou pour voûtains pour planchers.

Le plâtre présente des caractéristiques, de comportement au feu, remarquables qui résultent de son caractère incombustible et mauvais conducteur de chaleur. Le plâtre est aussi un bon matériau isolant thermiquement, son coefficient de conductivité thermique utile est de l'ordre de $0.5 \text{ W/m}^\circ\text{c}$ (3.5 fois inférieur à celui du béton de ciment de granulats lourd). Quant à l'isolation phonique, les cloisons en carreaux de plâtre présentent des caractéristiques phoniques comparables à celles des cloisons de briques ou de parpaings.

La pierre

Une grande partie du sud algérien et des hauts plateaux renferme à des profondeurs variables de la pierre qui affleure parfois en surface et dont l'extraction peut se faire avec des moyens manuels simples. Cette pierre peut se substituer dans la construction à d'autres produits manufacturés à des conditions économiques avantageuses et peut être utilisée notamment comme maçonnerie porteuse chaînée ou non chaînée. La pierre présente des caractéristiques indéniables de résistance mécanique, d'isolation thermique et phonique.

La pierre peut être destinée aussi bien à des ouvrages de prestiges qu'à des ouvrages très modestes pour l'habitat et à faible coût.

Les blocs de béton de terre stabilisée

Un mélange adéquat de la terre ayant une certaine granulométrie avec l'ajout de faibles quantités de stabilisants (chaux, ciment, bitume, résine,...) permet d'obtenir après gâchage un béton de terre stabilisée (BTS). Le béton de terre stabilisée présente des caractéristiques thermiques bien meilleures que celles des bétons de ciments classiques ; Son confort thermique ainsi que le faible coût du matériau de base constituent les deux principaux avantages du BTS. En effet, le sol utilisé dans la composition du béton de terre stabilisée est dans la plupart des cas disponible localement et dans de nombreux cas, on peut envisager d'utiliser le sol extrait des fouilles de fondations. De même, le dosage en ciment des blocs et mortiers en BTS est plus faible que celui utilisé pour les parpaings et mortiers en ciment classiques. Néanmoins, la durabilité du matériau doit être soigneusement étudiée lors de la formulation du BTS et en choisissant un enduit adéquat de protection des façades.

Enfin, une autre expérience d'un projet pilote de logement avec efficacité énergétique est réalisée au CNERIB dans le cadre d'une action de coopération. Ce projet pilote porte sur la réalisation, avec introduction des mesures passives et actives d'efficacité énergétique, d'un logement en béton de terre stabilisée (BTS) avec utilisation de l'énergie solaire pour produire l'eau chaude sanitaire et le chauffage par plancher.



Avantages de l'utilisation des matériaux locaux

Outre l'aspect économique avantageux de ces matériaux, d'autres points clefs plaident en faveur de leur intégration dans la construction et qui sont :

- Non consommation d'énergie pour la production des matériaux et faible consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation des logements ;
- Leur facilité d'adaptation aux conditions locales et leur disponibilité en abondance contrairement aux autres matériaux (gravier, sable, brique, parpaing, brique de terre cuite...);
- Création d'emplois et disponibilité de main d'œuvre locale ;
- Maintien des populations dans leur environnement à travers une architecture adaptée ;
- Coût énergétique de production réduit : il n'est pas nécessaire de disposer d'installation industrielle complexe ;
- Décentralisation et utilisation des ressources humaines locales, l'utilisation des moyens de production humains et matériels localement disponibles assurent l'autonomie et l'autosuffisance locales ;
- Minimisation du réseau de transport, les matériaux vont directement du producteur au consommateur sans les frais de transport ;
- Consommation minimale en eau ;
- Moindre dépendance d'importation en matières premières notamment du ciment et l'acier.

CONCLUSION

La conservation des architectures en terre impose d'abord la rigueur dans leur entretien et leur vulnérabilité à l'eau, suggère d'orienter les recherches vers l'amélioration de l'imperméabilité du matériau terre. Les recherches actuelles sur les constructions en terre s'avèrent indispensables, car elles répondent aux principes du développement durable. Pour cela toute opération d'entretien, de conservation ou de restauration doit se faire dans le respect des techniques traditionnelles et des savoir-faire anciens.

L'enjeu dans l'intérêt qu'on porte aujourd'hui au matériau terre , réside dans le fait de conserver et de valoriser ses techniques, qu'on a su adapter, comme l'attestent de nombreux projets à travers le monde, aux besoins d'aujourd'hui. Le renouveau du matériau terre va permettre de lier les savoir-faire passés et présents grâce à une valorisation qui peut tout à fait s'envisager, dans les régions du sud, par le biais de projets structurants et rayonnants.

REFERENCES

1. Loi N° 04-05 du 14 août 2004 modifiant et complétant la loi N° 90-29 du 1^{er} décembre 1990 relative à l'aménagement et l'urbanisme.
2. loi N° 04-20 du 25 décembre 2004 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.
3. Projet « Réhabilitation des ksour » :
Rapports de recherche - CNERIB 2008.
4. Terre crue : techniques de construction et de restauration.
Bruno PIGNAL, éditions EYROLLES
5. « La réhabilitation du secteur de Diour Dbagh dans la médina de Rabat.
D CHEDAD. Revue maghrébine de recherche en urbanisme et aménagement, Octobre 2006

**POSSIBILITES ET LIMITES DE L'ASSURANCE, EN TANT QUE
MODE DE FINANCEMENT
DE LA REPARATION DES DOMMAGES CAUSES PAR LES
CATASTROPHES NATURELLES.**

Roland NUSSBAUM*

* Directeur de la Mission des Sociétés d'assurance pour la connaissance et la prévention des Risques Naturels (MRN), Paris, France, roland.nussbaum@mm.asso.fr

RESUME

Cet article propose une réflexion sur les possibilités et limites de l'assurance, parmi les modes de financement de la réparation des dommages causés par les catastrophes naturelles. Ce faisant, il précise le rôle des acteurs de ce secteur en faveur de partenariats public privé pour la prévention et la gestion des risques naturels.

Après un commentaire sur leur métrologie, la première partie propose une typologie des modes de financement de ces dommages, pour s'attacher ensuite aux spécificités de l'assurance, dont la fonction essentielle d'incitation économique à la prévention, qui participe du caractère « vertueux » de ces instruments de financement du risque résiduel, dans une démarche de gestion de risques collectifs.

La seconde partie est consacrée au couple assurance-prévention, facteur clé de résilience économique et sociale, comme de maîtrise du coût global du risque.

La troisième partie s'emploie à des comparaisons internationales et tire quelques perspectives pour le développement.

MOTS CLES : *catastrophes naturelles – prévention des risques – financement des dommages – assurance – analyse comparative - partenariat public privé*

SUMMARY

This article elaborates on the possibilities and limits of insurance services, as one of the financing modes for damage caused by natural catastrophes. In doing that, it introduces to the role of the actors of this industry in developing public private partnerships for the prevention and management of natural risks.

After commenting on their metrology, the first part of the document elaborates on the variety of disaster recovery financing tools, among which the insurance services and their service providers. It concentrates then on the specificities of insurance services, on their function of economic incentives for risk prevention participates, which participates to their virtues, as financing instruments for residual risk transfer.

The second part is devoted to the coupling of insurance and prevention, as a key factor for economic resilience, as well as for minimizing the cost of total loss control.

The third part presents international comparisons and draws perspectives for sustainable development.

KEY WORDS: *natural catastrophes – risk management – financing means of losses – insurance, - public private partnership*

INTRODUCTION

La sécurité des personnes, des biens et des activités économiques, face au risque naturel notamment, relève à la fois de la responsabilité individuelle¹ et de la compétence régaliennne, non seulement dans la gestion de crise, mais aussi dans l'action de prévention-protection², en réduction de la vulnérabilité individuelle. Le caractère exogène de l'aléa naturel, dans l'action qu'il peut exercer sur l'enjeu, ainsi que la composante collective de la vulnérabilité (à l'échelle d'un ensemble d'enjeux privés exposés, comme de la commune ou plus largement du bassin de risque) expliquent cet état de fait.

L'aspiration commune à la sécurité est du reste identifiée comme relevant :

- des biens publics mondiaux, dans la déclaration du Millénaire des Nations Unies³,
- des objectifs généraux de protection des citoyens et activités économiques inscrits, par exemple, dans le Traité des communautés européennes,
- à la fois des missions essentielles des pouvoirs publics et de « l'affaire de tous », dans la loi française⁴.

Pour améliorer la résilience des nations et des communautés face aux effets des catastrophes naturelles, le Cadre d'action de Hyogo adopté par les Nations Unies en 2005⁵, dans sa priorité n° 4 : « **réduire les facteurs de risque sous-jacents** », recommande de s'appuyer notamment sur ; (ii) *des pratiques de développement économique et social*, parmi lesquelles : (m) **Promouvoir la mise en place de mécanismes de partage des risques financiers, notamment de régimes d'assurance et de réassurance contre les catastrophes.**

Pour accompagner les pays dans la mise en œuvre ces priorités, prioritairement les plus pauvres d'entre eux, la Banque Mondiale et le secrétariat de la stratégie internationale pour la réduction des catastrophes (UN-ISDR), en coordination avec une communauté croissante de pays donateurs, d'organisations internationales telle la Commission européenne, ont regroupé leurs moyens d'action dans un fonds : la *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery (GFDRR)*⁶. Associés avec ceux des agences de développement bilatérales et des banques régionales de développement, ces moyens permettent notamment d'accompagner les pays ayant connu des catastrophes majeures dans le durcissement de leur économie, à travers la

¹ Relèvent notamment de la responsabilité privée : s'informer sur l'état des risques, les actions de réduction de la vulnérabilité individuelle, l'acte volontaire d'assurer ses biens et responsabilités...

² Relèvent en général de la responsabilité ou l'action normative collective : l'Etat / la commune « dit » le risque, l'énonce et la surveillance de l'application des règles de construction et d'aménagement dans les zones à risque aggravé, la mise en œuvre de mesures de protection structurelles et non structurelles, l'organisation de la préparation à la crise et sa gestion, la surveillance et l'alerte...

³ Cf. Déclaration du Millénaire, sous § III. Développement et élimination de la pauvreté : *(nous décidons...)* d'établir des partenariats solides avec le secteur privé et les organisations de la société civile en vue de promouvoir le développement et d'éliminer la pauvreté.

⁴ Loi de modernisation de la sécurité civile d'août 2004, Préambule sur les orientations de la politique de sécurité civile : *La protection des populations compte parmi les missions essentielles des pouvoirs publics. L'exercice de cette responsabilité implique toutefois bien d'autres acteurs, dont la diversité est devenue une caractéristique de la sécurité civile. Cette diversité est nécessaire pour faire face à la pluralité des risques pesant sur la population d'une société moderne : conséquences plus lourdes des phénomènes naturels, vulnérabilité aux risques technologiques et aux effets de la malveillance, besoin de prise en charge publique lié à la moindre efficacité des solidarités familiales et de voisinage. [...] La sécurité civile est l'affaire de tous. Tout citoyen y concourt par son comportement. [...]*

⁵ **Hyogo Framework for Action (HFA) 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities**, adopté en janvier 2005 par 168 pays à la conférence mondiale de l'ONU, dans le cadre de la stratégie internationale pour la prévention des catastrophes (UN-ISDR) – www.unisdr.org - priorité 4. Ian Egeland, Secrétaire Général Adjoint des Nations Unies, Affaires Humanitaires, dans son discours inaugural de la conférence de Kobe, exprimait ainsi cette priorité : « *Poor people should not be left to struggle alone against calamity: they deserve more access to meaningful financial risk-sharing arrangements such as insurance and reinsurance against disasters, through imaginative public private partnerships* ». <http://www.unisdr.org/wcdr/media/statements/Egeland-statements.pdf>

⁶ www.gfdr.org

mise en place de mécanismes de transfert de risques, qu'il s'agisse :

- d'assurance avec pool de réassurance, comme en Turquie ou en Algérie,
- de capacité d'assurance paramétrique, comme aux Caraïbes ou dans le Pacifique,
- de formes de micro assurance, comme au Malawi, en Mongolie, en Roumanie ou au Sri Lanka.

Le présent article explore les possibilités et limites de l'assurance, parmi les modes de financement de la réparation des dommages causés par les catastrophes naturelles. Il insiste sur les formes de partenariats public-privé nécessaires à la prévention et la gestion des risques naturels. A cet effet, il se fonde sur l'expérience française et sur quelques comparaisons internationales.

La première partie traite des moyens de financement des dommages de catastrophes naturels, parmi lesquels l'assurance. Des informations factuelles sont d'abord commentées, sur le poids des dommages indemnisés par l'assurance par rapport au total des dommages économiques et leur évolution, à l'échelle mondiale.

Puis est développée une typologie des modes de financement de ces dommages, parmi lesquels l'assurance. Enfin, au sujet de cette dernière sont proposés :

- Une description des acteurs de l'industrie de l'assurance et du segment de marché concerné par la garantie des risques naturels majeurs,
- Un essai de *mapping* des risques environnementaux et des garanties d'assurance associées, telles que proposées sur le marché français, ainsi qu'une illustration concrète sur le coût relatif des différents risques dans un contrat multirisques habitations
- Une exploration des spécificités techniques, dont la fonction essentielle d'incitation économique à la prévention, qui permet de constater le caractère « vertueux » de ces instruments de financement du risque résiduel, dans une démarche de gestion des risques collectifs.

La seconde partie, consacrée au couple assurance-prévention, facteur clé de résilience économique et sociale, comme de maîtrise du coût global du risque, met en évidence la nécessité d'une intégration des différentes politiques publiques concourant à la sécurité et l'utilité de diverses formes de partenariats public-privé.

La troisième partie qui s'emploie à des comparaisons internationales sur les deux points précédents et à tirer quelques perspectives pour le développement, permettra de conclure sur la nécessaire intégration des externalités environnementales liées à la maîtrise du coût total de la sécurité.

1. Economie et financement des dommages causés par les aléas naturels

Le propos se limite à la seule part habituellement monétarisée des dommages, qui sera qualifiée de « perte économique », sans prise en considération des victimes humaines, personnes déplacées et moralement affectées, ce qui obère la complète réalité de l'impact socio-économique des dommages...

1.1. Evolution de la sinistralité mondiale

Le graphique de la planche 1 ci-dessous donne la tendance de l'évolution depuis années 1950 des pertes économiques et de la part assurée des dommages causés par les grandes catastrophes naturelles, selon la Munich Ré. On notera la grande volatilité d'une année sur l'autre des deux variables représentées. Indépendamment de l'indice de développement des pays impactés par les catastrophes, la fraction assurée peut être très différente, partant de situations proches de 0 jusqu'à des plafonds l'ordre de 50 à 70 % des dommages économiques, dans les meilleures conditions (cf. ci après § 1.3).

Selon le Centre de recherches sur l'épidémiologie des désastres - CRED⁷, sur la dernière décennie dans le monde, pour les seules catnat, hors épidémies et risques acridiens, les pertes économiques annualisées ont été de l'ordre de 100 milliards de \$. Le rapport mondial sur les catastrophes de la Fédération internationale de la Croix Rouge et du Croissant Rouge analyse ces chiffres selon les niveaux d'indice de développement humain proposés par le PNUD. En appliquant des estimations par excès de coefficients de pénétration de l'assurance adaptées à ces situations différentes, on peut estimer que la part de ces pertes économiques indemnisées par l'assurance serait dans une fourchette de 10 à 40 milliards de \$, en moyenne annuelle.

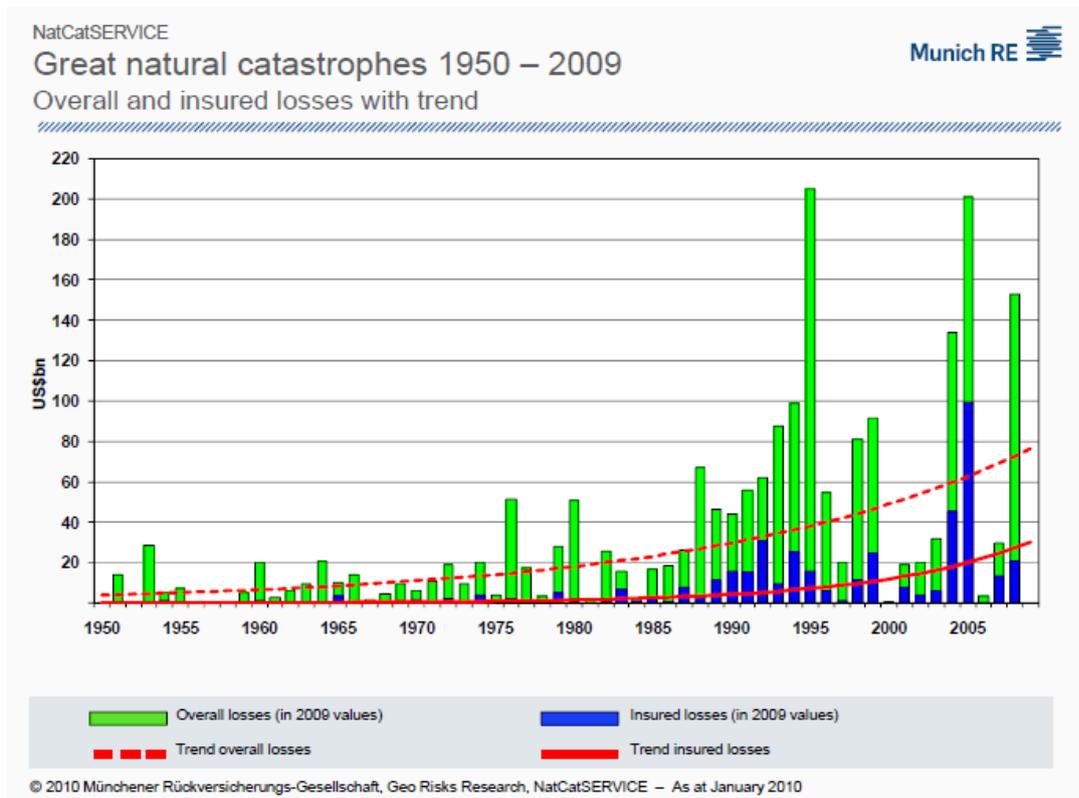
La légère tendance à la hausse de la part de sinistralité économique prise en charge par les assureurs est en rapport direct avec le développement de l'urbanisation, la concentration des valeurs (de plus en plus dans des zones géographiques exposées) accompagnant l'élévation du niveau de vie et la généralisation des couvertures d'assurances.

Cette influence majeure de la combinaison des facteurs « augmentation des biens exposés » d'une part et « augmentation de la richesse » d'autre part a pu être démontrée sur des séries longues de données aux Etats-Unis pour les cyclones (Pielke Jr & Landsea, University of Colorado, 2006) ou en Australie (Crompton Ryan & al., Macquarie University, 2006). Les grands réassureurs s'en font l'écho dans leurs publications annuelles sur la sinistralité catastrophique (Munich Re, Suisse Re)

Bien qu'il n'y ait pas en France, de données analogues sur une longue période, les travaux de la MRN ont pu mettre en évidence des phénomènes de même nature, traduisant par exemple un taux de progression des constructions en zones inondables plus élevé que dans la moyenne du territoire national, en dépit des politiques publiques de prévention

⁷ base de données EM-DAT, avec des seuils par événement recensé voisins de ceux des bases de données des réassureurs Munich Re et Suisse Re

Planche 1 - Evolution des pertes économiques annuelles et de la part assurée dues aux catastrophes naturelles majeures dans le monde



1.2. Métrologie des dommages

Les outils mobilisables pour la mesure ou l'évaluation des coûts des dommages combinent ou conjuguent des approches :

- micro-économique, macro-économique et statistique,
- *a posteriori* et *a priori*.

Que les enjeux en considération soient assurés ou non pour les dommages causés par les catastrophes naturelles, cet arsenal métrologique, accompagné des compétences et outils associés, forment un substrat essentiel pour le développement des autres activités liées à la gestion et au partage ou transfert de risques.

A posteriori, sont établis :

- au niveau micro-économique de l'assuré sinistré : l'état de pertes, éventuellement réalisé en expertise contradictoire entre l'expert de l'assuré et l'expert d'assurance, sur la base duquel sera instruite la déclaration de sinistre qui permettra le cas échéant, le versement par l'assureur de l'indemnité d'assurance, sous déduction de la franchise⁸, selon les garanties acquises,
- au niveau macro-économique : les informations de sinistralité individuelle sont ensuite agrégées par événement ou par exercice de survenance, que ce soit au niveau des

⁸ Pour la garantie des catastrophes naturelles, la franchise est non « rachetable », c'est-à-dire qu'une garantie sans franchise ne peut pas être délivrée contre paiement d'une prime plus élevée.

patrimoines des acteurs privés, des portefeuilles d'assurance ou des autorités publiques compétentes,

- des statistiques⁹ en termes de **coût moyen**¹⁰ et de **fréquence**¹¹ des dommages par aléa, catégorie d'enjeu, par maille territoriale¹².

A priori, en revanche et ce sont des enjeux importants pour la gestion des risques :

- au niveau micro-économique, l'assuré et/ou son assureur évaluent ce que pourrait être le **sinistre maximum possible (SMP)**¹³, étape préalable à un diagnostic de vulnérabilité, qui permet de déboucher sur un plan de gestion de crise,
- au niveau macro-économique, l'apport conjugué de connaissances rétrospectives ou prospectives sur l'aléa et de statistiques sur les coûts moyens des dommages, a fortiori de fonctions d'endommagement¹⁴, va permettre de développer des **modélisations des dommages, voire des pertes assurées**, prenant en compte les conditions d'assurance.

La planche 2 ci-dessous présente les modules standards d'un outil de modélisation de dommages potentiels. Cette méthode, plus ou moins intégrée dans certains logiciels spécialisés, combine aux échelles micro et macro-économique, des connaissances géo-référencées sur les aléas et les enjeux exposés, ainsi que sur leur vulnérabilité. Elle alimente à l'échelle des acteurs publics nationaux et territoriaux, les analyses coût-bénéfice comme outils d'aide à la décision appliqués aux arbitrages sur les priorités en matière d'investissements de prévention et de protection¹⁵. Avec la prise en compte des conditions des contrats, elle permet aux sociétés d'assurances un calcul de la perte assurée selon différents scénarios d'événements.

⁹ Si ce type de données spécifiques au métier de l'assurance est par nature riche dans toutes les branches où les nécessités de tarification les justifient, elles ont été limitées à leur plus simple expression pour la branche d'assurance des catastrophes naturelles, où il n'y avait pas de nécessité de tarification.

¹⁰ Le coût moyen est le montant total des sinistres divisé par le nombre de sinistres. De façon plus élaborée, un étalonnage des montants de dommages subis, pour une catégorie d'enjeu donnée (*par exemple les maisons de plein pied sans étage*), selon la variation d'un paramètre physique (*par exemple : la hauteur d'eau atteinte au plus haut de la crue*), permet de construire des **fonctions d'endommagement**.

¹¹ La fréquence en gestion de contrats d'assurance exprime le nombre de sinistres rapporté au nombre de contrats. Elle exprime le taux de contrats touchés par l'événement.

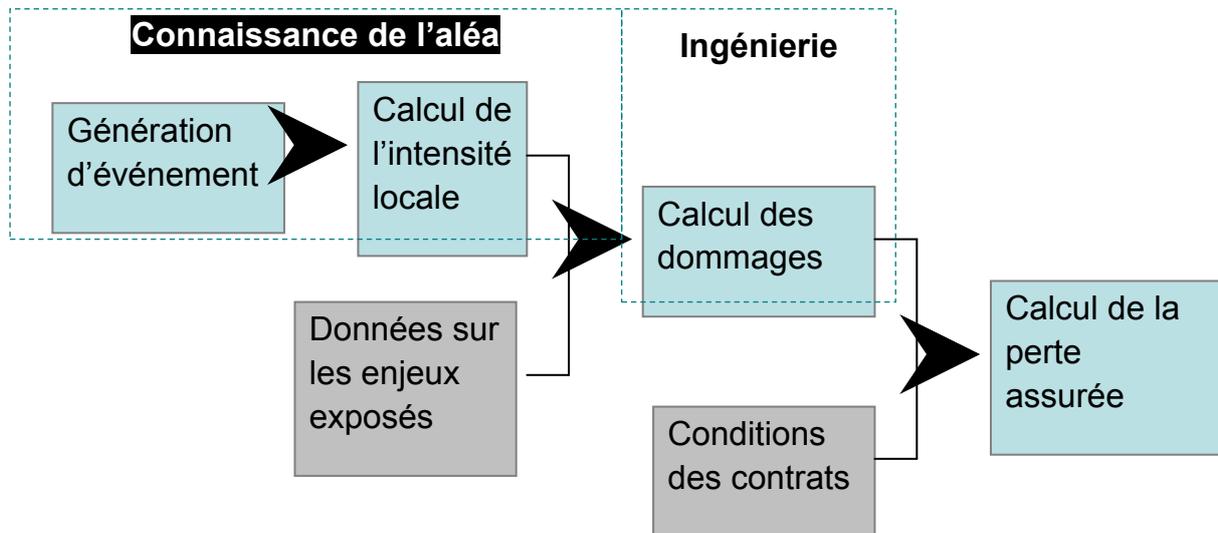
¹² historiquement le département, correspondant aux zones CRESTA de mesure des accumulations de sinistre, avec une tendance à passer à la maille communale.

¹³ Le SMP d'un enjeu donné pour un aléa donné est le montant maximal de pertes économiques potentielles (respectivement pertes assurées).

¹⁴ Fonction établie empiriquement, qui exprime, pour une catégorie d'enjeu donnée, par exemple un type d'habitation, le pourcentage d'endommagement (de sa valeur totale) en fonction de l'intensité locale d'un paramètre physique de l'aléa (par exemple la hauteur et ou la vitesse de l'eau).

¹⁵ **L'analyse coût-bénéfice** pour l'aide à la décision sur un investissement de prévention ne peut se limiter à rechercher un retour d'investissement sur les économies potentielles de sinistres, voire sur les années de différentiel de prime économisée. Elle porte sur la durée de vie d'un ouvrage de prévention-protection (calcul en valeur actuelle). Si l'approche est classique dans la prise en compte des coûts : montants des amortissements d'investissements et frais de fonctionnement des dispositifs de prévention, elle l'est beaucoup moins en ce qui concerne les bénéfices qui s'expriment en effet principalement en **sinistres évités sur la période considérée** et secondairement, par la prise en compte, le cas échéant, de subventions éventuellement apportées par la collectivité et/ou l'Etat, au titre du maintien de la compétitivité des territoires.

Planche 2 – Organisation en modules d'un outil de modélisation des dommages potentiels



Auto-organisée avec ses métiers spécifiques (experts, agences de modélisation - cf. § 1.4) dans les pays développés, cette métrologie des dommages requiert autant de chantiers spécifiques financés par l'aide internationale, que la GFDRR mentionnée en introduction met en œuvre sous la forme :

- de « preliminary disaster needs assessment » (PDNA), en évaluation macro-économique ex post
- d'études d'exposition aux aléas préliminaire à l'étude de faisabilité de solutions de transfert de risque.

Outre le secteur de la métrologie ainsi décrit, l'économie induite par les dommages comprend :

- la reconstruction et son financement spécifique, objet du chapitre suivant,
- les matériels, réquisitions d'équipements et prestations de la préparation à la crise, l'alerte, la gestion de crise et de l'après crise,
- et enfin les infrastructures et moyens de prévention-protection.

Si la majorité des composantes de cette économie sont publiques ou para-publiques, parce que entrant dans les missions régaliennes de sécurité, celles relatives au financement de la reconstruction comme de la prévention protection individuelle des intérêts privés engagent dans les faits la responsabilité de tout un chacun.

1.3. Modes de financement des dommages causés par les catastrophes naturelles

Par quels moyens la reconstruction peut-elle être financée ?

En premier lieu par l'autofinancement, c'est-à-dire le financement privé selon les ressources propres de la victime, avec cependant des limites souvent vite atteintes, car même le recours au crédit en pareille circonstance n'est pas facile. Ce sont des aspects très concrets de mise à l'épreuve de la résilience ou capacité à rebondir des cités, territoires, sociétés et acteurs économiques. Les institutions de financement international, telle la Banque mondiale et ses

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

consœurs régionales ont elles-mêmes fait l'expérience des difficultés à accompagner la reconstruction uniquement par voie de prêts et cautionnements aux Etats, dont la charge de remboursement s'accumule en cas de survenance répétée de catastrophes. A telle enseigne que sur la question, dès avant le tsunami, les gouvernements des petits Etats insulaires de la planète avaient poussé un cri d'alarme pour demander un accès amélioré à l'assurance comme condition du développement et non plus seulement comme conséquence de celui-ci.

Le succès sans précédent remporté par les ONG dans la mobilisation de ressources pour venir en aide aux victimes du tsunami ne doit en effet pas occulter le rôle joué par l'assurance, même dans ce cas précis, ne serait-ce que pour le financement des dommages directs et pertes d'exploitation ayant affecté les activités économiques, notamment industrielles, portuaires et touristiques.

Pour récapituler, en référence à la fable *La cigale et la fourmi* de Jean de La Fontaine, des financements « cigale » peuvent être mobilisés *a posteriori* avec les difficultés inhérentes à l'exercice, alors que les financements « fourmi » sont organisés par anticipation à l'éventualité de catastrophe ou *ex ante*...

Au titre des financements *a posteriori*, on inclut donc les financements provenant :

- des sources publiques telles que :
 - des ressources budgétaires exceptionnelles de l'Etat, levées par l'impôt ou par voie d'emprunts,
 - des financements inter-gouvernementaux tels que les fonds structurels de l'Union européenne,
 - les prêts et cautionnements d'aide à la reconstruction aux Etats et collectivités, des institutions de financement international,
- des sources privées telles que :
 - L'auto assurance,
 - toutes les formes de solidarités, que ce soit sous forme de dons ou d'aide en nature, par la Croix Rouge, les ONG,
 - les crédits bancaires en dernier ressort...

Au titre des financements *ex ante*, on trouve également :

- des sources publiques :
 - Etat, telles que fonds d'indemnisation (en notant que le Fonds Barnier, s'il est éligible aux seuls assurés pour être financé par un prélèvement sur la surprime catnat, n'est pas un fonds d'indemnisation mais de subventionnement d'actions de prévention) ;
 - Inter gouvernementales tel que le fonds de solidarité de l'Union européenne, doté de 1 milliard d'euros par an pour la remise en état d'infrastructures de santé, éducation et de réseaux (dommages non assurables) ;
- Des formes privées, avec une typologie d'acteurs regroupant (cf. également § 3) :
 - Marchés libres d'assurance et réassurance,
 - Assurance et réassurance en partenariat public privé, comme les systèmes d'indemnisation des catastrophes naturelles qui existent notamment en Espagne, aux Etats Unis et en France ou comme les solutions de micro-assurance mentionnées en introduction,
 - Pools de capacité et/ou de gestion de sinistre : Norvège et Nouvelle Zélande,
 - Solutions de transfert alternatif de risques, par émission sur les marchés financiers, d'obligations catastrophes.

Comme le démontrent les statistiques de la Munich Re ou de la Suisse Re¹⁶, parmi tous ces financements, c'est l'assurance qui représente une part assez souvent prépondérante, dans les pays développés et ce malgré certaines spécificités techniques qu'il conviendra d'évoquer (§ 1.4).

1.4. Comprendre les services d'assurance et les acteurs du secteur

1.4.1. - Les acteurs de l'industrie de l'assurance

Afin de mieux comprendre les rôles respectifs des différents acteurs, publics et privés, dans le financement *ex ante*¹⁷ des dommages, on s'attachera ici à préciser le rôle des différentes catégories d'acteurs de cette « industrie ».

Pour décrire les principales catégories d'acteurs économiques qui opèrent dans ce secteur, il convient d'abord de faire la distinction entre activités sans prise de risque et porteurs effectifs de risques. Ces derniers correspondent aux rectangles teintés de bleu dans la planche 3 ci-dessous.

Partant des consommateurs du service financier (en haut), qu'ils soient des particuliers ou des professionnels (indépendants, entreprises ou collectivités), ce schéma remonte la chaîne de l'assurance, qui comprend en principal les catégories d'acteurs suivants :

- activités porteuses de risques :
 - L'assuré lui-même pour mémoire ici, dans la mesure où il conservera toujours une partie du risque à sa charge (cf. § 2 ci après)
 - Au centre de la chaîne, les assureurs directs ou **entreprises d'assurance**¹⁸, selon le vocabulaire de l'UE, qui sont soumises à un agrément et un contrôle administratif, ces procédures et tests prudentiels faisant l'objet d'une harmonisation minimale en droit communautaire depuis 2002,
 - A l'amont de la chaîne, les réassureurs ou **entreprises de réassurance**¹⁹, également soumis à contrôle administratif en droit communautaire, qui apportent aux premiers une capacité de souscription additionnelle et une assistance technique important,

Dans le marché national où elles ont leur siège social ou bien dans ceux où elles opèrent par voie de filiale ou de succursale, la quasi-totalité des entreprises de (ré)assurance participent à **l'association nationale d'assurance**, pour leurs activités

¹⁶ cf. références en bibliographie et § 1.2. ci-dessus

¹⁷ L'assurance est un mode de financement *ex ante* et non *ex post* des dommages (cf. ci après § 1.2.)

¹⁸ Les **entreprises d'assurance** sont des entreprises agréées pour effectuer des opérations d'assurances selon les directives 1992/49/CE (Non vie) et 2002/83/CE (Vie), selon différentes formes juridiques, dont la liste a été fixée par chaque Etat membre (sociétés anonymes, sociétés d'assurance mutuelle, sociétés coopératives, etc). En France, une centaine d'entreprises d'assurance, sociétés anonymes d'assurance ou sociétés d'assurance mutuelle, sont agréées pour effectuer des opérations d'assurance dans les branches correspondant aux garanties susceptibles d'être appelées pour la couverture des dommages causés par la survenance de catastrophes naturelle : incendie et risques divers (y inclus toutes les garanties de dommages directs causés par les effets d'aléas naturels), pertes pécuniaires diverses (garanties des pertes d'exploitation ou pertes immatérielles non consécutives), responsabilité civile générale) : voir à ce sujet le préambule 2.

¹⁹ Les **entreprises de réassurance** et les **entreprises captives de réassurance**, sont régulées par la directive 2005/68/EC (définies à l'art. 2.1. b. et c.), Les activités de réassurance consistent en *l'acceptation de risques cédés par une entreprise d'assurance ou par une autre entreprise d'assurance [...]* (art 2.1.a de la directive 2005/68/CE) **ou celles exercées ou totalement garanties par le gouvernement d'un pays membre agissant, en raison d'un important intérêt général, en qualité de réassureur de dernier ressort, y compris si ce rôle est rendu nécessaire en raison d'une situation où il est impossible d'obtenir du marché une couverture de réassurance appropriée** (art 1.2.d. de la directive 2005/68/CE)

d'intérêt général professionnel comme de lobbying (en France, la FFSA²⁰ et le GEMA²¹). A l'échelon de l'UE, une association chapeau, le CEA²², **fédération européenne des entreprises d'assurance et de réassurance**, représente ces opérateurs auprès des institutions de l'UE. Il faut souligner le rôle très important de ces associations professionnelles sectorielles, tant au niveau national (exemple de leur groupement technique dédié la MRN²³), qu'europpéen, pour négocier les enjeux d'un partenariat public privé (PPP) adapté.

- activités non porteuses de risques, en assurance non vie, dont les acteurs fournissent des prestations spécifiques importantes, mais n'interviennent pas dans toutes les situations de relations d'assurance :
 - **Intermédiaires** en opérations d'assurance directe (agents généraux et courtiers), dont l'accès à l'activité est régulée par les directives 77/92/CEE et 2002/92/CEE.
 - **Experts d'assurance**, agissant soit pour le compte de la compagnie d'assurance soit pour celui de l'assuré, soit en expertise unique.
 - **Courtiers de réassurance**, entièrement ou partiellement spécialisés sur le marché de la réassurance des risques catastrophiques et autres prestataires de services aux sociétés de (ré)assurance, tels que par exemple :
 - Les **actuaire indépendants**,
 - Les **agences de modélisation**, dont les plus connues sont américaines²⁴, mais il s'est créé également quelques *start-ups* dans ce métier en Europe.

En termes de part de marché et de consommation d'assurance par habitant, toutes branches confondues²⁵, la France figure parmi les premiers pays au Monde, derrière les Etats-Unis, le Japon et le Royaume-Uni, à égalité avec l'Allemagne. Bien qu'il n'y ait pas de statistiques officielles mondiales au niveau de détail de la couverture des risques naturels, compte tenu de la relativement faible pénétration de cette garantie en Allemagne et, paradoxalement, au Japon, on peut dire qu'en dépit d'une exposition au risque naturel somme toute très moyenne, la France est des plus grands « marchés » au monde où il s'est développé un longue expérience de l'assurance des catastrophes naturelles, depuis une trentaine d'années maintenant²⁶

²⁰ Fédération Française des Sociétés d'Assurance (www.ffsa.fr)

²¹ Groupement des Entreprises Mutuelles d'Assurance (www.gema.fr)

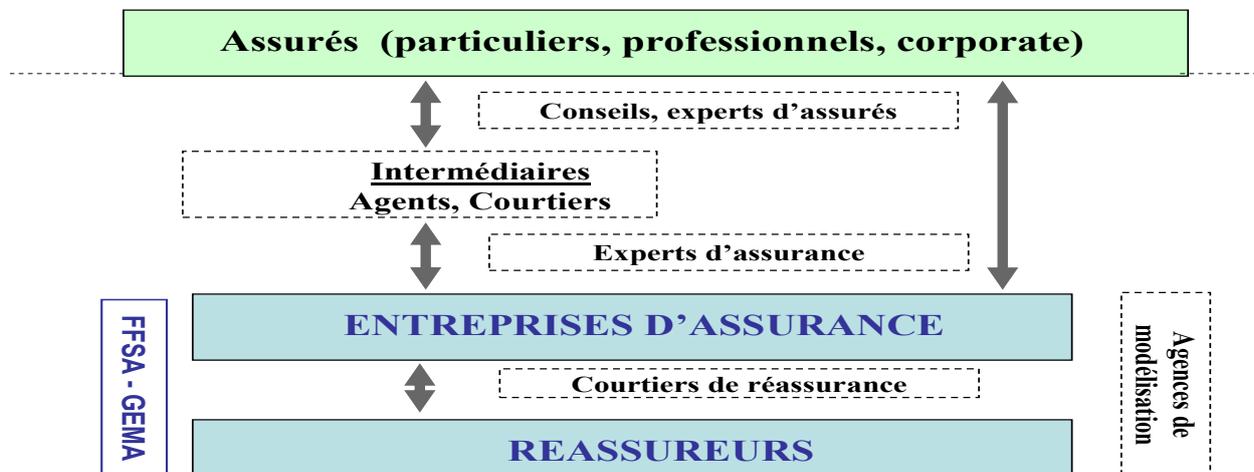
²² Comité européen des assurances, www.cea.eu, qui est le principale lobby de l'industrie de l'assurance en Europe, à ne pas confondre avec son homonyme en France, le Comité des Entreprises d'Assurance www.cea.gouv.fr, instance administrative instruisant les procédures d'agrément des entreprises d'assurance en France ou avec le Comité des assurances (*Insurance Committee*), instance de comitologie réunissant autour des services de la Commission européenne des représentants des administrations des Etats membres, pour les questions de mise en œuvre et de suivi de l'application des directives d'assurance

²³ www.mrn.asso.fr (cf. annexe 2)

²⁴ AIR, EQECAT (filiale du groupe ABS Consulting) et Risk Management Solutions (RMS)

²⁵ Source : statistiques de l'assurance, OCDE

²⁶ Avec la loi d'indemnisation des catastrophes naturelles de juillet 1982, transférant au secteur de l'assurance la charge de couvrir par une extension de couverture obligatoire à tout contrat d'assurance de dommages aux biens, les conséquences dommageables d'un aléa d'intensité anormale.



1.4.2. Essai de « cartographie » des risques environnementaux selon leur degré d'assurabilité et des garanties d'assurance associées, en France

Les manifestations d'une « nature hostile » peuvent se conjuguer avec celles d'une « nature victime », entraînant d'éventuels « effets dominos » c'est-à-dire des conséquences dommageables en cascade

Toute la palette des « risques environnementaux » doit donc être appréhendée pour envisager les risques naturels et l'ensemble de leurs conséquences possibles dans une démarche de gestion des risques, qui peut trouver dans les garanties d'assurance et à des degrés divers, des moyens de transfert contractuel des risques résiduels.

La représentation graphique ci après (planche 2) les situe par degrés d'assurabilité²⁷ (axe des y) et par catégories de systèmes d'assurance, en usage en France, pour les dommages aux biens des particuliers, des professionnels et des biens agricoles (hors assurances des productions agricoles²⁸) :

- tempêtes, grêle neige regroupés dans le système éponyme de garanties assurables,

²⁷ La définition la plus opérante est la suivante : est assurable, ce qui est réassurable sur les marchés privés.

²⁸ En assurances agricoles :

- Les dommages incendie ou tempête aux forêts sont couverts par les extensions obligatoires TGN et CatNat; s'il y a souscription d'une couverture « bois sur pied »
- les dommages aux récoltes céréalières peuvent être couverts par une assurance multirisques climatiques récoltes
- la foudre peut être couverte au titre de la garantie mortalité du bétail

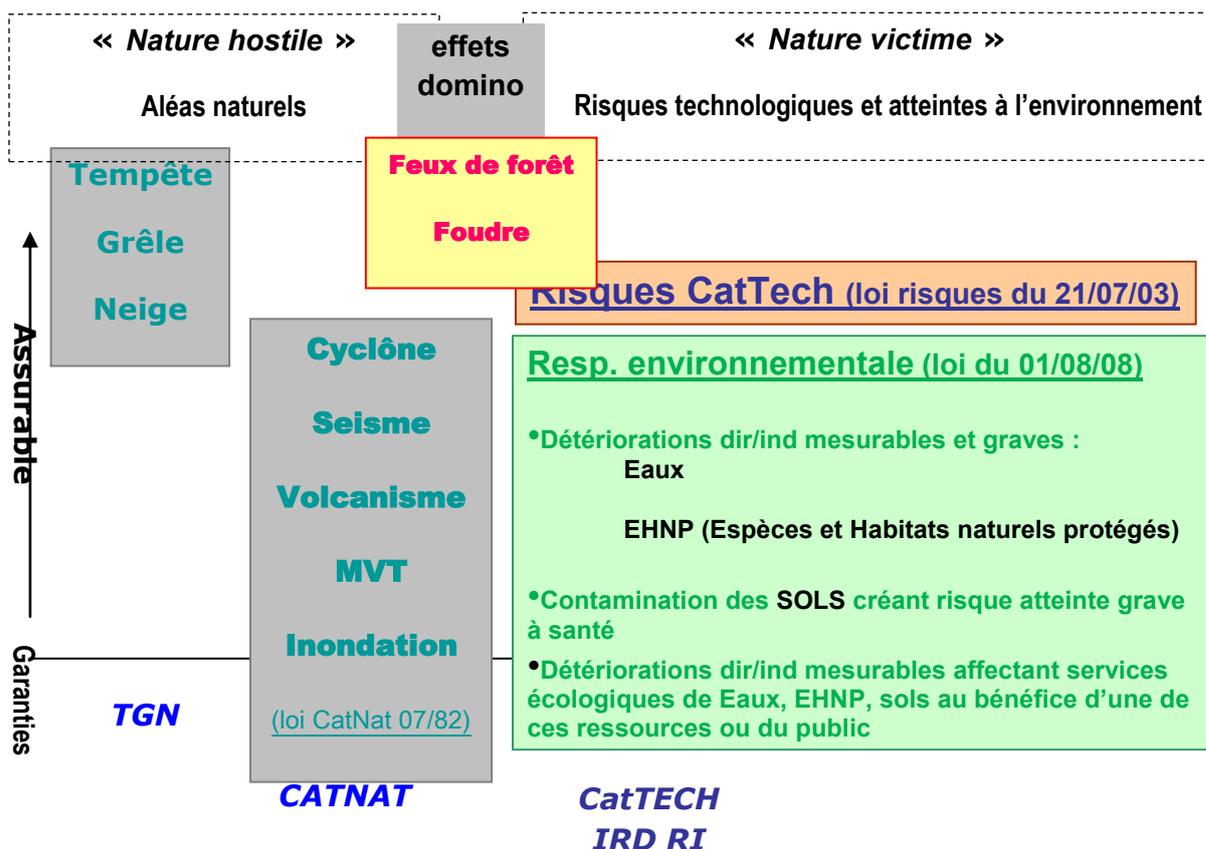
dans les autres cas, une couverture partielle des dommages aux récoltes est du ressort du fonds d'indemnisation des calamités agricoles.

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

- cyclones, séismes, volcanisme, mouvement de terrain, inondations regroupés dans le système « CatNat » regroupe dans la loi de juillet 1982 d'indemnisation des dommages non assurables causés par l'intensité anormale d'un aléa naturel,
- feux de forêts, au titre de la garantie dommages incendie,
- foudre au titre des garanties dommage électrique et incendie.

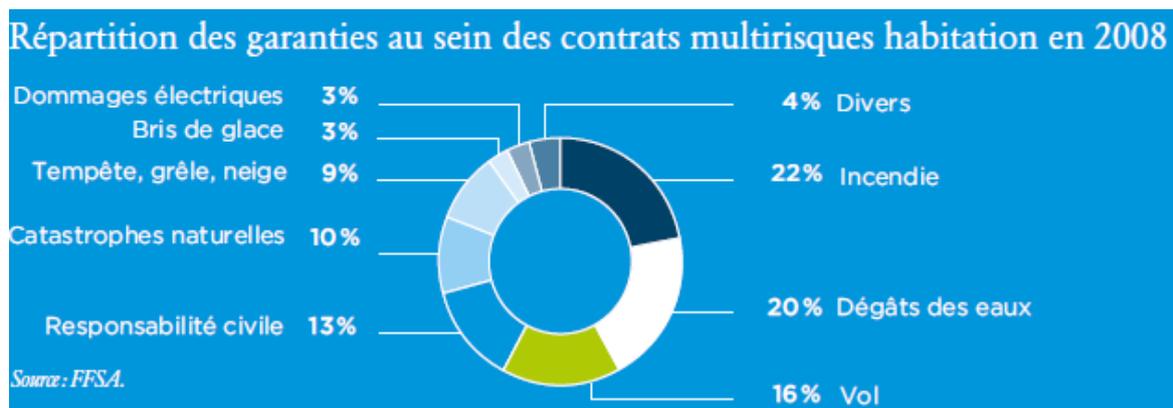
Planche 4 - Essai de typologie graphique des diverses catégories de risques environnementaux, selon leur degré d'assurabilité (axe des y) et les garanties d'assurance correspondantes (axe des x).



En conséquence, ainsi qu'il apparaît dans la planche 6 ci-dessous, sur 100 de prime d'un contrat multirisque habitation (MRH), la part de prime que représente la couverture de risques naturels est d'un peu plus de 20, qui se décompose en : 10 pour l'extension de couverture Catnat²⁹, 9 pour la garantie TGN, plus quelques unités réparties entre les garanties incendie et dommages électriques, pour les conséquences de cette nature causées notamment par les feux de forêt et la foudre.

²⁹ en notant bien que celle-ci est appliquée sous la forme d'une surprime uniforme de 12 % sur la prime du contrat socle MRH

Planche 4



A l'échelle macro-économique, sur les 45 milliards d'euros d'encaissements en primes 2009 réalisés par le marché des assurances de dommages aux biens et de responsabilités, environ 3 milliards seulement représentent le « marché » français de l'assurance contre les risques naturels, dont 1,4 Mds €/an : garantie catnat et env. 1,5 Mds €/an : garanties TGN et aléas divers (hors agricole)

1.4.3. Spécificités de l'assurance parmi les modes de financement des dommages

Certaines spécificités de l'assurance requièrent une attention particulière, notamment dans l'ingénierie du partenariat public privé qui sera décrite par la suite (cf. § 2). On retiendra : les paramètres d'assurabilité, la gestion des asymétries d'information et la fonction d'incitation économique à la prévention.

1.4.3.1. L'assurabilité

En mutualisant les risques, l'assurance répartit entre un grand nombre d'assurés, « l'espérance » de pertes de chacun d'entre eux. Néanmoins l'assurance ne peut pas supporter tous les risques, d'où l'exigence fondamentale d'assurabilité, en particulier dans le domaine des aléas extrêmes. Les principaux facteurs d'assurabilité sont les suivants :

Les risques doivent être mesurables

De manière à ce que l'assureur puisse apprécier l'acceptabilité et le prix d'un contrat de service d'assurance, il doit être capable de déterminer le coût moyen et la fréquence par type d'événement et par catégorie d'enjeu. La fréquence doit être suffisamment élevée pour que la loi des grands nombres puisse s'appliquer et le coût moyen suffisamment modéré, de manière à ce que le prix du service d'assurance demeure acceptable. Or la fréquence des catastrophes naturelles demeure plus faible que celle des risques « automobile » (par exemple) et très variable d'une année sur l'autre. Combiner l'utilisation de données du passé (approche statistique) et d'approches prospectives, basées sur des modélisations, s'avère donc nécessaire pour permettre aux assureurs de mesurer ce type de risques.

La perte maximale par événement doit être supportable

Si le coût potentiel total d'un seul événement extrême est de nature à mettre en péril la stabilité financière d'un assureur, il n'y aura pas d'offre d'assurance ou à un prix dissuasif.

Le transfert de risques, via la réassurance privée ou des méthodes alternatives, faisant appel aux marchés financiers ou encore, cas extrême, en faisant appel à l'Etat, comme réassureur de dernier ressort, augmente la capacité des assureurs à faire face aux accumulations de pertes potentielles, sur un marché donné. De la même façon évidemment et l'on y reviendra, une panoplie de mesures de prévention, adaptation et mitigation sont là pour limiter les conséquences dommageables, tant en fréquence qu'en gravité. Cette action sur les conséquences potentielles a évidemment un effet direct positif sur les coûts de la réassurance et de l'assurance.

Ainsi la couverture de l'aléa tempête est-elle largement répandue sur tous les marchés, alors que celle du risque d'inondation l'est moins, en raison :

- du caractère très spatialisé de l'aléa,
- de la fréquence potentiellement élevée en certaines zones,
- du coût élevé de la garantie qui en résulte dans les zones les plus exposées, selon une approche purement assurantielle du risque.

1.4.3.2. La forte spatialisation des risques induit des asymétries d'information

anti-sélection

Les clients qui ont un potentiel de sinistres élevé ont une propension à acheter davantage d'assurance que les clients qui s'attendent à peu de sinistres : c'est le phénomène d'antisélection ou sélection adverse. Ce phénomène est bien évidemment plus accentué notamment pour les risques spatialisés tels que les inondations... Une solution consiste à développer une plus large mutualisation, de façon à ce que la prime soit maintenue à un niveau acceptable.

aléa moral

On qualifie ainsi la tendance des assurés à se comporter de manière plus risquée que ceux qui n'ont pas de couverture d'assurance, parce que les assurés ne subissent pas toutes les conséquences négatives de leur comportement. Par exemple, laisser le réseau d'alimentation électrique d'une habitation en dessous d'un niveau de crue déjà constaté peut être considéré comme relever d'un tel comportement. Les conditions d'assurance incluent généralement des franchises de nature à limiter l'aléa moral.

1.4.3.3. Une mutualisation contractuelle qu'il convient d'étendre au maximum

L'efficacité de l'assurance est d'autant plus grande que la mutualisation du risque est importante et étendue. En risques naturels, comme une grande zone géographique peut être affectée par un seul événement, il importe également pour les assureurs d'avoir des portefeuilles de contrats diversifiés géographiquement. Lorsque d'autres méthodes ne suffisent pas à atteindre cet objectif, le législateur dans certains pays a choisi l'option d'instituer une extension obligatoire de couverture d'assurance aux événements naturels (cf. ci-après en § 3).

Dans les pays exposés à plusieurs catégories d'aléas naturels (climatiques et géophysiques) et à potentiels de sinistres élevés, la mutualisation s'améliore aussi en incluant tous les périls dans la même extension de couverture.

1.3.4. Incitation économique par les conditions d'assurance

Qu'elle soit ou non obligatoire, l'assurance des catastrophes naturelles, prévoit le plus souvent une forme de tarification qui soit au moins partiellement modulable, en fonction de

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

l'exposition à l'aléa et du degré de vulnérabilité³⁰, de manière à inciter les assurés à réduire leur exposition, par des mesures d'adaptation et de mitigation.

En théorie, l'incitation économique peut être introduite par la modulation des primes et/ou des franchises :

- **Par la prime :** comme déjà évoqué ci-dessus, cela n'est pas possible en France et même si elle l'était, cette modulation ne permet pas, en règle générale, d'obtenir un temps de retour satisfaisant pour des investissements de protection qui s'avèrent généralement disproportionnés en regard du caractère modique de la prime,
- **Par la franchise :** c'est la solution en vigueur en France qui produit ses effets, au cas par cas. Le temps de retour sur investissement est généralement d'autant plus satisfaisant que le niveau de franchise est élevé, mais il est subordonné au nombre d'occurrences potentielles de l'aléa pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Si l'assurance peut facilement remplir une fonction d'incitation économique à la prévention en garanties incendie ou vol, face à des sinistres généralement individuels, c'est toutefois plus difficile dans le cas de sinistres à forte dimension collective tels que les catastrophes naturelles. Même sur le marché anglais, il s'avère irréaliste aux acteurs d'appliquer le « juste prix du risque » dans les zones à exposition aggravée, par exemple à l'aléa inondation. En conséquence, les propositions de services ou équipements de prévention ne trouvent pas, en règle générale, un moyen d'être amorties sur un petit nombre d'années d'économies de prime, contrairement à une configuration bien connue en risque incendie industriel, pour les risques dits « hautement protégés ».

L'exemple français

De ces considérations est issue la solution originale du système français d'indemnisation des catastrophes naturelles qui (voir également l'annexe 1) :

- évite des phénomènes **d'anti-sélection** (ceux qui courent les plus gros risques sont les plus prompts à s'assurer ou cherchent les protections les plus complètes) par l'instauration d'une extension de couverture obligatoire sur un contrat socle librement souscrit mais très largement répandu, le contrat incendie, introduisant une solidarité entre les mutualités d'assurés,
- **renforce l'assurabilité** de cette extension de couverture par la mutualisation :
 - entre diverses catégories d'aléas, pris en charge dès lors qu'ils sont reconnus éligibles par une commission interministérielle,
 - entre territoires du pays (nord et sud, métropole et DOM) quelle que soit leur exposition relative,
 - entre diverses catégories d'enjeux (particuliers, professionnels et agricoles) et ce quel que soit leur degré de vulnérabilité pour autant qu'ils se conforment, le cas échéant, aux prescriptions du plan de prévention des risques naturels (PPRN)³¹.
- Incite dans une certaine mesure à la prévention, par la majoration ou modulation des franchises, sans toutefois avoir atteint sur ce point son ambition d'octroyer à tout (libre) souscripteur d'un contrat d'assurances de dommages aux biens un droit à indemnisation, en contrepartie d'un devoir de prévention.

³⁰ La France fait exception sur ce point pour les aléas relevant de son régime d'indemnisation des catastrophes naturelles, encore appelé système « catnat » (et non pour les aléas tempête, grêle, poids de la neige). Un projet de réforme s'inspirant d'un rapport de mission d'inspection générale interministérielle suggère certaines évolutions, tout en préservant le socle de solidarité spécifique au régime français.

³¹ C'est sur ce dernier point qu'a résidé la plus grande critique du système français : en l'absence de PPRN applicable sur les enjeux existants exposés, subsiste un certain **aléa moral**.

En conclusion de cette première partie sur l'assurance des catastrophes naturelles, on retiendra son caractère vertueux parmi les instruments de financement des dommages, tout en observant la relativement faible contribution de l'assurance au financement des dommages économiques en moyenne dans le monde, avec un taux qui est le plus souvent de quelques pourcent, même dans nombre de pays développés et y compris au sein de l'Union européenne, pour atteindre dans le meilleur des cas environ 50 à 60 % des dommages économiques (cas de la France, pour autant qu'il ne s'agisse pas de catastrophe exceptionnelle).

2. Le couple assurance-prévention facteur clé de résilience économique et sociale

L'importance des liens entre assurance et prévention a déjà été mise en évidence dans le cas du système français, qui les a prévus dès le départ et en améliore l'efficacité au fur et à mesure.

L'objectif de cette partie est d'aborder la gouvernance économique de la gestion de ces risques et l'approche systémique de son organisation et de son financement.

En premier lieu sont décrites quelques-unes des spécificités et différences, selon le périmètre institutionnel géographique (onusien, Union européenne, France), des cadres juridiques des trois principales politiques publiques associées à la gestion des risques majeurs³² : prévention, sécurité civile, résilience économique, pour mettre en évidence en particulier un déficit fréquent au niveau de cette dernière.

En second lieu, est présenté un modèle empirique articulant selon les plages de la courbe fréquence/gravité et les différentes échelles géographiques pertinentes, les arbitrages optimaux entre prévention et transfert de risque et les modes de gestion des financements requis pour l'une et l'autre.

En troisième lieu est abordée la question critique de la composition et de la prise en charge du coût global de gestion des risques naturels, au niveau macro-économique, puis micro-économique.

2.1. Prévention des risques et résilience économique : des cadres juridiques emboîtés

La planche ci-dessous, dont les colonnes correspondant aux cadres « Nations-Unies » et « France » ont déjà largement été décrites dans ce qui précède et dont les lignes correspondent aux trois principales politiques publiques nécessaires à une gestion des risques collectifs, permet d'insérer dans un cadre comparatif la situation prévalant dans l'Union européenne (Nussbaum, in Billet-Soumastre, 2008).

Elle met notamment en évidence que, contrairement au niveau onusien, avec la priorité 4 du CAH rappelée en introduction, l'approche de la résilience économique coordonnée au niveau de l'Union européenne, se limite pour l'heure au Fonds de solidarité de l'Union européenne (FSUE), du ressort de la politique régionale (REGIO) et à une disposition de politique économique du Traité jamais explicitée ni a fortiori mise en œuvre (Art. 100.2 TCE) et qu'à contrario, il n'y a pas d'approche coordonnée en ce qui concerne l'assurance des risques naturels. La répétition des catastrophes à extension transfrontières a toutefois poussé au lancement de travaux de recensement des dispositifs publics et privés existant dans les différents Etats membres et de comparaison des coûts et perspectives de résilience induites pour les citoyens et les acteurs économiques, à situation de risque équivalente.

Planche 5 - Comparaison sommaire du contenu des cadres juridiques de la gestion des risques naturels, à trois échelles institutionnelles emboîtées (France, UE, Nations-Unies)

³² Entre autres politiques publiques que la recherche, l'éducation, la santé, etc

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

Domaine	Cadre UN	Cadre UE	Cadre France
Prévention	CAH*	Dir. inondation (2007) EUROCODES 8 et 20 Stratégies ACC et DRP	Codes environnement, urbanisme, construction-habitat
Sécurité civile	OMD/ CAH CICRCR / IDRL	Instrument Financier (2007) Mécanisme Communautaire (2007) MIC	Loi modernisation de la sécurité civile (2004)
Résilience économique dont transfert de risque	OMD/ CAH	Art. 2 et 153 TCE ³³ Art. 100.2 TCE ³⁴ FSUE ³⁵ Pas d'approche spécifique en assurance contrairement à RC VT³⁶	Code environnement : Fds Barnier (1995) Code des assurances : CatNat (1981), TGN (1990)

(*) Autres domaines de conventions des Nations-Unies, faisant référence à la prévention des risques naturels : Patrimoine, Droits humains, Cours d'eau et lacs transfrontaliers, Arc Alpin, ACC,

2.2. Articulation entre services d'assurance et autres modes de financement ³⁷

Pour préciser l'articulation entre actions de prévention ou de gestion des risques et leurs modes de financement, il peut être fait référence à la courbe de Farmer, reliant la fréquence à l'intensité d'une catégorie donnée d'événements catastrophiques.

Sur cette courbe, les modes de financement d'efficacité économique optimale apparaissent par strates, échelonnées des événements les plus fréquents aux moins fréquents (cf. planche 6, de haut en bas) :

³³ L'article 2 TCE dispose notamment que les « objectifs généraux de l'Union sont de promouvoir dans l'ensemble de la communauté un développement harmonieux, équilibré et durable des activités économiques, un niveau d'emploi et de protection sociale élevé (...), un haut degré de compétitivité et de convergence des performances économiques, u niveau élevé de protection et d'amélioration de la qualité de l'environnement, le relèvement du niveau et de la qualité de vie, la cohésion économique et sociale et la solidarité entre les Etats membres.

L'article 153 TCE dispose notamment que **la Communauté contribue à la protection de la santé, de la sécurité et des intérêts économiques des consommateurs**

³⁴ Art. 100.2 TCE : « **Lorsqu'un Etat connaît des difficultés ou une menace sérieuse de graves difficultés, en raison de catastrophes naturelles ou d'événements exceptionnels échappant à son contrôle, le Conseil, statuant à la majorité qualifiée sur proposition de la Commission, peut accorder, sous certaines conditions, une assistance financière communautaire à l'Etat membre concerné** ».

³⁵ Fonds de solidarité de l'Union Européenne

³⁶ Assurance de responsabilité civile des véhicules terrestres à moteur, seule garantie d'assurance faisant l'objet d'une harmonisation minimale par 5 générations de directives « motor », vers une harmonisation minimale de la protection basée sur les libertés CE de circulation des personnes, des marchandises et des services

³⁷ Op.cit. note 35

- La 1ère strate correspond aux événements les plus fréquents, Sa gestion optimale implique la **responsabilité individuelle des acteurs**, souvent dénoncée comme atrophie en l'espèce. Cependant, l'assurance contribue à développer la perception de cette responsabilité individuelle, puisque le législateur français, avec la loi CATNAT, a mis en place **une franchise non rachetable**. Par cette « communauté de sort » entre l'assuré et l'assurance, il s'agit d'éviter que les équipements tels que machines à laver, congélateurs ne soient laissés dans un sous sol voir un rez-de-chaussée très souvent inondés. **Cette strate appelle à une réduction de la vulnérabilité à l'échelle individuelle, pour éviter l'exposition ou la survenance du sinistre.**
- La 2ème strate, dans le cas des risques d'inondation, renvoie au **rôle joué par des collectivités territoriales spécialisées**, telles que les syndicats de rivière ou les EPTB³⁸, pour réduire la
- vulnérabilité collective, faisant appel à des notions de solidarités amont-aval et urbain-rural à l'échelle des bassins versants. Le financement de leur action procède de ce que les économistes de l'environnement appellent des *paiements au titre des services environnementaux*, à l'instar des redevances pour la fourniture d'eau potable, l'assainissement des eaux usées, l'élimination des déchets, etc. Cette logique de mutualisation contractuelle à l'échelle des bassins versants organise une forme de transfert de risque qui n'est pas de l'assurance de marché, puisque financée par la fiscalité locale, mais qui est certainement la solution la plus efficace pour atteindre une meilleure équité de traitement entre territoires et entre acteurs.
- La 3ème strate demeure la plus importante, en termes de plage de fonctionnement. Elle correspond à la *mutualisation par l'assurance*, avec le rôle que peut jouer la réassurance et d'autres formules éventuelles de transfert alternatif du risque. Par des investissements collectifs lourds de protection structurelle, l'intensité cumulée des événements pour un bassin versant donné peut néanmoins être réduite, même dans cette tranche de fréquence : l'analyse coûts bénéfiques (ACB) peut alors être un instrument indispensable pour l'aide à la décision en matière de stratégie de réduction de la vulnérabilité.

La 4ème strate s'applique aux pays dont le profil de risque est tel que le marché privé de l'assurance et de la réassurance ne peut pas absorber la totalité du ou des scénarii catastrophe. Dans ce cas, l'Etat est appelé à jouer le rôle de « réassureur de dernier ressort » vis-à-vis de la strate précédente, parce que le risque n'est pas totalement assurable. C'est le cas en France pour le régime catnat, renforcé par la référence au principe constitutionnel de solidarité nationale face aux calamités naturelles. L'ensemble des marchés d'assurance dans le monde s'accordent pour reconnaître un rôle à l'État, comme réassureur de dernier ressort, dès lors que cette intervention n'entrave pas le développement de l'offre d'assurance de marché...

Une cinquième strate est apparue en 2002 : le fonds de solidarité de l'Union Européenne, mobilisable sous certaines conditions pour financier, dans la limite de 1 milliard d'euros par

³⁸ Etablissements publics territoriaux de bassin, consacrés par la loi Bachelot de 2003. Les syndicats de rivière ou, à l'échelle de plus grands bassins versants, les EPTB, sont les maîtres d'ouvrage délégués des communes, départements et régions, pour la réduction de la vulnérabilité des territoires aux inondations, pour la contractualisation de l'indemnisation des servitudes de sur-inondation et l'organisation des solidarités amont-aval. Si ces acteurs territoriaux dédiés obtiennent de leurs mandants les moyens de leurs ambitions, peut-être deviendront-ils pour leurs territoires, à terme et dans des cadres de subsidiarité et d'équité de traitement des administrés à préciser, ce que les gestionnaires de risques sont aux groupes industriels et commerciaux, en assumant une gestion directe des coûts de certains risques collectifs...

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

an, la remise en état de fonctionnement des services vitaux : eau, énergie, transport, télécom, santé, éducation, dès lors qu'ils ne sont pas assurés. L'article L.100.2, du traité des communautés européennes prévoit en outre une solidarité entre États membres dont l'économie serait mise à mal en cas de survenance de catastrophes naturelles, mais il n'a jamais été mis en œuvre.

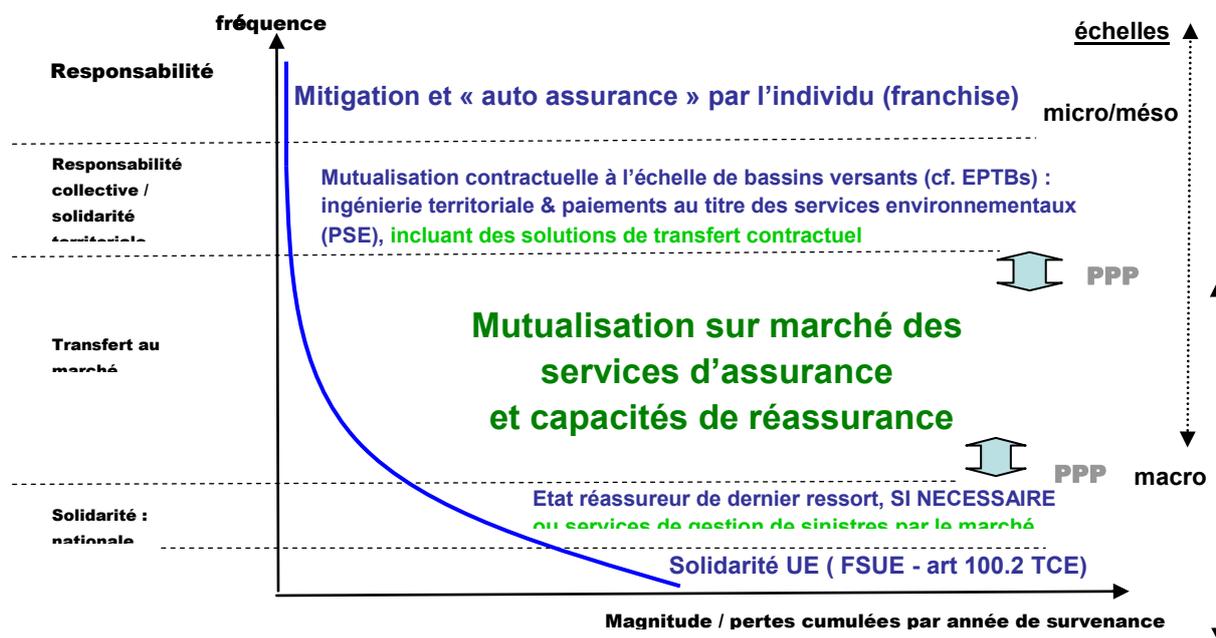
D'un point de vue macro-économique, dans ce « millefeuille » de modes de financement de la prévention et de l'indemnisation, le service d'assurance se trouve donc « enchâssé » entre deux strates de financement d'origine publique :

Financements étatiques, voire supranationaux, par le dessus,

Financements territoriaux, par le dessous.

Ces deux strates publiques, moins explicites dans la perception par les usagers du régime d'indemnisation des sinistres catnat, contribuent probablement à la popularité du mythe d'un « fonds Catnat », perçu à tort comme un fonds public dont les assureurs collecteraient la prime...

Planche 6 - Articulation optimale entre services d'assurance et autres modes de financement selon courbe de Farmer : fréquence = f(amplitude)



Aux deux interfaces de la strate assurances, on trouve donc les possibles partenariats publics-privés (PPP), à des niveaux d'échelle différents, respectivement nationale et territoriale.

Notons enfin que l'échelle de l'UE conduira probablement les Etats membres vers davantage d'intégration des coûts et modes de financement, c'est-à-dire vers une gestion plus globale des risques et un traitement plus équitable entre territoires et acteurs économiques.

2.3. Prise en charge du coût global de la gestion des risques naturels

2.3.1. Approche macro-économique

Hors les dépenses d'assurance, il est difficile d'annualiser les autres charges de gestion des risques naturels, intégrant l'amortissement des dépenses d'aménagement, d'infrastructure et de constructions, qui concourent à l'élévation du niveau de protection des populations et des biens, une part importante des coûts de réseaux de surveillance et d'alerte, des personnels des services de l'Etat qui contribuent à la gestion et la « mitigation³⁹ » du risque, etc...

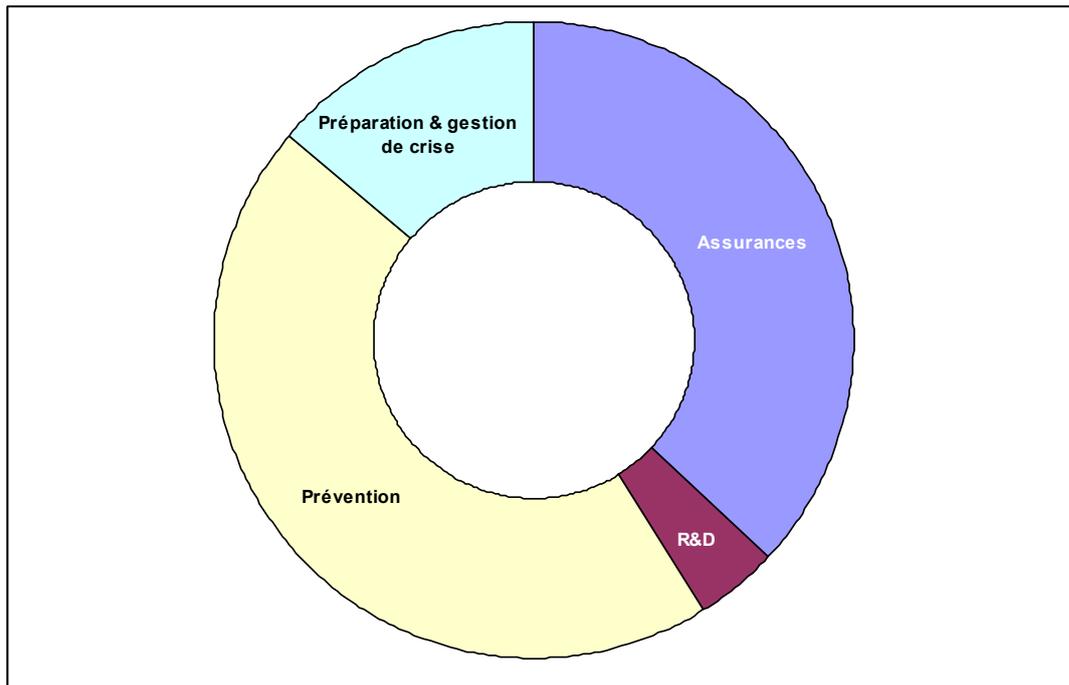
La Confédération helvétique est le seul pays, à ce jour, qui ait analysé le « coût global annuel des dangers naturels » à l'échelle nationale. Sur le graphique de la planche 7 ci-dessous, en forme de camembert évidé, le coût global des dangers naturels est représenté en 4 postes avec, par ordre décroissant d'importance : l'assurance et la prévention, qui sont au coude à coude pour la première place, puis la préparation et gestion de crise et enfin la R & D, qui n'est pas oubliée.

En France, la loi de modernisation de la sécurité civile (2004), a indirectement œuvré pour un changement de paradigme vers une plus grande responsabilisation des acteurs publics et privés, des infrastructures critiques aux citoyens, ces derniers étant remis au cœur du dispositif, y compris d'ailleurs en s'adressant aux plus jeunes générations. Par ailleurs, choix politique non anodin, le législateur a souhaité que la prime d'assurance serve à collecter une partie du financement de la prévention : le Fonds de prévention des risques naturels prévisibles, plus communément appelé Fonds Barnier, est alimenté par un prélèvement sur la surprime catastrophes naturelles. Le taux du prélèvement est aujourd'hui de 12%.

A titre de parallèle, dans certains pays germaniques, l'assurance incendie est choisie comme assiette pour la collecte une taxe parafiscale, servant à financer les pompiers.

³⁹ cf. à ce sujet Roland NUSSBAUM in RISQUES n° 42, op. cit.,

Planche 7 - Cout global des dangers naturels en Suisse, source PLANAT



2.3.2. Approche micro-économique

Instrument de transfert contractuel du financement des risques par nature, l'assurance sera considérée comme répondant à elle-seule au besoin du particulier ou de la petite entreprise, alors que pour les acteurs plus importants, disposant d'une fonction chargée de la gestion des risques, l'assurance est considérée comme un moyen privilégié de financement du risque résiduel, après identification, évaluation et traitement des risques, par différentes stratégies de prévention et de protection. Le rôle de ce professionnel de la gestion technique et financière des risques sera aussi d'optimiser les possibilités éventuelles d'arbitrages ou de complémentarités entre l'assurance et des moyens alternatifs de transfert de risques.

Associée à cette démarche organisationnelle, a été développé d'abord dans les grandes entreprises, le concept d'iceberg du coût global du risque ou *total loss control*, qui permet de porter un regard plus analytique à la nécessaire intégration dans les coûts de l'entreprise de l'ensemble des charges afférentes à la maîtrise des risques (planche 8) :

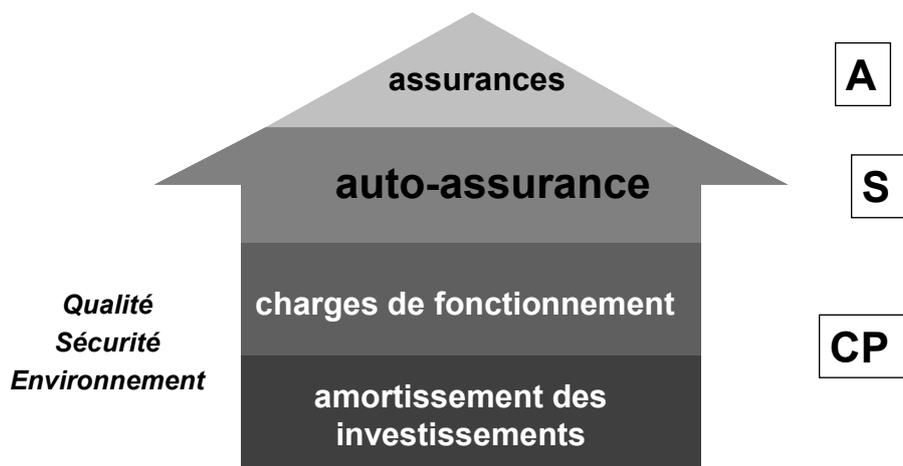
- Charges « visibles » (partie émergée de l'iceberg), au titre des primes d'assurance payées pour le transfert contractuel ou des franchises, voire des sinistres non assurés, gardés à la charge de l'entreprise
- Charges « invisibles » (partie immergée de l'iceberg, beaucoup plus importante que la partie émergée, pour un iceberg en équilibre...), au titre de l'amortissement des investissements de prévention et de protection, des charges de personnel des fonctions de qualité, sécurité, environnement.

Le coût global du risque (exprimé en charge annualisée affectant le compte de résultat de l'entreprise) est alors exprimé comme la somme des charges d'assurance (A), des sinistres auto-assurés (S) et des charges de prévention (CP).

Planche 8

L'iceberg du coût global du risque

représentation schématique du concept de « total loss control »



$$\text{coût global du risque} : C = A + S + CP$$

Il ressort des deux paragraphes précédents, que, contrairement à ce qui prévaut pour les autres grands enjeux environnementaux (eau, déchets, CO₂, etc), l'intégration des externalités (environnementales) que constituent l'ensemble des coûts du risque n'est pas encore reproduite à l'échelle des différents bassins de risque, territoires et pays, ce qui pénalise la décision et l'action publique en ce domaine (cf. § 2.2).

2.4. Partenariats public privé pour la réduction de la vulnérabilité aux catastrophes

Les parties prenantes à la réduction de la vulnérabilité aux catastrophes collectives s'accordent à reconnaître la nécessité de développer diverses formes de partenariats public privé (PPP-DRR), comme garants d'une gouvernance durable de la gestion durable des risques⁴⁰. La typologie proposée par (NUSSBAUM, 2008), se fondant sur les fonctions d'interfaces ainsi créées et les motivations respectives de la partie publique et de la partie privée, distingue quatre grandes catégories de PPP-DRR, illustrées chacune par quelques exemples en France⁴¹ :

⁴⁰ Cf. **Cadre d'Action de Hyogo**, objectif 4 : *reducing the underlying risk factors (cf. introduction)*

⁴¹ La vocation institutionnelle de la MRN, en tant que groupement technique de la profession des assurances en France, l'a impliquée dans de nombreuses expériences de PPP des catégories c) et d) décrites. Elle met ainsi à disposition des EPTB, syndicats de rivière et « plans fleuves », les compétences, outils et données qu'elle a mobilisés dans son observatoire de l'exposition des enjeux particuliers et professionnels aux inondations

a) Politiques publiques DRR impliquant un ou plusieurs PPP :

- le régime d'indemnisation des catastrophes naturelles (cf. annexe 1), associant Etat et sociétés d'assurance dans un partenariat durable, de la conception à la gestion du régime, tant au niveau organisationnel et technique (règles de planification urbaine déclinées dans les zonages réglementaires et de construction), financier (garantie de l'Etat assurant la solvabilité du régime) et politique (effet de levier procuré par la solidarité nationale sur la mutualisation contractuelle, dispositif de traitement des cas rejetés par le marché avec le Bureau Central de Tarification),
- le Fonds de prévention des risques naturels prévisibles (Fonds Barnier), dans la mesure où ce fonds public est alimenté par un prélèvement sur la surprime d'assurance catnat,
- le Conseil d'Orientation pour la Prévention des Risques Naturels Majeurs (COPRNM) et les Commissions Départementales, dans la mesure où y sont représentés les différentes parties prenantes, publiques et privées, pour une gouvernance territoriale concertée de la gestion des risques.

b) Institutions à l'interface public-privé, telles que⁴² en France les associations thématiques : AFPCN, AFPS, CEPRI, le HCFDC, IPGR, IRMA, MRN, SHF, etc, agissant comme autant de « forums hybrides », au sens où les définit (CALLON, 2001), entre pouvoirs publics et société civile.

c) Actions de sensibilisation, éducation ou formation DRR : les exemples sont encore plus nombreux, si l'on en juge notamment par le nombre de colloques et livres blancs à l'initiative notamment des institutions citées ci-dessus et en partenariat avec les pouvoirs publics, mais aussi à l'initiative de ces derniers, notamment de leurs structures spécialisées, telles que, par exemple, les syndicats de rivière et les établissements publics territoriaux de bassin (EPTB),

d) Projets (R&D, infrastructures), outils, services et produits DRR avec dimension PPP : la liste s'avère des plus longues, mais méconnue. De fait, il n'est guère de projet, service ou produit DRR qui ne trouve naissance dans un PPP... Reste à ce que tout le monde y trouve son compte !

Le PPP relatif au système d'indemnisation pourra comporter, à l'instar du cas français :

- une composante politique, relative aux principes, objectifs et politiques de gestion économique, sociale et financière, au regard de critères nationaux qui maximisent la pénétration de l'assurance tout en minimisant les exclusions.
- une composante financière, si nécessaire, notamment lors que l'Etat est engagé comme réassureur de dernier ressort,
- une composante organisationnelle et technique, par l'organisation de l'incitation économique, réglementaire et/ou normative à la prévention et de la gouvernance de gestion des risques.

Conclusion du chapitre :

La France a plusieurs décennies d'expérience d'un partenariat public privé opérationnel en matière d'indemnisation et de lien entre indemnisation et prévention. L'intégration de l'ensemble des composantes de la gestion du risque est nécessaire, pour être en mesure d'agir en réduction de la vulnérabilité individuelle et collective

Une gouvernance concertée du risque capable d'arbitrer entre choix de protection et solutions de transfert de risque (seuils de risque acceptable) passe par le développement d'une métrique conventionnelle du coût moyen annualisé du risque, aux échelles territoriales pertinentes.

⁴² cf. sites des organismes cités (liste indicative)

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

3. Comparaisons internationales et perspectives pour le développement

3.1. Typologie de régimes catnat

Sans prétendre à l'exhaustivité, les tableaux des planches 9 (hors USA) et 10 (pour certains Etats des USA) listent les principaux régimes nationaux d'assurance, par date de création, désignation et type d'aléa couvert, ainsi que par mode de gestion. Dans l'ensemble, les modes de gestion en PPP tendent à s'imposer, avec des situations très nuancées selon les pays, qu'il serait fastidieux de détailler.

Planche 9 – Principaux régimes catnat selon chronologie d'apparition et type de gestion

Pays	Création	Désignation de la couverture	Type de gestion
NZ	1944	Séisme	Etat
ES	1954	Consortio / multipérils	PPP
JA	1966	Séismes	Etat
CH	1953-92	multipérils	PPP
FR	1982	CatNat/multi	PPP
Turquie	2000	TCIP (séismes)	PPP
Taiwan	2002	TREIP (séismes)	PPP
Caraïbe	2008	CCRIF	PPP
RO	2008	multi	PPP
Algérie	2008	multi	PPP

Planche 10 – Solutions d'assurance publiques ou privées aux Etats-Unis

Pays/Etat	Création	Désignation de la couverture	Type de gestion
USA	70ies	NFIP (inondations)	Etat
USA/FL	1993	FHCF (cyclones)	Etat
USA/FL	2002	Citizens Property Insurance Corporation	Etat
USA/CA	1953-92	CEA (séismes)	Etat
USA/AL	1970	AIUA Beach pool	Assureurs
USA/GE	nc	Georgia UA	Assureurs
USA/LO	nc	LCPIC	Assureurs
USA/MI	1987	MWUA	Assureurs
USA/NC	1969	NCIUA	Assureurs
USA/SC	1971	SCWHUA	Assureurs

3.2. Au sein de l'Union européenne

A l'échelle de l'Union européenne, il a déjà été observé, qu'à niveaux de dommages potentiels équivalents, des acteurs économiques ou des particuliers de différents pays membres, n'ont pas accès à des conditions comparables de financement de leur résilience, à la différence de l'assurance de responsabilité civile des véhicules terrestres à moteur. La France, l'Espagne et plus récemment la Belgique sont les pays membres qui ont développé le niveau de protection le plus performant socialement. Si une majorité de pays membres de l'UE n'a aucun système d'assurance catnat, le schéma en PPP de type français connaît maintenant un certain nombre de répliques. Il s'agit de pays membres, où les conditions d'assurabilité s'avèrent difficiles, notamment en raison de la forte exposition à certains aléas et/ou de leur forte fréquence et où la garantie a été considérée par le législateur national comme relevant de règles d'intérêt général, avec un encadrement et/ou un accompagnement de l'Etat, comme réassureur de dernier ressort.

Trois grandes catégories de situations peuvent être distinguées, selon les niveaux d'intervention respectifs de l'Etat et de l'industrie de l'assurance⁴³ d'autre part :

- La configuration qui demeure la plus fréquente est celle où l'Etat n'intervient pas plus dans l'organisation de ce marché particulier que dans les autres marchés de services d'assurance, ni dans son financement et où les extensions de couverture sont donc proposées à titre facultatif. Le taux de pénétration de ces garanties varie alors beaucoup selon la perception du risque et l'exposition effective. Le marché britannique fait figure d'exception dans cette catégorie, avec une pénétration très élevée de l'ordre de 75%, en raison du fait qu'une majorité de biens immobiliers sont financés par des emprunts à très long terme, faisant obligation à l'emprunteur de contracter une assurance multi garantie au bénéfice de l'établissement de crédit. Cette situation donne aux assureurs britanniques une capacité d'exercer des pressions fortes sur les pouvoirs publics, sous menace de se retirer de ce marché en cas d'insuffisance des moyens alloués à la prévention et la protection. A l'inverse, dans la plupart des autres pays européens, le taux de pénétration demeure extrêmement bas, les propriétaires intéressés reculant face au prix de l'assurance, très différencié selon les zones. A défaut de s'assurer, nombre d'entre eux demeurent dans les zones exposées avec l'espoir de bénéficier d'une intervention de l'Etat providence ou de solidarités de voisinage, en cas de catastrophe.
- Au Danemark et aux Pays-Bas, l'assurance joue un rôle minimal ou optionnel dans la fourniture de garanties. C'est l'Etat qui a historiquement organisé un schéma de garantie, soit plus ou moins annualisé au budget ou bien financé par une taxe parafiscale collectée via les polices d'assurance incendie et versée dans un fonds public,

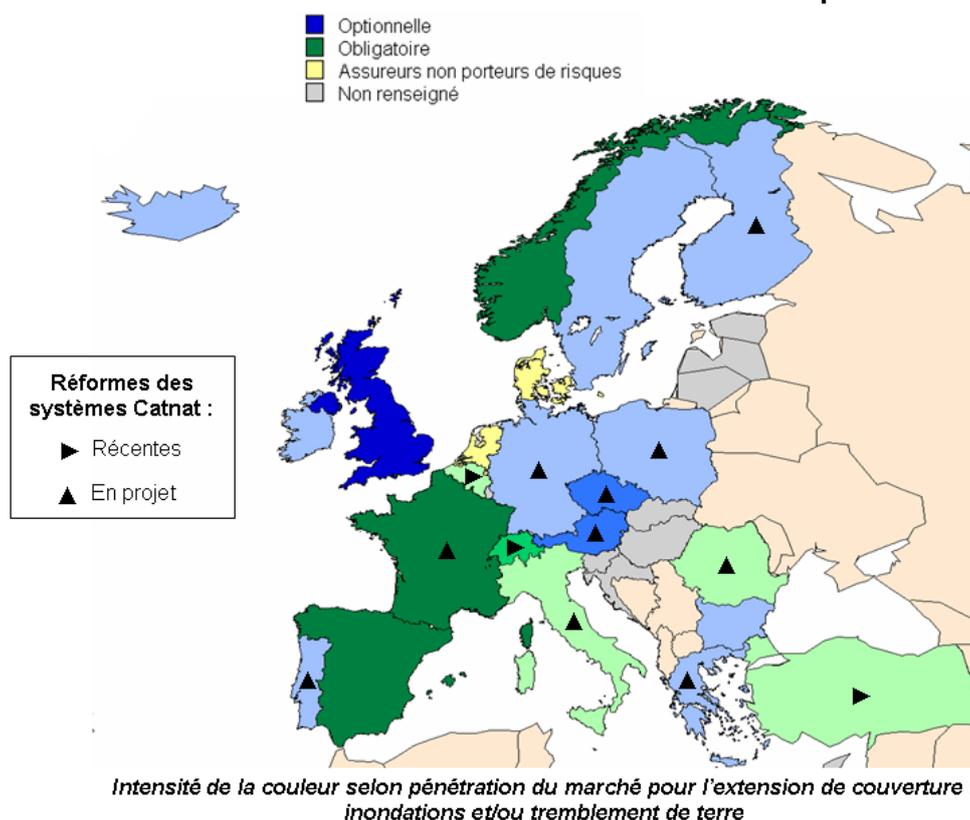
Entre ces deux extrémités du spectre des situations existantes par pays, existe une gamme en nette croissance, de situations, qui se caractérisent par une extension de couverture rendue obligatoire par l'Etat, pour éviter les phénomènes d'anti-sélection :

⁴³ Considérée ici comme la somme des capacités de couverture mobilisées par les acteurs des marchés de l'assurance directe et de la réassurance.

- En Suisse, l'Etat n'intervient pas dans la fourniture de garanties mais a rendu obligatoire d'extension de garantie contre les événements naturels sur les contrats incendie,
- Dans les cas de l'Espagne, la France et la Norvège, diverses solutions, organisées avant l'avènement du marché unique, associent extension de couverture obligatoire aux contrats incendie et intervention de l'Etat, comme réassureur de dernier recours. La Belgique s'est récemment inspirée de l'expérience accumulée dans ces pays et des schémas similaires sont à l'étude du gouvernement et/ou au débat parlementaire en Italie, ainsi que dans d'autres pays membres (Autriche, République Tchèque, Roumanie, etc). Le contrat socle étant librement souscrit dans un marché concurrentiel de l'assurance directe, il n'y a pas entrave au marché unique. Cette approche fait parier le marché en faveur d'une pénétration accélérée de la couverture pour les régions moins avancées de l'Union où l'assurance habitation ne faisait pas encore partie de l'équipement de base de la gestion patrimoniale des ménages.

Planche 11

Typologie des offres d'extension de couverture Catnat selon les marchés nationaux en Europe



Les densités de couleurs sur cette carte traduisent le taux de pénétration de l'extension de couverture catastrophes naturelles (dont les périls couverts varient également selon le pays⁴⁴, les différentes formes d'inondations étant généralement incluses)

⁴⁴ voir www.cea.assur.org document téléchargeable sur l'état des garanties par pays.

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

Il n'est pas surprenant que :

- les pays à extension de couverture obligatoire, avec intervention de l'Etat comme réassureur de dernier ressort, soient aussi certains d'entre ceux dont le profil de risque s'avère le plus élevé, notamment en raison de l'addition au tableau de l'exposition aux catastrophes d'origine climatique, celui de scénarios potentiels de catastrophes d'origine sismique,
- d'autres pays, avec ce même profil de risque élevé, ne soient pas parvenus encore à construire une solution viable : cas de la Bulgarie, de la Grèce, de Malte, du Portugal, pour n'en citer que quelques uns et, qu'à l'instar de l'Italie et de la Roumanie, ils comptent beaucoup, si ce n'est sur une initiative, du moins sur une coopération impulsée par l'Union dans ce domaine... Le constat est que le développement de solutions d'assurance dans ces situations de forte exposition, potentiellement accentuées par le changement climatique, ne peut avoir lieu du fait du seul marché : des formes de coopération s'avèrent nécessaires entre les autorités publiques et les marchés d'assurances, comme il en existe même aux Etats-Unis.

Si les conditions et proportions d'une éventuelle assistance financière ne sont définies *ex ante*, il y aura un frein supplémentaire au développement de solutions d'assurance contre les dommages causés par les catastrophes naturelles, dans les nombreux pays membres, où la consommation d'assurance est appelée à progresser dans les prochaines années.

Bien que plusieurs événements catastrophiques soient survenus, il n'y a pas eu depuis une occasion de mise en œuvre et de clarification de cette disposition. Ainsi pour l'institution, en automne 2002, d'un **Fonds de solidarité européen**⁴⁵ (FSUE), suite aux crues catastrophiques de l'été précédent en Europe centrale et de septembre dans le Gard, il n'a pas du tout été fait référence à cet article 100 du TCE ! Les considérant mobilisés lui ont préféré des dispositions non spécifiques de la politique de cohésion économique et sociale ou politique régionale⁴⁶ et une disposition de procédure⁴⁷

Le tableau de la planche 12 ci-après fournit des informations chiffrées pour les 4 premières années de fonctionnement du FSUE, sur les montants cumulés, rapportés aux pertes économiques totales (2ème colonne) :

- de la part assurée des sinistres (3ème et 4ème colonnes), pour une moyenne de 21 % (fourchette de 8 à 32 %),
- des interventions du fonds (5ème et 6ème colonnes), pour une moyenne de 2 % (fourchette de 1 à 3 %).

⁴⁵ Règlement du Conseil européen N° 2010/2002, du 11 novembre 2002, instituant le FSUE, en cas de catastrophes majeures

⁴⁶ Art. 159.3 TCE - *Si des actions spécifiques s'avèrent nécessaires en dehors des fonds, et sans préjudice des mesures décidées dans le cadre des autres politiques de la Communauté, ces actions peuvent être arrêtées par le Conseil, statuant conformément à la procédure visée à l'article 251 et après consultation du Comité économique et social et du Comité des régions.*

⁴⁷ Article 308 TCE - *Autorisant le Conseil à prendre à l'unanimité, sur consultation de la Commission et après consultation du Parlement européen, la décision d'une action de la Communauté qui apparaît nécessaire pour réaliser, dans le fonctionnement du marché commun, l'un des objets de la Communauté, sans que le présent traité ait prévu les pouvoirs d'action requis à cet effet.*

Année	Pertes Economiques	Sinistres assurés		Aide accordée par le FSUE	
		Montant	% PE	Montant	% PE
2002	28 789,3	6 964,1	24%	728	3%
2003	16 226,9	1 249,7	8%	107,1	1%
2004	2 229,7	724,2	32%	19,6	1%
2005	15 355,9	4 108,3	27%	204,9	1%
Total	62 601,8	13 046,4	21%	1 059,6	2%

Les chiffres parlent d'eux-mêmes sur les poids relatifs de l'assurance de marché et de la solidarité (européenne) dans la prise en charge des dommages causés par les catastrophes naturelles !

Deux remarques néanmoins :e,

- le poids relatif insuffisant, que représentent les indemnités sur dommages assurés, traduit la faible pénétration de cette garantie, déjà relevée,
- la part très faible du FSUE par rapport à celle de l'assurance s'avère cohérente avec la prééminence donnée aux solutions de marché : le FSUE, instrument de la politique régionale, n'a qu'une vocation d'appui à la remise en état des secteurs vitaux (eau, énergie, transport, télécoms, éducation et santé, pour autant qu'il n'y a pas d'assurance) sous la condition que les dommages cumulés franchissent un certain seuil du PIB de la région sinistrée et sous un contrôle strict des services de la Commission.

3.3. Perspectives pour le développement

Dans les pays en développement, une demande croissante d'assurance s'exprime en termes de réponses à des besoins élémentaires, dans les domaines clés des « risques » (par ordre décroissant de priorité liée aux enjeux de subsistance) : santé, crédit emprunteur, agricole (climatique, calamités s/ récoltes-bétail), habitat, pertes d'exploitation pour les exploitation agricoles, artisanales et commerciales .

S'ajoutent à l'échelle des Etats des formes de couverture du risque « souverain » (facilité de trésorerie, couverture du patrimoine de l'Etat).

Outre l'assurance traditionnelle peuvent être adaptées des solutions alternatives d'assurance paramétrique (déclenchée par le franchissement d'un seuil prédéterminé, par exemple en risques climatiques) et aussi de micro-assurance, qui peut impliquer des formes de distribution, voire de gestion à l'échelle communautaire. Une récente publication⁴⁸ mentionne plus d'une trentaine d'expériences de ce dans les pays en développement à travers le monde.

⁴⁸ OCDE, 2008, Aspects économiques de l'adaptation au changement climatique – coûts, bénéfices et instruments économiques, Agrawala S. et Fankhauser S, Editeurs. 153 p.

Comme indiqué en introduction, la Banque Mondiale à travers la GFDRR, les Banques régionales de développement, en coopération avec les agences de développement bilatérales jouent un rôle d'ingénierie politique, financière et opérationnelle pour l'émergence de tels projets. Ces bailleurs s'appuient sur les opérateurs qui dominent la partie amont de l'industrie de l'assurance décrite dans cet article, à savoir les grands réassureurs, courtiers de réassurance et agences de modélisation.

Les deux leaders de la réassurance mondiale, Swiss Re et Munich Re, ont chacun des formes d'intervention adaptées aux trois grands niveaux de clientèle visés, qui s'articulent ainsi : PPP au niveau *macro*, « B2B » au niveau *meso* et « B2C » au niveau *micro*. Ainsi la *Munich Climate Insurance Initiative* (MCII) a été constituée autour de la Munich Re pour proposer aux pays en développement, dans le cadre de stratégies d'adaptation au changement climatique, des solutions complètes de gestion des risques face à la variabilité et aux extrêmes climatiques. Il n'est pas surprenant que celles-ci reposent sur un pilier prévention et un pilier assurance⁴⁹.

CONCLUSION GENERALE

Au terme de ce tour d'horizon des cadres internationaux, où la prévention des risques naturels a progressivement fait son apparition, au fil des catastrophes, force est de reconnaître qu'elle n'a pas acquis un statut de « bien public mondial »⁵⁰, ni même de priorité politique impliquant des engagements contraignants de la part des Etats.

L'exemple emblématique de ce décalage est bien sûr le domaine du changement climatique, où des objectifs concrets n'ont été énoncés, pour l'heure, qu'en termes d'atténuation (protocole de Kyoto). assortis d'engagements des Etats à réduire les émissions de carbone.

D'avantage convaincue de l'action conjointe nécessaire entre atténuation et adaptation, la communauté internationale ne devrait-elle pas retenir comme objectif majeur du processus « post Kyoto », l'approfondissement, dans le domaine de la gestion des risques d'origine naturelle également, des logiques d'intégration des externalités environnementales dans le prix des biens et services, chaque fois que cela est possible⁵¹ ? Les sociétés modernes reconnaissent en effet le caractère incontournable de modèles économiques, qui permettent d'intégrer dans le coût de la vie des charges liées à la satisfaction de services élémentaires tels que par exemple :

- ➔ l'eau, incorporant les coûts de captage, transport, prétraitement et d'épuration des eaux usées,
- ➔ le traitement des déchets, incorporant des coûts de collecte, élimination, etc,
- ➔ les services de santé, avec moult filières de soins et formes de solidarisation et mutualisation des coûts
- ➔ le carbone, avec les instruments de marché et de régulation associés, introduits pour l'atténuation par le protocole de Kyoto

Dans ces conditions, pour une concurrence équitable entre les pays, les territoires et les acteurs économiques dans un contexte d'exposition accrue aux extrêmes climatiques, **il**

⁴⁹ MCII, 2008, Insurance Instruments for Adapting to Climate Risks, A proposal for the Bali Action Plan, Submission by the Munich Climate Insurance Initiative, 3rd Session of the Ad Hoc Working Group on Long Term Cooperative Action under the Convention (AWG-LGA 3a, Accra 21-17, 2008).

⁵⁰ Cf. notamment <http://www.undp.org/globalpublicgoods/> et <http://www.undp.org/globalpublicgoods/globalization/toc.html>

⁵¹ et dans les limites de l'acquis communautaire dans le cas de l'UE

s'agirait notamment de concevoir et mettre en œuvre, des modèles économiques, associant une combinaison optimale entre instruments de marché et financement public, qui iraient dans le sens de faire supporter aux différentes catégories d'acteurs concernés et à due proportion :

- D'une part, le « **paiement des services environnementaux** » liés à la **protection, la prévention et la réduction des vulnérabilités de ces patrimoines et activités contre les catastrophes naturelles**, en distinguant ce qui relève de la responsabilité de chacun de ce qui est du ressort des collectivités publiques, aux différents niveaux de subsidiarité.
- D'autre part, la « **pris en charge des coûts moyens annualisés des risques résiduels** », par le recours aux instruments de transfert et de financement *ex ante* des risques, à savoir, comme l'a relevé la Commission européenne dans son Livre vert⁵², la mutualisation des risques par des services d'assurance, en PPP⁵³ avec l'Etat, réassureur de dernier ressort et/ou le niveau international (FSUE par exemple ou IFI) si nécessaire, en fonction du profil de risque maximum possible du pays.

Les modalités et délais associés à cet objectif seraient adaptés selon les niveaux de développement des pays ou régions du monde :

- intégration à relativement court terme pour les pays développés, avec une attention particulière pour la coordination des niveaux d'intégration visés entre l'UE et les autres pays ou régions membres de l'OCDE,
- intégration par paliers, pour les pays en développement, selon des critères à définir et en couplage avec la clause de conditionnalité de l'aide au développement associée.

Enfin on retiendra aussi que le développement d'une capacité de résilience économique face à une crise majeure requiert aussi de travailler *ex ante* sur l'articulation optimale entre modes de transfert de risque, de manière à ce que le principe de partage des responsabilités s'accompagne d'une augmentation de la conscience du risque, d'une diminution de l'aléa moral et partant, du renforcement des mesures de réduction du risque.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Indemnisation et prévention - l'intervention des assureurs, à la lumière de l'expérience du marché français de l'assurance

Les liens entre assurance et prévention dans le système français sont détaillés dans les encadrés ci-après, pour illustrer par l'exemple français les différents points d'un

⁵² « les nouveaux produits que pourrait mettre au point le secteur de l'assurance afin de réduire les risques et la vulnérabilité avant la survenue des catastrophes. La création de primes d'assurance anticipant les changements climatiques pourrait favoriser la mise en œuvre de mesures d'adaptation privées. » Livre vert, Adaptation au changement climatique en Europe: les possibilités d'action de l'Union Européenne, 29/06/07, § 4. L'EUROPE DOIT S'ADAPTER – LES DEFIS DE LA SOCIETE EUROPEENNE ET DE L'ACTION PUBLIQUE EUROPEENNE, *Comment les Européens doivent-ils s'adapter?*

⁵³ Partenariat Public Privé

Atelier de Formation sur Risques Majeurs et Catastrophes Naturelles

Stratégies de Prévention et de Protection

argumentaire réalisé le Comité Européen des Assurances (CEA), instance représentative auprès de l'OCDE et des institutions européennes, de 35 marchés nationaux d'assurance en Europe.

1. Les services d'assurance contribuent à la prévention des risques naturels :

L'objet et la valeur ajoutée spécifique des services d'assurance sont d'organiser :

- un transfert contractuel de risques individuels par la technique de mutualisation, qui s'appuie notamment sur :
 - o une perception non biaisée de chaque risque ;
 - o des outils de quantification de l'exposition aux aléas dans l'espace et le temps ;
 - o une connaissance des assurés provenant d'autres produits.
- des procédures d'expertise fiables et rapides ;
- des services de gestion de sinistres efficaces et impartiaux ;
- des accès à la réassurance et à des capacités supplémentaires, si nécessaire.

Exemple français : La forte densité d'assurance contre l'incendie des biens des particuliers et des entreprises français (supérieure à 90 % en métropole) a été un facteur décisif au consensus entre Etat et marché de l'assurance pour l'introduction d'une extension de garantie obligatoire des dommages causés par des catastrophes naturelles, sur ces contrats librement souscrits.

Les assurés apprécient l'efficacité, l'équité et la rapidité des services d'expertise et de gestion de sinistres mis en œuvre par leurs assureurs et intermédiaires d'assurance.

Les sociétés d'assurance ont eu, dès l'origine du système, la possibilité de se réassurer auprès de la Caisse Centrale de Réassurance et bénéficier ainsi de toute la capacité requise, avec la garantie de l'Etat et au-delà d'un montant raisonnable, restant toujours à leur charge.

L'existence même d'une offre d'assurance incite les preneurs d'assurance à développer leur conscience du risque et à réduire leur exposition, en prenant en considération le niveau de la prime et/ou de la franchise restant à leur charge. La prestation de service financier peut s'accompagner de services d'assistance, d'information et de conseils en prévention.

Exemple français : La forte hétérogénéité de l'exposition, selon la nature et la distribution géographique des aléas comme des enjeux, ainsi qu'un principe constitutionnel de solidarité des citoyens devant les calamités nationales, ont plaidé pour la mise en place d'un taux de surprime uniforme, applicable au contrat socle pour déterminer la prime de la garantie des catastrophes naturelles. En revanche, la franchise peut être majorée en cas de non respect par la commune ou l'assuré de dispositions d'urbanisme (cf. 1.3 et 2.1, 2.2.). En complément à leurs services d'assistance à domicile, la plupart des sociétés d'assurance diffusent de l'information de prévention.

Le rapport coût / avantage des services d'assurance demeure intéressant pour autant que la fréquence des événements est limitée par des mesures de prévention des risques. Pour éviter les effets de l'anti-sélection sur l'équilibre économique de la libre mutualisation, des extensions de couvertures obligatoires ont été introduites par certains Etats, avec des résultats positifs.

Exemple français : Jusqu'aux récentes années, l'accroissement de la sinistralité à fréquence prise en charge par le système d'indemnisation a engendré un relèvement de la surprime, en l'absence de grande catastrophe, d'où une nécessité renforcée d'accélérer la mise en place des outils de politique publique territoriale de prévention prévus dès l'origine. Une modulation de franchise a été introduite en cas de sinistre répété sur les communes où un tel outil n'avait pas été mis en chantier ou bien lorsque ce dernier n'avait pas abouti dans un délai raisonnable.

2. Un partenariat public-privé est nécessaire pour une gestion intégrée du risque

Au stade de la conception-même du système d'indemnisation, il y a lieu d'organiser précisément, par les autorités compétentes, le traitement différencié :

- des situations individuelles d'exclusion du marché (clients qui ne trouvent pas de couverture en raison d'une exposition ou d'une fréquence excessive), qui peuvent se présenter aussi dans le cas d'une extension de couverture obligatoire ;
- des personnes qui ne s'assurent pas.

Exemple français : La loi organise la possibilité de recours à une instance arbitrale paritaire, appelée « bureau central de tarification », pour les assurés, qui se seraient trouvés exclus par le marché. Ces derniers sont incités à réduire leur exposition, par des conditions de franchise majorée.

En relation avec les autorités compétentes peuvent être définies, chaque fois que possible, des relations de couplage entre les conditions d'assurance et les dispositions introduisant des obligations au particulier, telles que par exemple :

- les politiques d'urbanisme et d'aménagement, à travers le zonage notamment ;
- l'application de règles ou standards de prévention sur la construction, sans pour autant que l'assureur n'assume la fonction de police administrative.

Exemple français : La loi prévoit un lien direct entre le zonage réglementaire des outils de la politique publique territoriale de prévention et les conditions d'assurance (majorations de franchise).

Ce partenariat doit aussi prévoir des échanges d'informations gagnant-gagnant sur :

- les données de cartographie d'aléa et de zonage produites par les autorités publiques, de façon à ce que les assureurs puissent disposer de cette information émanant du secteur public, sans avoir à supporter des charges supplémentaires pour constituer des informations déjà existantes ;
- les données relatives au nombre de sinistrés et au montant des dommages, rassemblées par le marché de l'assurance, pour contribuer au retour d'expérience et à la définition de priorités dans les politiques publiques de prévention.

Exemple français : Le marché de l'assurance a constitué un groupement technique dédié à des fonctions d'interfaces et d'échanges d'informations avec les pouvoirs publics nationaux et territoriaux : la **Mission des sociétés d'assurances pour la connaissance et la prévention des risques naturels (MRN)**. Cette association permet aussi au marché de l'assurance de développer ses propres instruments de mesure et de négociation des politiques publiques de prévention. Voir son site : www.mrn-gpsa.org

ANNEXE 2 - Développement du potentiel de la société de l'information pour informer et sensibiliser les acteurs économiques à la prévention

Avec un dispositif légal et réglementaire qui consacre non seulement une obligation d'information faite :

- aux communes d'une part : loi de 87 introduisant l'information préventive,
- lors des transactions immobilières : Loi Bachelot de 2003 introduisant l'information de l'acquéreur et du locataire,

mais aussi des servitudes d'utilité publique, telles que :

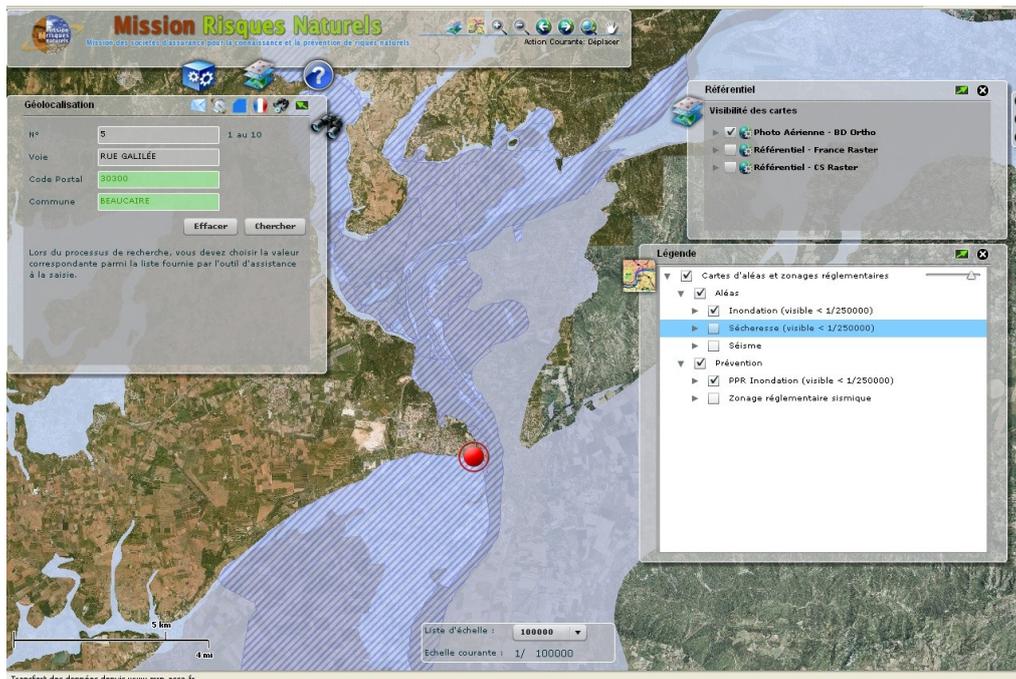
- les zonages de PPRN : loi de 1982, révisé par la loi Barnier 1995,
- les zones d'expansion de crue : loi Bachelot de 2003,

ce sont tout un ensemble de professions au contact du public : géomètres experts, notaires, professions immobilières, assureurs, qui s'approprient les technologies géomatiques et leur utilisation dans la société de l'information, pour offrir diverses des prestations d'information et de sensibilisation à l'exposition aux aléas naturels, ce qui constitue un premier pas vers une démarche de réduction de la vulnérabilité.

Exemple du SIG MRN au service de la profession des assureurs⁵⁴

Cet exemple décrit le cas d'un ingénieur en prévention travaillant pour le compte d'une société d'assurance, qui doit se rendre sur le site d'une entreprise cliente, pour évaluer les risques que cette dernière souhaite lui transférer. L'objectif consiste à délivrer un pré-diagnostic de l'exposition du site aux aléas naturels. L'image ci-dessous donne un aperçu de l'application SIG MRN, accessible à toutes les sociétés d'assurance membres de la FFSA et du GEMA. Après saisie de l'adresse, ou des coordonnées GPS dans la zone adaptée, en haut à gauche de l'interface, le lieu de risques est positionné sur le territoire sur lequel sont représentées les cartes des zones d'aléas naturels :

⁵⁴ Jérôme CHEMITTE, Chadi HAJJI et Roland NUSSBAUM, 2007, De la connaissance à la prévention des risques naturels : l'exemple des outils développés par le secteur de l'assurance, in Géographes et assureurs face aux risques naturels, MAIF – Université de Montpellier III, 8 juin 2007 et Les Entretiens du Risque, IMdR-GRID laboratoire commun CNRS/ENSAM/ESTP, 13-14 décembre 07 Résultats confirmés par une récente publication du MEEDDM



Ecran de dialogue de l'application SIG MRN

pour l'analyse de l'exposition aux aléas naturels de lieu de risques assurés

Cette première analyse cartographique est approfondie dans un rapport d'exposition livré par le système à la demande de l'utilisateur, par un simple clic sur l'adresse qui apparaît dans la zone de dialogue située sous l'interface cartographique. Il rappelle la situation du lieu de risques au regard des différents aléas naturels⁵⁵, son éventuelle position dans le zonage réglementaire d'un PPR ainsi que le règlement associé, le nombre d'arrêtés de catastrophe naturelle déclarés au JO pour la commune sur laquelle il se situe, les perspectives de modulation de franchise fonction de ce nombre et du stade de maturité du PPR, la présence d'information préventive sur la commune, ou bien encore des informations sur la proportion des entreprises situées dans les zones d'aléa de cette commune. Enfin, il est suggéré un seuil de vigilance pour chacun des aléas considérés, fonction des différents paramètres évoqués ci-dessus.

L'ingénieur dispose alors des éléments nécessaires pour évoquer le sujet avec son client, dans le but de le sensibiliser aux risques auxquels il est exposé, l'informer des prescriptions réglementaires qu'il doit respecter sous peine de majoration de franchise, l'accompagner dans un diagnostic approfondi de sa vulnérabilité, en s'attardant notamment sur les dommages indirects possibles (pertes d'exploitation), souvent sous-estimés, afin de l'accompagner dans le choix des mesures de mitigation qu'il pourrait engager pour accroître sa résilience.

⁵⁵ Si un site n'est pas détecté en zone d'aléa, cela ne signifie pas pour autant qu'il n'est pas susceptible d'être sinistré en cas de survenance d'un événement qui n'aurait pas été cartographié. Pour apprécier cette incertitude, des indicateurs supplémentaires sont livrés à l'utilisateur à partir de méthodes et critères spécifiques.

BIBLIOGRAPHIE DE L'AUTEUR

- NUSSBAUM Roland, 2009, **Conventions, accords et programmes internationaux pour la prévention des catastrophes naturelles**, in **La Prévention des Risques Naturels, Bilan et nouvelles perspectives en droit national et droit comparé** sous la direction de Ph. Billet et S. Soumastre, Actes du colloque national 2008 de la Société Française pour le Droit de l'Environnement (SFDE), téléchargeables sur www.prim.net/catalogue pp. 52-72
- NUSSBAUM Roland, 2008, **Des changements climatiques mieux assurés**, in **Climat et risques - Changements d'approches**, Travaux du Groupement de recherches du CNRS sur les risques liés au climat (GDR 2663 « Riclim ») sous la direction de Denis Lamarre (17 coauteurs). Editions Tec & Doc – Lavoisier, Paris, collection « Sciences du risque et du danger », série Innovations, 170 pages, mai 2008.
pp.125-149
- NUSSBAUM Roland, 2008, **Articuler assurance et solidarité dans le financement de la réparation des dommages causés par les catastrophes naturelles : un objectif pour l'Union européenne du 21^{ème} siècle ?**, in **Solidarité et assurance. Les sociétés européennes face aux catastrophes (17-21^{ème} siècles)**, sous la direction de René Favier et Christian Pfister, Presses Universitaires de Grenoble, janvier 2008, actes du colloque de *Grenoble, MSH Alpes, 12-13 octobre 2006*, pp. 309-345.
- NUSSBAUM Roland, 2008, **Partenariats public-privé, des atouts pour gérer le risque, Face au risque**, N° 444, juin-juillet 2008, Dossier Risques naturels, pages 17-20,
- NUSSBAUM Roland, 2006, « **L'assurance, financement vertueux de la reconstruction** » *Tribune* dans la revue pour une terre durable du BRGM - Géosciences, N° 6 - Numéro spécial « risque tellurique »
- NUSSBAUM Roland, 2006, **Le coût des inondations et le financement des dommages**, 12 pages, in Houille blanche, revue de la Société Hydrotechnique Française, colloque des 15 et 16 mars 2006, Valeurs extrêmes
- NUSSBAUM Roland, 2005, **Les partenariats public privé (PPP) pour le développement de l'assurance des catastrophes naturelles en Europe**, Risques, n° 64 – Octobre-Décembre 2005, Dossier Partenariats public/privé, mythes et réalités, pages 86-94
- NUSSBAUM Roland, 2002, **La place des assurances dans la gestion des risques naturels**, in **Risques naturels et aménagement en Europe**, sous la Direction d'Yvette Veyret, Editions Armand Colin, p.233-235.
- NUSSBAUM Roland, 2000, **Pour une géographie économique des risques naturels**, Géocarrefour, vol 75 3/2000 (Revue de Géographie de Lyon), pp. 255 – 260.

BIBLIOGRAPHIE GENERALE

ALBOUY François Xavier, **Le temps des catastrophes**, Descartes et Cie, 2002

BILLET Ph. and SOUMASTRE S. editors, Actes du colloque national 2008 de la Société Française pour le Droit de l'Environnement, publications du ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de la mer, , 2009, pp ; 137-159, téléchargeable sur www.prim.net/catalogue

BOUWER, Laurens M. CROMPTON, Ryan P. FAUST, Eberhard HOPPE, PIELKE Jr, Roger Peter A. 2007, **Disaster Management, Confronting Disaster Losses**, Science, Vol 318, 2 November 2007, P. 753

CHIAPPORI Pierre-André, 1997, **Risque et assurance**, Ed. Flammarion, Coll. Dominos, de BOISSIEU Jean-Luc, 2001, **L'assurance facile**, Editions lpm

EWALD François, LORENZI Jean-Hervé (dirigé par), 1998, **Encyclopédie de l'assurance**, Economica

KUNREUTHER Howard, 2006, **Reflections on US Disaster Insurance Policy for the 21st Century**, in *Risking House and Home: Disasters, Cities, Public Policy*, Berkeley Public Policy Press

2006, **Has the time come for Comprehensive natural Disaster Insurance?** in *On Risk and Disaster: Lessons from Hurricane Katrina*, University of Pennsylvania Press

1999, **The complementary roles of mitigation and insurance in managing catastrophic risks**, *Risk Analysis*, Vo 19, N° 4, p. 727- 738

1998, **Paying the Price – The status and the role of insurance against natural disasters in the United States**, Editor with ROTH Richard J., Sr, Joseph Henry Press

MARCELLIS-WARIN Nathalie, MICHEL-KERJAN Erwan, 2001, **The Public-Private Sector Risk sharing in the French Insurance “Cat. Nat. System”**, Série scientifique du CIRANO, Montréal

MICHEL-KERJAN, Erwann, January 2007, **Disasters and Public Policy: Can Market Lessons Help Address Government Failures?**, Ecole Polytechnique, Laboratoire d'Econométrie, CNRS, Cahier n° 2007-0

ZAJDENWEBER Daniel, 2009, **Economie des extrêmes**, Nouvelle bibliothèque scientifique, Flammarion

2006, **Economie et gestion de l'assurance**, *Economica*, Finance

DOCUMENTATION INSTITUTIONNELLE

Caisse Centrale de Réassurance - publication *annuelle* sur www.ccr.fr : **les catastrophes naturelles en France**,

FFSA www.ffsa.fr rapport d'évaluation de l'impact potentiel du changement climatique sur l'assurance française

Munich Re

- Knowledge series,
- Topics Geo (*annuel*) – **Rétrospective des catastrophes naturelles survenues en ...**

Swiss Re :

- Sigma (*numéro annuel*) – **Catastrophes naturelles et techniques en... -**
- Focus reports