

# **Colloque SHF : «Valeurs rares et extrêmes de précipitations et de débits, pour une meilleure maîtrise des risques»**

**Lyon, 15-16 mars 2006**

**Compte-rendu établi par Thibaut Mathevet (EDF-DTG), Sandrine le Clerc (Coyne et Belier) et Patrick Bonnet (CFBR)**

Ce colloque de la SHF, traitait de thèmes répondant à des préoccupations d'ordre scientifique, méthodologique et pratique, sur la climatologie, l'hydrologie et l'hydraulique, concernant principalement les risques de crues pluviales rares et extrêmes.

On a effectué un état des connaissances historiques et actuelles avec les avantages et les inconvénients des méthodes en usage et leurs limites, leurs évolutions et améliorations, avec une présentation des recherches en cours.

On a insisté sur :

- les échelles géographiques et temporelles adaptées au climat local et régional, au relief, à la géologie, pour les précipitations produites par la dynamique météorologique de l'atmosphère et les crues extrêmes consécutives en Europe et dans le Monde.
- les incertitudes affectant les observations et mesures, ainsi que la modélisation des processus physiques.

On a distingué soigneusement les références de risques pour l'aménagement du territoire (alea : fréquences 10%, 1%), et les références de risques pour le développement industriel (barrages,...) (alea de probabilité 0.01, 0.001, 0.0001, 0.00001...), en relation avec la vulnérabilité.

On a développé largement le thème sur une « meilleure maîtrise des risques », avec la participation de spécialistes nationaux, européens et internationaux.

Ces journées de colloque sur les "valeurs rares et extrêmes de précipitations et de débits, pour une meilleure maîtrise des risques" détaillent les enjeux et montrent tout l'intérêt qu'ont ici les différents acteurs de la prévention à collaborer dans leurs travaux.

## **I - SYNTHÈSE DE LA JOURNÉE DU 15 MARS 2006**

Au cours de la première journée du colloque sur les « valeurs rares et extrêmes de précipitations et de débits, pour une meilleure maîtrise des risques » organisé par la Société Hydrotechnique de France et le Comité Français des Barrages et Réservoirs, deux composantes des risques pluviométriques et hydrologiques ont été abordées : la connaissance générale des risques et l'estimation des aléas.

La séance du matin, présidée par François BARTHELEMY, apportait des éléments généraux sur la connaissance des risques et des extrêmes pluviométriques et hydrologiques. Le colloque a été ouvert par une conférence générale sur l'affichage des risques et deux présentations sur la connaissance historique des extrêmes et la gestion des risques d'inondation.

La séance de l'après midi, présidée par Daniel DUBAND, concernait la prédétermination des débits extrêmes par différentes méthodes. Au travers de quatre présentations, différentes méthodes de prédétermination des débits extrêmes ont été présentées.

## **I.1 Connaissance générale des risques et des extrêmes**

### ***I.1.1 Affichage des risques***

L'affichage des risques rencontre plusieurs difficultés :

- La difficulté d'expliquer au grand public les notions de risques, d'événements rares ou extrêmes, de probabilité d'occurrence, de période de retour ;
- l'érosion de la mémoire des risques et la disparition des marques laissées par les catastrophes ;
- les interactions entre risques naturels et anthropiques.

### ***I.1.2 Connaissance des extrêmes***

La connaissance générale des extrêmes repose sur la mise au point et l'entretien de réseaux d'observation météorologique et hydrologique de par le monde. La compilation de données, de l'échelle locale à l'échelle mondiale, permet d'apporter une meilleure connaissance des gammes de variations et de comportement des précipitations et des débits extrêmes pour différents types de bassins versants. Ces traitements permettent ainsi une meilleure connaissance des extrêmes.

## **I.2 DISCUSSIONS**

### ***I.2.1 Connaissance générale des risques et des extrêmes***

#### **Conférence introductive 'Affichage des risques', François Barthélemy**

L'affichage des risques répond à une demande du public mais il est également nécessaire pour assurer une meilleure gestion de la prévention des risques, comme de la gestion des situations de crise. Pour cela, il faut améliorer sans cesse la connaissance des risques et la diffuser sous une forme pertinente pour informer efficacement les divers acteurs intéressés : élus, administrations, industriels, populations.

*D. Loudière (CG GREF) revient sur la difficulté de communiquer autour des risques, sur la difficulté de choisir un vocabulaire adapté à différents publics. Il insiste sur le besoin de réaliser une meilleure communication autour des risques, le besoin d'expliquer et de faire comprendre les risques afin d'entretenir la mémoire des risques, qui permet une meilleure prévention. Pour cela, il rappelle qu'il est important de situer les risques, de classer leurs niveaux de probabilité d'occurrence, car « les extrêmes sont des phénomènes rares ». Enfin, D. Loudière fait remarquer qu'il faudrait une meilleure définition des crues maximales probables (PMF) qui pourrait être « un événement dont l'ampleur est telle qu'elle ne soit jamais dépassée » ou « un événement dont l'ampleur est telle que la probabilité d'occurrence ne soit presque jamais dépassée ».*

*R. Coulomb (SHF) revient sur les différences d'approches suivies pour l'estimation et l'affichage des risques technologiques et naturels. Il rappelle que le grand public ne comprend généralement pas (ou peu) ce que signifient les repères naturels de crues, tels que ceux de la crue de 1910 dans Paris. Il suggère que les SIG pourraient être intéressants pour cartographier et afficher localement ces repères afin de mieux informer le grand public sur les zones susceptibles d'inondations. Enfin, R. Coulomb trouve qu'il y a encore une plus grande difficulté à tracer les risques technologiques, dont les vestiges d'accidents restent rares (ex. : le peu de restes de la catastrophe de Malpasset).*

*F. Barthélemy (MEDD-IGE) est en accord avec R. Coulomb sur le fait qu'il y a une grande différence entre les risques technologiques et naturels. Les risques technologiques sont caractérisés par la*

*possibilité de nombreuses actions de prévention, par la possibilité du déplacement ou de la fermeture de zones d'activités à risques (ex. : déménagement d'usines de la banlieue parisienne et lyonnaise ; fermeture du dépôt de G.P.L. du port de Lyon).*

*L. Coste (Nîmes) revient quant à lui sur la différence de culture et de communication du risque entre la France et l'Italie. Il cite l'exemple de la catastrophe du 9/10/1943, dont le traitement par les médias italiens a été très large (documentaires, livres, explication de la genèse politico-financière).*

*A l'opposé, en France, le traitement par les médias de catastrophes, telle que celle de Malpasset, est beaucoup plus limité. Enfin, L. Coste insiste sur le fait qu'il faut éviter des attitudes de béatitude ou de catastrophisme face aux risques, quel qu'en soit la nature.*

*X. Martin (MEDD-IGE) fait remarquer qu'on accepte souvent le risque lorsqu'on le vit au quotidien, comme dans le cas des risques technologiques, qui touchent généralement les employés vivant à proximité des zones à risques. Ce fait explique peut-être les comportements différents des populations face aux risques technologiques et ceux d'origine naturelle.*

*F. Barthélemy rappelle que dans le cadre de risques naturels, tels les inondations, une bonne partie des populations exposées vivent directement de « l'exploitation » du cours d'eau (mariniers, commerçants, ...) et acceptent donc implicitement ces risques d'inondation.*

*M. Poupart (EDF-DPIH) souligne que dans l'affichage des risques il y a une difficulté pour le grand public à comprendre la différence entre un risque extrême et un risque plus fréquent, entre un risque d'occurrence centennale et un risque d'occurrence décennale.*

*F. Barthélemy est d'accord avec M. Poupart et rappelle la difficulté à expliquer la différence entre une crue décennale et une crue très peu probable. Il souligne par ailleurs les difficultés rencontrées lorsqu'il faut expliquer au grand public et aux élus qu'il convient d'adapter les mesures de prévention en fonction des probabilités d'occurrence de différents risques (typiquement : de centennale à décennennale).*

*A. Douguedroit (Université de Provence) pose le problème de l'impact de la non-stationnarité climatique dans les études de risques d'inondations. Elle fait remarquer que nous sommes dans une période de changement climatique, avec une augmentation des pluies extrêmes, qui induit une modification du forçage climatique à l'origine des crues. Enfin, A. Douguedroit pose la question de la prise en compte du changement climatique dans les études de risques d'inondations.*

*F. Barthélemy suggère qu'il faudrait peut être dédier un groupe de recherche sur cette thématique. Néanmoins, d'après lui, il est difficile d'utiliser les modèles de circulation climatique (GCM) dans les études de risques d'inondations. D'une part ces modèles utilisent des mailles de grandes tailles (quelques milliers de km<sup>2</sup>) par rapport à la taille des bassins versants et les stratégies de désagrégation spatiale et temporelle sont loin d'être au point. D'autre part, les GCM ont déjà du mal à simuler le climat présent, ce qui rend difficile leur extrapolation dans le futur (ndlr). Enfin, F. Barthélemy souligne que l'hypothèse d'un changement climatique accompagné d'une augmentation des pluies extrêmes reste à confirmer.*

*F. Lempérière (HYDROCOOP) revient sur le problème de la communication concernant les risques et notamment sur l'utilisation de l'année comme repère temporel de base. Il suggère que l'utilisation de la vie (100 années) comme repère temporel serait beaucoup plus efficace pour communiquer sur les risques auprès du grand public. Il prend l'exemple d'une crue induisant une probabilité d'une chance sur dix d'être inondé et une chance sur cent d'être noyé au cours de sa vie, exemple autrement plus parlant que le vocable fréquentiel habituel des ingénieurs.*

*F. Josse (CG Gard) fait remarquer la difficulté qu'il rencontre pour faire passer auprès du grand public le discours des experts. En effet, le grand public a parfois du mal à comprendre les arguments scientifiques et techniques, le concept de retour d'expérience, les notions de périodes de retour. F. Josse prend l'exemple de l'affichage des repères de crues qui lui semble vain, si leur signification n'est pas expliquée au public.*

*F. Gache (Entente Interdépartementale Marne) demande si on peut encore parler de risques naturels, notamment à cause des impacts anthropiques sur les bassins versants (artificialisation du lit mineur).*

*F. Barthélemy répond qu'effectivement les risques naturels sont fortement modifiés et/ou amplifiés par l'anthropisation des bassins versants. On peut alors dire que les risques ne sont plus que partiellement naturels.*

*A.M. Levraut (DIREN Rhône-Alpes) souhaite souligner l'importance des travaux historiques et de mémoire. Elle insiste sur le fait qu'il faut prendre en compte les crues historiques exceptionnelles dans les études de risques d'inondations. Elle regrette également que les pouvoirs publics n'élaborent plus de monographies sur les grandes crues, comme c'était fait dans le passé. Elle se demande si ce travail de monographie pourrait faire partie des missions du SCHAPI ? Ensuite, A.M. Levraut pose la question de la définition d'un risque acceptable, en terme de probabilité. Le terme de risque acceptable semble assez mal défini puisqu'il peut être associé soit à une crue d'occurrence centennale, soit à la crue maximale enregistrée. D'ailleurs, A.M. Levraut témoigne que la mauvaise définition de ce terme conduit à la contestation par certains élus des aléas d'inondation, du fait de la variabilité de la valeur des seuils pour définir ce risque. Enfin, A.M. Levraut laisse entendre que le système CatNat conduit peut-être à indemniser trop facilement les inondations et que les élus ont parfois du mal à comprendre (et à accepter) les études d'évaluation des risques, du fait de leur complexité (conjonction de risques naturels, technologiques et d'enjeux économiques).*

*D. Duband (SHF) revient sur l'intervention de A. Douguedroit. Il rappelle les limites actuelles des GCM qui sont incapables d'anticiper correctement par la simulation les précipitations observées. Or, pour utiliser les GCM en extrapolation spatiale et temporelle, il est absolument fondamental que les algorithmes de désagrégation de l'échelle régionale à l'échelle locale soient plus efficaces. Ensuite, D. Duband souligne que, dans le rapport du GEC, on ne distingue pas de tendances sur les précipitations extrêmes au cours des 150 dernières années. Enfin, D. Duband rappelle que le discours actuel sur le changement climatique ne doit pas réduire à néant la validité des études en cours, au prétexte de cette hypothèse de changement du régime des précipitations.*

### **Observation d'événements historiques extrêmes..., P. Bois**

Depuis des siècles, des phénomènes hydro-météorologiques exceptionnels ont été observés de par le monde. Néanmoins, ces phénomènes exceptionnels n'ont été enregistrés de manière quantitative que depuis deux siècles. A partir d'observations de précipitations et de débits exceptionnels, leur ampleur inattendue et leur variabilité spatio-temporelle est montrée. Le désordre de tels extrêmes n'est qu'apparent et des analyses simples pour des stations pluviométriques et hydrométriques montre bien que chaque série chronologique a des caractéristiques bien définies et assez stables dans le temps, qui permettent ainsi de connaître un peu mieux les aléas.

*D. Schertzer (ENPC-CEREVE) revient sur l'intervention de P. Bois qui suggérait qu'il fallait distinguer les divers types de crues, en fonction des processus climatiques et hydrologiques générateurs. D. Schertzer se demande ainsi s'il est judicieux de distinguer les chercheurs qui « mélangent tout » pour faire des lois universelles et ceux qui « discriminent tout » pour ne pas trouver de lois universelles. Ensuite, D. Schertzer fait observer que la mise en forme de structures météorologiques à différentes échelles de temps et d'espace reste un exercice complexe.*

*A. Douguedroit souligne que la représentation climatique et hydrologique de la France est généralement assez homogène alors que, d'après elle, la zone méditerranéenne se distingue des autres régions de France. En effet, les cumuls pluviométriques annuels ne sont pas influencés seulement par le relief, mais aussi par la distance à la Méditerranée. A l'échelle européenne, on peut distinguer les zones sous influence méditerranéenne et les autres zones et elle recommande de mieux réfléchir à la définition de différentes régions hydro climatiques.*

*P. Bois (LTHE) confirme qu'il y a un effet prépondérant du relief, mais aussi l'effet de la Méditerranée sur la variation des intensités des précipitations. Dans une étude hydrologique, on se place à une échelle locale ou régionale (exemple, la région Cévennes-Vivarais) où il est légitime de mélanger les données de pluviomètres soumis à un régime climatique homogène, ce qui permet ainsi de cartographier les variations spatiales de variables hydro-climatiques.*

*D. Loudière revient sur l'examen d'études de crues extrêmes et d'inondation (PPRI). Il trouve que bien souvent ces études reposent sur l'utilisation d'une grande quantité de données, dont le traitement et l'examen restent finalement souvent limités. Par ailleurs, par rapport aux propriétés physiques et dynamiques des bassins versants, D. Loudière trouve que l'analyse de l'extension spatiale et temporelle des phénomènes étudiés devrait être faite. Par exemple, on oublie souvent d'étudier l'effet de la durée critique des averses, par rapport aux capacités de stockage des barrages. De la même manière, D. Loudière pose le problème de la qualité des études hydrologiques, pour lesquelles les cahiers des charges sont bien souvent mal définis par les commanditaires.*

*P. Bois revient sur le problème de la formation des hydrologues et de la diffusion des données. La qualité des travaux des bureaux d'études est souvent critiquée, mais le problème est essentiellement d'ordre économique : l'acquisition des données est tellement coûteuse qu'elles ne permet pas aux bureaux d'études de consacrer un budget suffisant pour leur traitement, à cause de la compétition pour une baisse du prix des prestations.*

*S. Luzet (bureau d'étude HGG Environnement) confirme la situation économique actuelle et la pression sur les prix. Il parle également du problème du processus de choix du futur titulaire (marchés publics ou autres) et de ce qu'il faut bien répondre à un cahier des charges, ce qui ne permet pas d'améliorer la situation actuelle.*

*C. Obled (ENSHMG-LTHE) parle quant à lui de sa connaissance des études hydrologiques réalisées par les bureaux d'études. En accord avec P. Bois, il trouve également qu'il est difficile de réaliser de bonnes études hydrologiques, à cause du coût d'acquisition des données.*

## **Les valeurs rares et extrêmes dans la gestion des risques d'inondation aux Pays-Bas, E. Mosselman.**

Après les inondations dévastatrices de 1953, les hollandais ont décidé de fonder leur protection contre les crues sur une analyse des probabilités d'occurrence des fortes crues. Actuellement, la loi prescrit que le pays soit protégé contre les marées et tempêtes d'occurrence 10000 ans et contre les crues du Rhin d'occurrence 1250 ans. La très faible probabilité de ces événements nécessite de fortes extrapolations, qui dépendent fortement du modèle statistique choisi, des données historiques utilisées et de la pertinence des processus hydrologiques modélisés.

*G. Degoutte (Cemagref) demande quel a été le bénéfice hydraulique sur la hauteur de la lame d'eau du recul des digues.*

*E. Moselmann répond que l'ordre de grandeur du bénéfice hydraulique est une baisse d'environ 30 cm de la hauteur de la lame d'eau, qui a été compensée par un rehaussement général du niveau du lit du fleuve.*

*C. Obled pose la question de la combinaison des risques de tempête, de forte marée et de crue aux Pays-bas ? Est ce que ces évènements sont statistiquement indépendant entre eux ? Par ailleurs, dans un cadre de changement climatique, comment est envisagé la remontée du niveau moyen de la mer, et quel effet cela pourra-t-il avoir sur les périodes de retour des crues ?*

*E. Moselmann répond que les études de corrélation des phénomènes à risques, crue fluviale et tempête en même temps, ont montré que ces évènements ne sont quasiment pas corrélés. On peut donc considérer que ces évènements sont indépendants. Par rapport aux scénarii de changement climatique, les hypothèses d'augmentation du niveau de la mer vont de +20 cm à +80 cm. Enfin, dans les études de prédétermination des risques de crue, une surélévation de +15 cm a déjà été prise en compte dans le dimensionnement des barrages et digues, protégés contre des crues d'une période de retour de 200 ans.*

*L. Payen (EDF-CNEPE) demande s' il existe une loi qui fixe une valeur de crue de période de retour minimale contre laquelle l'état néerlandais s'engage à protéger les citoyens ? Il demande également qui serait responsable en cas d'accident ?*

*E. Moselmann répond qu'il n'y a rien de prévu par la loi et que l'entretien des digues est assuré par les syndicats de polders, qui représentent la première institution démocratique du pays.*

*F. Josse fait remarquer que la définition d'évènements rares et extrêmes dépend d'un choix politique et sociétal, du niveau de risque que la société est prête à accepter et à subir.*

*J. Comby (Université Lyon 3) précise qu'il faut distinguer l'évaluation de l'aléa, la gestion de l'aléa, les risques, la vulnérabilité. Il rappelle également que les décisions finales faces aux risques sont principalement prises par les décideurs, les élus, les politiques. Pour finir, J. Comby suggère d'introduire plus de probabilités dans la cartographie spatiale des risques de crue.*

*P. Fourmigué (Cemagref-CETE) rappelle qu'en France on se protège généralement contre des crues dont les périodes de retour sont de l'ordre de 100 ans, alors qu'au Pays-Bas les périodes de retour des crues sont de l'ordre de 1000 ans. Il demande ce qui justifie cette différence ?*

*E. Moselmann répond que le choix d'une période plus élevée est lié à la particularité des Pays-Bas : le pays est tout plat et en partie en dessous du niveau de la mer. Ainsi, en France, même si une crue centennale peut avoir de grosses conséquences, aux Pays-Bas les conséquences sont beaucoup plus fortes, coûteuses et durables du fait de l'absence de reliefs.*

*A.M. Levraux précise également qu'en France on a le choix de s'installer ailleurs qu'en zone inondable, contrairement aux Pays-Bas. A cause de la configuration géographique du pays et de la densité des populations, les citoyens sont contraints de vivre en zone inondable.*

## ***1.2.2 Méthodes d'estimation***

### **Modélisations stochastiques et valeurs extrêmes, JN. Bacro**

La théorie des extrêmes est une branche des probabilités et statistiques dont l'objectif est de caractériser le comportement stochastique des queues de distributions des processus aléatoires. Les résultats obtenus dans un cadre asymptotique permettent d'établir des modèles mathématiques qui peuvent être utilisés comme outils pour réaliser des extrapolations. Des résultats sont présentés dans un cadre de « loi du maximum » et de « loi des dépassements de seuils ».

*R. Garçon rappelle qu'il est important de préciser les hypothèses dans lesquelles on se place lorsqu'on développe des modèles stochastiques d'estimation des valeurs extrêmes. Il demande quel est l'adaptabilité de ces lois de valeurs extrêmes et quel est l'influence du choix d'un seuil. Ensuite, il demande si on peut trouver des lois dont le seuil est à l'infini. Enfin, il demande quels types de seuils il faut prendre dans le cadre de variables hydrologiques.*

*JN. Bacro répond qu'il est possible de trouver des valeurs optimales des paramètres des lois, qui ont une influence sur les vitesses de convergence vers des valeurs seuils. Par ailleurs, il précise qu'il faut rechercher la valeur de ces seuils d'une manière empirique.*

*R. Garçon demande ensuite comment concilier différentes lois, lorsqu'il y a de bonnes présomptions d'un comportement exponentiel ou asymptote d'une distribution de variables?*

*JN Bacro répond qu'il n'y a souvent qu'une seule loi possible et que le facteur décisif est le choix des hypothèses.*

*Mr. Fang (BRL Ingénierie) précise que dans le cas d'une loi GEV pour une même station, lorsqu'on utilise des séries chronologiques de durées variables pour estimer les paramètres de cette loi, leurs valeurs peuvent varier.*

*JN. Bacro répond que c'est normal et que les valeurs des paramètres d'une loi ont elles-mêmes une moyenne et un écart-type.*

*P. Bois revient sur les problèmes de dépendance/indépendance des maxima d'une série temporelle de variables. Il cite le cas de l'Isère où chaque année il y a deux types de crues, dont les formes et les dynamiques sont sensiblement différentes en raison de processus hydro-climatiques initiateurs différents et indépendants. Or, dans les analyses de séries de crues maximales annuelles, ces crues sont mélangées, alors qu'elles ne devraient pas l'être.*

*JN. Bacro répond que dans les approches classiques, il n'y a pas prise en compte de différentes saisons et qu'il y a donc un mélange de différents processus, de différentes queues de distributions. Il rappelle que l'hypothèse dite « i.i.d » (idem-distribuée) est une hypothèse forte.*

### **Méthode de maximisation : estimation de la crue maximale probable (CMP), Annie Dumas.**

La méthode de maximisation des risques de crue par estimation de la crue maximale probable (CMP) est une méthode très sécuritaire, puisqu'il s'agit d'estimer la valeur d'une crue dont la probabilité d'occurrence est presque nulle. La CMP représente généralement la combinaison sévère de différents risques hydro météorologiques physiquement possibles (pluies intenses, effet de l'enneigement et de la température, état saturé du bassin versant, etc.). La CMP s'évalue à partir de données météorologiques

maximisées de manière déterministe et raisonnée. La CMP est généralement évaluée pour de grands barrages dont la rupture causerait des pertes humaines et économiques inacceptables.

*D. Duband demande quel est le modèle de génération de la pluie.*

*A. Dumas répond qu'il n'y a pas en fait de générateur de pluie, mais une reconstruction de pluie maximale probable et ensuite une modélisation hydrologique. Cette pluie est d'ailleurs difficile à transposer et dépend du bassin versant étudié.*

*M. Lang demande quelle est la sensibilité de la CMP à la saturation initiale du sol (du modèle ?) et au coefficient de ruissellement ?*

*A. Dumas répond que le choix de ce coefficient de ruissellement est d'environ 90%, mais qu'il faut toujours faire attention à ce que sa valeur reste « raisonnablement possible ».*

*M. Lang demande ensuite ce que représente la valeur d'une CMP, par rapport à une  $Q_{1000}$  ou  $Q_{10000}$  estimée par une approche plus classique ?*

*D. Duband répond qu'une comparaison effectuée sur environ 40 bassins versants montre que la  $Q_{10000}$  estimée à partir d'un Gradex représente environ  $\frac{1}{2}$  CMP (Congrès de Durban, 1994).*

*A. Dumas répond également que dans le cadre canadien, l'utilisation de la méthode du Gradex est difficile, à cause de l'étendue des bassins versants dont on cherche à estimer les CMP.*

*JA. Hertig (EPFL-Suisse) souligne qu'il y a une différence entre les mécanismes météorologiques d'Amérique du Nord et d'Europe, avec un effet de précipitations convergentes en Amérique du Nord. Sur la façade Est du Canada et des Etats-Unis, les cas de précipitations orographiques sont assez limités. Dans les zones alpines, l'effet orographique peut augmenter le précipitable d'un facteur 10. Avec des modèles de précipitations à meso-échelle, on peut reproduire des champs de précipitations et reproduire des épisodes de pluies. A l'aide de ces modèles, il y a un facteur 2 entre une pluie maximale probable (PMP) et une  $P_{50}$*

*A. Dumas répond qu'au Québec la pluie centennale a été estimée pour toutes les stations pluviométriques. De plus, au Québec, les effets orographiques restent très limités du fait du faible relief érodé. Il semble que l'effet orographique augmente les précipitations de seulement 10%.*

*F. Lempérière précise que pour des bassins versants dont la superficie est limitée, l'utilisation de la méthode CMP peut donner des écarts substantiels entre différents experts, à cause du grand nombre d'hypothèses qu'il faut faire pour estimer la PMP et le modèle hydrologique utilisé. Ensuite, il demande si on ne pourrait pas valoriser les enregistrements de pluies maximales en 24H, mesurés dans le monde entier, étant donné que ces cumuls sont du même ordre que ceux déjà enregistrés dans la zone méditerranéenne de la France. Enfin, F. Lempérière demande si les CMP dépassent les maxima mondiaux déjà enregistrés ?*

*A. Dumas répond que dans la méthode CMP il s'agit d'essayer d'estimer une PMP et une CMP, en faisant des hypothèses maximalistes mais raisonnables. Elle répond donc que l'utilisation de ces valeurs serait une transposition absolument non-réaliste de PMP dans certains contextes hydro-climatiques. Il serait intéressant pour la PMP d'évaluer les précipitations maximales physiquement possibles.*



*Un participant rappelle que la fameuse crue du Saguenay (en 1996) représente une précipitation d'environ 300 mm sur un bassin versant de 10000 km<sup>2</sup>. On se demande alors quelle pouvait être la valeur de la CMP pour ce bassin versant.*

*A. Dumas répond que dans le cadre de cette crue en particulier, l'occurrence de l'événement a été estimée à environ 500 ans. Néanmoins, la crue a été particulièrement mal gérée, des maisons ayant été construites sous l'évacuateur de crue...*

*D. Duband demande à l'assemblée si les modèles de précipitations à meso-échelle ne permettraient pas de probabiliser la pluie maximale.*

### **Méthode SCHADEX, E. Paquet, J. Gailhard, R. Garçon**

La méthode du GRADEX, introduite il y a près de 30 ans, est une méthode très efficace d'estimation des crues extrêmes pour des bassins versants de quelques dizaines à quelques dizaines de milliers de kilomètres carrés. Elle est très utilisée dans le domaine de l'hydrologie appliquée, notamment par EDF. Néanmoins cette méthode est fondée sur des hypothèses que la meilleure connaissance des circulations atmosphériques génératrices des pluies extrêmes et la modélisation hydrologique permettent désormais de préciser. La méthode SCHADEX s'appuie donc sur l'analyse du risque de pluie extrême par type de circulation atmosphérique et sur l'utilisation conjointe d'un modèle hydrologique conduisant ensemble à l'estimation des débits extrêmes.

*D. Duband demande quel est l'effet de l'utilisation d'une ou plusieurs stations pluviométriques sur l'estimation du Gradex d'un bassin versant, quelle est la représentativité d'une pluie spatiale constituée à partir de plusieurs stations pluviométriques ? Il demande également si l'utilisation d'une pluie moyenne spatiale journalière n'atténue pas la valeur du Gradex, en diminuant la valeur des maxima enregistrés ? Enfin, D. Duband demande si l'utilisation de nombreuses stations pluviométriques pour constituer une pluie spatiale ne pose pas un problème économique à cause du coût des données de base qui est de l'ordre du coût de l'étude ?*

*E. Paquet répond que pour optimiser la pluie spatiale de bassin, il utilise pour une première estimation une moyenne du maximum de postes pluviomètres disponibles dans la zone d'étude. Ensuite, ne sont retenus que les postes pluviométriques les plus explicatifs, via la modélisation pluie-débit, des écoulements observés. Dans le cas présenté, pour l'Ariège à Foix, seuls quatre postes pluviométriques parmi les six initialement considérés ont été retenus. Notons que le poste de l'Hospitalet n'a pas été identifié comme concourant significativement à l'explication des débits observés à Foix.*

*Ch. Bouvier (Hydro-science Montpellier) revient sur le traitement statistique des pluies et sur la manière dont se fait le choix des situations météorologiques et le découpage par type de temps ? Il demande également si le nombre et le type de classes ne représentent pas une manière d'apporter des degrés de liberté supplémentaires qui permettent de diminuer le biais statistique des ajustements aux différents types de pluies ? Enfin, C. Bouvier demande quel est l'effet du nombre de classes sur les ajustements statistiques ?*

*R. Garçon répond que le nombre de classes n'est pas un degré de liberté supplémentaire pour améliorer l'ajustement des distributions statistiques. Cette approche est validée par le fait qu'il y a une réduction du biais statistique et par des tests en double aveugle (split-sample-test) sur des périodes indépendantes des périodes de calage. Le nombre et le type de classes apportent donc une meilleure robustesse à ces distributions statistiques.*

*J. Gailhard rajoute que la classification météo a été faite de manière indépendante de la mesure de correction du biais, à partir de critères objectifs de discriminations des différents types de temps. De plus, le fait qu'il y ait 8 classes n'est pas forcément justifié de manière théorique, mais plutôt de manière empirique par les bons découpages que cela apporte.*

*M. Lang demande quel est l'effet du pas de temps de l'étude et comment se fait le transfert vers le pas de temps horaire ?*

*E. Paquet répond que les études ne se font pas seulement au pas de temps journalier, mais à un pas de temps qui permet de représenter correctement le comportement du bassin versant (compatible avec le temps de montée des crues). En fonction des propriétés dynamiques des bassins versants, les études se font à des pas de temps variant de 6 H à 48 H.*

*Mr. Fang demande quel est l'ajustement de la pente pour retrouver le Gradex ? Il précise que pour les événements rares ( $T = 100$  ans), la loi des extrêmes converge vers une loi exponentielle. Mais pour des événements supérieurs à  $T=100$  ans, quelle est la loi de distribution de la pluie ? Quelle est la légitimité de l'extrapolation de cette loi d'ajustement de la pluie ?*

*R. Garçon répond que ce problème de l'extrapolation pour de grandes périodes de retour est celui de tous les ajustements statistiques de distributions. Dans le cadre de la méthode SCHADDEX, on valide cet ajustement sur un panier 400 stations pluviométriques représentant au total près de 20000 années-stations. Cette approche n'a pas forcément une base théorique, mais elle est confirmée par une approche empirique et naturaliste.*

### **Paleo-Flood hydrology..., Gerardo Benito**

Les études paleo-hydrologiques permettent d'estimer les niveaux des plus hauts atteints lors des événements de crues majeurs. Ces études permettent ainsi d'augmenter la connaissance des risques hydrologiques sur plusieurs centaines d'années en remontant dans le passé. Les données de crues historiques peuvent ainsi être utilisées d'un point de vue probabiliste, dans le cadre d'analyse fréquentielle des crues, de détermination de crue maximale probable.

*C. Obled demande quels étaient les types de climats aux occurrences des crues historiques les plus fortes. Il précise que les crues historiques maximales semblent dater du « petit âge glaciaire » (17<sup>ème</sup>) et se demande si, à cette époque, il n'y aurait pas eu un fonctionnement hydrologique particulier ?*

*G. Benito répond que dans le cas des Gardons, il est vrai que les crues historiques les plus fortes ont eu lieu à une époque, où le climat était sensiblement différent de celui d'aujourd'hui. Néanmoins, la section hydraulique de la rivière (bedrock, canyons) était la même et a peu évolué depuis. G. Benito précise que les crues de 2002 ont atteint des hauteurs d'eau comparables à celles des crues historiques du « petit âge glaciaire ».*

*P. Javelle (Diren) demande quelle est la sensibilité de la modélisation hydraulique à la non-stationnarité de la section hydraulique ?*

*G. Benito répond que la sensibilité du modèle à la non-stationnarité de la section hydraulique est traduite sous forme d'incertitudes des simulations du modèle. Néanmoins, dans le cadre des canyons, la modification de leur section reste limitée au cours des derniers siècles (< 1m). Il semble que les incertitudes liées à la non-stationnarité de la section soit du même ordre que celles liées aux erreurs sur la valeur du coefficient de Manning-Strickler.*

## II - SYNTHÈSE DE LA JOURNÉE DU 16 MARS

La séance du matin était présidée par Charles OBLED et concernait l'estimation de l'aléa. La caractérisation de l'aléa a fait l'objet de huit présentations : trois présentations concernaient les méthodes d'estimation des variables caractérisant le risque inondation et cinq présentations concernaient les incertitudes rattachées aux valeurs extrêmes.

La séance de l'après midi concernait la connaissance et la détermination de la vulnérabilité, elle était présidée par Patrick LE DELLIOU. La modélisation de l'aléa associé à la vulnérabilité représentée par l'occupation des sols permet d'envisager les conséquences d'une crue. La séance intitulée « Une meilleure maîtrise des risques » comportait quatre présentations concernant les différents acteurs publics et privés responsables des politiques visant à l'atténuation des dommages consécutifs aux crues puis à l'indemnisation de ceux-ci une fois l'événement réalisé.

### I.3 DISCUSSIONS

#### *I.3.1 Les méthodes d'estimation*

#### **Estimation des crues de référence par approche géomorphologique, José- Luis Delgado (CETE Méditerranée)**

Cette méthode d'estimation des crues de référence est fondée sur une analyse géomorphologique des plaines alluviales. A partir de la connaissance de l'occupation des sols et de l'anthropisation des cours d'eau ainsi que de l'information sur les crues historiques, un modèle théorique à évolution spatio-temporelle est élaboré. Le modèle représentatif du milieu alluvial est composé d'unités spatiales homogènes délimitées représentatives du fonctionnement hydraulique des cours d'eau et des structures morphologiques du lit. La zone inondable correspond à la superficie de la plaine alluviale fonctionnelle susceptible d'être affectée par des crues fréquentes à exceptionnelles.

*M. LOUDIERE (CG GREF) : Est il prévu une généralisation de la méthode au niveau national au sein du Ministère de l'Équipement ?*

*Réponse : Cette méthode est portée par le Ministère de l'Équipement et par le MEDD (Direction de l'eau et des PPR). Des circulaires nationales recommandant l'utilisation de cette méthode pour la définition des atlas zones inondables. Des telles applications ont déjà été mises en place pour la Meuse, la Somme et la Bretagne sans difficultés particulières recensées.*

*M. OBLED (ENSHMG – LTHE) : La vidange des lacs est visible dans la géomorphologie de la vallée (exemple : la haute vallée de l'Arc). Comment la dissocier des laisses de crues , des embâcles fortes pouvant générer des sur-débits sur une certaine distance ?*

*Réponse : La région PACA est essentiellement constituée de cours d'eau et torrents de montagne (exemple : haute vallée de la Durance) sur lesquels dépôts et érosions sont des marqueurs particuliers des phénomènes rares. Les gorges qui sont de des cours d'eau sans lit majeur contiennent fréquemment des dépôts. Le rattachement temporel à des événements rares ou extrêmes doit être étudié au cas par cas.*

## **Cartographie de l'aléa pluviographique en France, Patrick Arnaud (Cemagref)**

La cartographie de l'aléa pluviographique permet la connaissance en tous points du territoire des quantiles de pluie de période de retour de deux à cent ans au pas de temps horaire. Un modèle stochastique de génération de pluies horaires couplé à une modélisation de la transformation de la pluie en débit permet de faire face à la sensibilité de l'échantillonnage des valeurs extrêmes. Le modèle est caractérisé par des variables décrivant la pluie déduites des observations. La modélisation des épisodes pluvieux tient compte d'un phénomène de persistance dans la structure des événements. La paramétrisation de l'information journalière a permis la régionalisation en 11 territoires homogènes du générateur de pluies horaires. Les paramètres journaliers pendant 20 ans et plus de 217 pluviomètres répartis sur l'ensemble du territoire français ont permis la cartographie des courbes Intensité - Durée - Fréquence de pluie pour des durées variant de 1 à 72 heures.

*M. BOUVIER (UMR Hydrosociences) : La performance du générateur est peu sensible à l'échantillonnage, mais très influencé par les liaisons conditionnelles de la pluie. Toutefois beaucoup de liaisons conditionnelles sont possibles. Sont elles toutes prises en compte dans le modèle ?*

*Réponse : L'approche est robuste par rapport à l'échantillonnage, c'est-à-dire que les résultats ne sont pas influencés par la présence ou non de valeurs extrêmes mais montrent une très forte sensibilité au phénomène de persistance dans la structure même des averses. Le phénomène de persistance a été étudié sur l'ensemble des postes disponibles et correspond plus ou moins à une paramétrisation régionale. La dépendance entre les variables principales qui a une influence sur la fiabilité du modèle pris en compte au niveau régional et non local, assurant ainsi la robustesse du modèle. La seule chose permettant de nuancer le phénomène de persistance est un paramètre journalier ou moyen permettant de faire varier le degré de persistance à travers un nombre d'averses soumises à cette persistance.*

*M. DUBAND (SHF) : D'où viennent les données puisqu'il n'existe pas en France de banque de données pluies orographiques ?*

*Réponse : Ce sont des données METEO France issues de 200 stations horaires couvrant l'ensemble du territoire, soit un à deux postes pluviométriques par département. Cela permet de faire une vérification du fonctionnement du modèle en tout point et d'établir des relations entre les paramètres horaires et journaliers. La forte densité des postes au pas de temps journalier permet de faire une cartographie des paramètres beaucoup plus fiables.*

*Y a-t-il eu prise en compte des différentes durées et extensions spatiales dans le travail sur la paramétrisation horaire pour la saisonnalisation des événements ? Les événements orageux de courte durée et de faible étendue spatiale ont-ils été considérés à part ou non ?*

*Réponse : La distinction des saisons d'événements pluvieux retient notamment les saisons humides ou sèches. Ce choix est motivé par l'application hydrologique qui est en arrière-plan. Le générateur de pluies horaires fonctionne sur l'ensemble du territoire français, y compris la Réunion. Il n'y a pas de distinction faite sur le type de temps, le générateur reproduit bien l'analyse descriptive des événements au pas de temps fin, les distributions de pluie sont retrouvées sans distinction par rapport à une typologie des pluies. Il y a une bonne cohérence temporelle par rapport aux observations.*

*Sur une longue série de 40 ans d'observations pluviométriques horaires, on constate une auto corrélation par saison de l'ordre de 0,6 à 0,7 entre les pluies horaires successives ?*

*Réponse : Cette auto corrélation est prise en compte implicitement dans le modèle puisqu'une averse est considérée comme une succession de pluies horaires.*

*M. PAQUET (EDF-DTG) : Pourquoi ce choix d'un pixel de taille 1 km<sup>2</sup> pour la modélisation alors qu'il va falloir agglomérer ensuite à l'échelle des bassins versants? Problèmes de représentation du phénomène avec le relief ?*

*Réponse : Le choix d'un pas d'espace de 1 pixel au km<sup>2</sup> a été dicté par l'intérêt de quantifier l'aléa pluviométrique en tout point du territoire. Cela ne correspond pas à une connaissance surfacique du*

*sol. Pour la connaissance des débits, il y aura effectivement une agglomération à l'échelle du bassin versant.*

*En zone de relief, les performances du modèle vont dépendre de la pertinence de la régionalisation qui donnera la pertinence des quantiles en relief.*

*M. OBLED (ENSHMG – LTHE) : Il ne faut pas faire de statistique sans s'intéresser à la genèse des événements. D'après une même chronique de pluviographe, les averses peuvent être agrégées selon plusieurs combinaisons. SHYPRE fait un découpage d'averses subjectif qu'il serait intéressant de croiser avec des images radar. Y a-t-il eu croisement des informations de sources différentes ?*

*Réponse : Le principe de la méthode repose sur l'utilisation de chroniques individualisées avec une analyse d'événements courants et parfois d'événements rares. L'absence d'événements rares n'empêche pas l'analyse de la structure interne des événements pluvieux. Le calage du modèle a été effectué sur les données observées du Real Collobrier répondant à une climatologie particulière, en comparant des événements décrits grossièrement à des événements décrits plus finement. Même si les deux méthodes conduisent à des paramétrages différents, les pluies sont bien restituées dans les deux cas.*

*Le fait d'introduire un taux de persistance dans la structure des événements pluvieux va entraîner un effet de dopage sur le potentiel pluviométrique des événements. Ne serait ce pas un artefact, et l'utilisation de cet artefact ne pourrait-elle pas générer une surestimation quasi-systématique des quantiles de pluies ?*

*Réponse : Les quantiles modélisés par SHYPRE sont surestimés par rapport à un ajustement exponentiel des pluies observées. Cette surestimation traduit le fait que la modélisation - si on devait ajuster des chroniques - conduirait à un comportement plus qu'exponentiel du modèle. Le fait d'avoir un modèle régional conduit à accroître les incertitudes au niveau local.*

*M. LANG (CEMAGREF) : La validation des méthodes d'estimation pourrait se faire grâce à des événements historiques ainsi que de la répétition de ces événements du point de vue régional. Il est plus difficile de valider un résultat à partir d'une comparaison de résultats obtenus par différentes méthodes d'estimation, qu'avec des événements effectivement observés.*

## **Extrêmes et multifractales en hydrologie : Résultats, validation et perspectives, D. Schertzer (Cereve)**

La détermination de valeurs extrêmes à l'aide de lois de probabilités reste tributaire de l'incertitude d'échantillonnage et des erreurs liées au choix du modèle probabiliste. En hydrologie, l'incertitude des valeurs extrêmes est réduite par l'approche régionale et/ou par l'information pluviométrique. Le développement des multifractales permet de caractériser l'extrême variabilité, les corrélations à longue portée et les processus de renouvellement des phénomènes hydrométéorologiques. L'analyse multifractale prend en compte l'intégralité de l'information d'une chronique avec ses interdépendances à longue durée. Les estimateurs des extrêmes mettent en évidence une forte variabilité géographique de l'occurrence des débits.

*M. BOIS (ENSHMG - LTHE) : La description cartographique des débits caractéristiques peut s'avérer difficile de par la variabilité spatiale de ces caractéristiques. Par exemple, la confluence Rhône – Ardèche confronte des caractéristiques de bassin versant et de crues très différentes alors qu'ils sont très proches géographiquement. Le paramètre de forme de la pluie n'est pas affecté à un bassin versant*

*M. HINGRAYS (EPFL) : La méthode d'estimation des paramètres influence t'elle la reproduction des valeurs extrêmes ? Y a-t-il une influence du nombre d'estimateurs des paramètres ? Y a-t-il une*

*influence de l'échantillonnage des valeurs observées pour la performance du générateur, en particulier pour les valeurs fortes ?*

*Réponse : Les estimateurs sont très sensibles à l'échantillonnage. La loi de Pareto est valable à partir d'un certain ordre. Il est possible d'utiliser une procédure d'optimisation pour déterminer le débit critique à partir duquel la loi de Pareto est plus ou moins valable. Le plus gros problème est que les estimateurs sont fondés sur le fait que les séries sont dépendantes. Ce n'est pas le cas sur les débits. Il est temps d'aller vers des estimateurs qui prennent en compte les indépendances.*

*M. DUBAND (SHF) : L'approche multifractale permet de faire une analyse des événements tant au niveau spatial que temporel, ce qui est fondamental en hydrométéorologie. Existe-t-il des discontinuités de plages spatio-temporelles ? L'approche fractale pourrait-elle alors être valable dans des domaines bornés et non pas en continu ?*

*Réponse : Concernant les plages d'échelle d'invariance, il faut noter qu'il existe plusieurs régimes d'invariance ou de symétrie d'échelle. Les précipitations, par exemple, peuvent varier de quelques minutes à quelques semaines. On est alors en présence de plusieurs échelles : 2 à 3 semaines correspondent au temps caractéristique des grosses structures atmosphériques à une échelle météorologique. Il y a ensuite une transition vers un régime climatologique pour lequel il peut y avoir conservation de certains paramètres alors que d'autres changent ; cela peut correspondre à une modification de la persistance quand on passe du régime météorologique au régime climatologique. On constate une persistance du comportement des extrêmes en faveur d'une loi de type algébrique. Pour les maximums, cela correspond à une loi de Fréchet plutôt qu'une loi de Gumbel.*

*M. JOSSE (CG Gard) : Remarque en tant que représentant des acteurs et des maîtres d'ouvrage publics. En termes d'aménagement du territoire et de précision des zones à risque, les discussions avec différents acteurs publics s'avèrent difficiles. Il en est de même pour les questions sur les dimensionnements d'ouvrage. Que recommander dans les méthodes d'estimation ? Beaucoup de méthodes existent comportant toutes des incertitudes. Les acteurs du public sont peu rassurés face à la diversité des méthodes et des incertitudes affichées. Les incertitudes concernant l'aménagement du territoire entraînent des discussions difficiles.*

### ***I.3.2 Les incertitudes***

#### **La connaissance de l'aléa : Les incertitudes**

Le manque d'observations sur les valeurs extrêmes entache leur estimation d'incertitudes. Il y a donc un fort enjeu à les comprendre pour les réduire. Ces incertitudes résultent d'abord de la mesure des événements extrêmes et de leur rattachement à une probabilité d'occurrence :

- Les erreurs possibles dans l'analyse de l'aléa pluvieux,
- L'amélioration des mesures de pluies à l'aide de l'imagerie radar météorologique,
- Les incertitudes rencontrées dans la mesure des débits de pluie.

Les incertitudes résultent également de l'évolution spatio-temporelle des variables hydrométéorologiques dans l'hypothèse d'un changement climatique. L'analyse de l'évolution des extrêmes à partir de séries de données observées a concerné deux présentations : l'évolution des extrêmes climatiques et hydrométriques.

## **Quelques illustrations de sources d'incertitudes dans l'analyse de l'aléa pluvieux, L. Neppel (UMR Hydrosiences)**

La caractérisation de l'aléa pluvieux donne lieu à trois sources d'incertitudes. La première source d'incertitude concerne l'aptitude du réseau de pluviomètres à mesurer les phénomènes extrêmes par rapport à l'extension spatiale et à leur intensité. La deuxième source d'incertitude concerne la forme de la distribution des pluies maximales annuelles et la loi de distribution à laquelle elles appartiennent. Une approche régionale met en avant un comportement hyper-exponentiel des distributions de pluies journalières. Les quantiles sont plus stables dans l'échantillonnage que pour les ajustements locaux. La dernière source d'incertitudes concerne la distribution spatio-temporelle des lames d'eau due à la faiblesse du réseau de mesure pluviométrique : l'imagerie radar météorologique permet d'enrichir ces estimations.

*L'insuffisance du réseau d'observation de la pluie au sol entraîne une sous-estimation de l'occurrence des pluies. Ceci est un élément important pour ce qui est de la prédétermination. Peut-on dire que les réseaux d'observation au sol sont insuffisants pour faire de bonnes prévisions ?*

*Réponse : Les mesures radar ne donnent pas de notion de pas de temps, mais seulement d'espace. Le radar apporte des informations complémentaires par rapport au réseau de mesure au sol, même si l'on n'est pas certain des intensités précipitées. Le radar permet de voir l'arrivée des structures pluvieuses. Avec un bon calibrage des images radar à partir du réseau de pluviomètres au sol, on répond mieux aux problèmes de prévision. Le développement simultané des 2 techniques de mesure permet à partir des mesures au sol de valider les mesures radar, alors que les mesures radar permettent de mieux prévoir. Il y a donc moins de chances de manquer un événement.*

*M. SCHERTZER (CEREVE) : La connaissance de la dimension fractale du réseau permet de quantifier les événements manqués par une correction du biais du nombre d'épisodes pluvieux.*

*Réponse : La correction du biais peut aussi se faire à partir de la connaissance des isohyètes sur le réseau considéré.*

*M. OBLED (ENSHMG – LTHE) : Il existe une hétérogénéité dans les pratiques : certains s'intéressent à la pluie maximale annuelle alors que d'autres considèrent plus une typologie des événements par une saisonnalisation. La courbure qui génère le caractère hyper-exponentiel des pluies peut non seulement être influencé par la partie haute mais aussi par la partie basse des ajustements. La statistique des lames d'eau par unité de surface est elle vraiment utilisable car la méthode consiste à déplacer des lames d'eau par balayage mobile d'unité de surface afin de trouver le maximum alors que l'utilisateur va travailler à surface fixe ?*

*Réponse : La saisonnalisation des pluies n'a pas été faite, mais celle des lames d'eau a été testée. Les lames d'eau saisonnalisées ont une tendance hyper-exponentielle aux fréquences rares et extrêmes. Il se peut également qu'il y ait mélange d'événements dans une même saison. L'interprétation des lames d'eau sur un bassin correspond au rapport du volume maximum précipité ramené à une surface. On obtient une enveloppe des lames d'eau supérieure aux lames observées.*

## **Incertitudes sur les débits de crue, M. Lang (Cemagref) & C. Perret (EDF-DTG)**

La production de séries hydrométriques repose sur l'établissement de courbes de tarage reliant le débit à la hauteur d'écoulement. La construction et le contrôle de ces courbes sont fondées sur l'exploitation des jaugeages où le débit est mesuré directement en explorant le champ de vitesses ou indirectement par dilution d'un traceur chimique. Les données de jaugeage en période de crue sont peu abondantes et comportent de plus des erreurs méthodologiques dans l'extrapolation de la courbe de tarage du fait de la non prise en compte des propriétés hydrauliques des écoulements ou de leurs discontinuités. La mesure de la hauteur d'eau au droit des échelles limnimétriques peut s'avérer difficile ; les fortes vitesses d'écoulement peuvent induire des phases de transport solide avec une modification du fond du lit, la fiabilité du capteur peut être douteuse. L'erreur moyenne sur l'estimation de la hauteur dans le

domaine des crues jaugées est de l'ordre de 1% et monte jusqu'à 5% quand les vitesses d'écoulement ou les gradients de montée des eaux sont trop élevés. Dans le domaine des crues non jaugées, il est recommandé d'estimer les débits à partir des ouvrages hydrauliques ou des modèles hydrologiques. Le calcul des incertitudes sur les débits de crues nécessite d'appréhender toute la chaîne de traitement des données depuis la mesure des hauteurs et débits jusqu'à l'établissement de la courbe de tarage.

*M. THIRIOT (IMFT) : En Grèce, pour l'étude des écoulements provenant d'érosion de barrages, il avait été remarqué une diminution très sensible de la hauteur d'eau de surface libre pour les grands débits, due à un affouillement de deux mètres dans le fond du lit, constitué de cailloux de 10 cm. Au Maroc, la profondeur d'affouillement peut avoisiner une dizaine de mètres, celle-ci diminue avec les grands débits. M. Réminiéras conseillait de faire des mesures d'affouillements avec des briques ou des chaînes : il s'agissait de faire des puits dans le lit au droit de la profondeur la plus affouillable et enfouissait des briques à intervalles de 50 cm puis, après la crue, de retrouver la première brique qui avait résisté à l'érosion. Pour les chaînes, il s'agissait de retrouver le pliage de la chaîne au droit de la profondeur la plus érodée.*

*M. THIRIOT suggère des travaux de recherche en mécanique des fluides pour analyser la relation du Strickler en fonction du transport en saltation. Il pourrait être intéressant de revoir les exemples où l'évolution du Strickler avec l'approfondissement du fond du lit est peut être aussi importante que le débordement en lit majeur.*

*M. OBLED (ENSHMG – LTHE) : En Tunisie, des mesures d'affouillements à 7 mètres de profondeurs avaient été faites, ces affouillements étant ensuite réduits à 4 mètres après le passage des forts débits. Ce sont des choses qui doivent certainement se produire en France et que l'on ne mesure pas toujours.*

*M. CARLIER (BRL) : Indépendamment de la fiabilité des capteurs, la transformation du niveau d'eau en un signal est difficile à réaliser car il y a de grosses difficultés à déterminer ce que l'on souhaite mesurer comme niveau d'eau. Il est difficile de définir la hauteur ou encore le niveau d'eau selon qu'on se trouve à l'amont, à l'aval ou encore sous l'ouvrage et il est encore plus difficile de caler des enregistreurs sur des échelles souvent placées au droit de l'ouvrage sans prise en compte dans la mesure de l'erreur induite par l'énergie cinétique.*

*On recommande de relever les laisses de crues et de retenir une ligne d'eau s'affranchissant des points particuliers.*

## **Evolution des extrêmes climatiques en France à partir des séries observées, B. Dubuisson (Météo-France)**

La principale crainte liée à l'évolution du climat concerne l'augmentation possible de la fréquence des extrêmes. L'utilisation de Séries Quotidiennes de Référence devrait permettre d'évaluer l'impact d'un changement climatique d'origine anthropique sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vents, de températures et de précipitations en France. Les indices de températures sur les cinquante dernières années traduisent un réchauffement marqué, alors que ceux sur les précipitations ne sont pas significatifs.

*M. THIRIOT (IMFT) : Qu'en est-il du gaz carbonique et de la teneur en eau dans l'atmosphère ? Pourquoi voit-on une évolution des facteurs climatiques entre 1900 et 1950 alors qu'il n'y avait pas de variation du gaz carbonique ?*

*Réponse : Aucune hypothèse sur une éventuelle liaison ou tendance n'est fixée a priori sur les données climatiques observées, à savoir les précipitations et la température. Au contraire, l'objectif est d'analyser l'évolution de ces données. Les modèles de simulation de climats prennent en compte différents scénarios d'évolution du CO<sub>2</sub>.*



*M. OBLED (ENSHMG – LTHE) : Un article du Pic du Midi montrait que l'augmentation de la température moyenne est due à l'augmentation des températures minimales liée à une remontée de la nébulosité atmosphérique.*

*Réponse : L'amplitude des températures diurnes diminue également car les températures minimales augmentent plus que les maximales.*

### **Evolution des extrêmes hydrométriques en France à partir des séries observées, B. Renard (Cemagref)**

La connaissance de l'évolution des extrêmes hydrologiques en faisant l'hypothèse d'un changement climatique est importante pour la protection contre les inondations. Des travaux d'analyse sur la détection de tendances ou de ruptures dans le régime des crues et étiages à partir d'un ensemble de tests statistiques mené sur 192 séries hydrométriques françaises d'au moins 40 années. Le régime des crues ne semble pas affecté d'une tendance généralisée à la hausse ou à la baisse. Les changements détectés sur les étiages sont plus importants. Il reste à déterminer les causes de ces changements d'origine anthropique, météorologique ou climatique. Une analyse probabiliste Bayésienne permet de prendre en compte la non-stationnarité comme une incertitude dans la prédétermination des valeurs extrêmes.

*M. COSTE : Est-ce qu'il y a prise en compte dans les données de l'influence piscicole et sylvicole avec notamment les prélèvements agricoles ?*

*Réponse : Cela n'est pas pris en compte explicitement dans la méthode car, en effet, le climat n'est pas la seule cause de changement possible notamment pour les étiages. La démarche consiste à se fier aux commentaires de la banque HYDRO à savoir si les débits sont très, peu ou pas influencés. Cependant, des changements ne sont pas nécessairement détectés dans les régions où il y a un fort prélèvement agricole. Il y a donc des cours d'eau où cela n'est pas significatif. Par contre, lorsque des changements sont détectés, ils sont étudiés au cas par cas de manière à identifier au maximum les causes de changement, comme il a été fait pour la météorologie. Pour les prélèvements, le problème est qu'il est difficilement quantifiable et qu'il évolue dans le temps. Dans ce cas, les ruptures sont peu détectables.*

*M. DUBAND (SHF) : La Seine, la Loire, le Rhône et la Garonne représentent 4 grands intégrateurs de l'hydrologie en France. Les chroniques disponibles sur ces cours d'eau sont de presque 100 ans de données. Sur la Seine, on avait détecté des changements par l'influence des grands barrages réservoir.*

*Réponse : L'anthropisation des cours d'eau rend les séries de débit moins utilisables pour la détection d'une rupture de stationnarité dû à un éventuel changement de climat. Les séries utilisées comportaient pour les deux tiers 40 à 70 ans de données, le tiers restant elles sont de l'ordre de 80 à 90 années. Il serait intéressant d'étudier ces bassins versants sur le linéaire des cours d'eau pour voir s'il y a propagation ou non des ruptures de l'amont vers l'aval.*

### **I.3.3 L'estimation de la vulnérabilité**

#### **La connaissance de la vulnérabilité**

Les dommages causés par les inondations sont caractérisés par une connaissance de l'aléa et la vulnérabilité. Dans cette dernière session du colloque, on se place du point de vue non plus de l'hydrologue mais des acteurs de la gestion du risque. En fonction du niveau de protection souhaité, différents acteurs publics ou privés interviennent :

- L'action publique avec la prise en compte du risque inondation dans l'aménagement du territoire et les outils de l'action publique face à l'aléa pour la prévention et la gestion de la crise,
- Les assureurs : estimation du coût des dommages occasionnés par les inondations et financement des réparations,
- Les concepteurs et exploitants de grands ouvrages qui doivent montrer une vigilance particulière quant à la sûreté des ouvrages pendant les crues.

En guise de synthèse, il y a beaucoup de problèmes de langage et de communication en ce qui concerne le risque d'inondation. La terminologie est mal définie. La clarté du langage est importante pour l'acceptabilité du risque. Les hydrologues mettent au point de nombreuses méthodes d'estimation des paramètres des crues fondées sur des approches diversifiées qui visent à réduire les incertitudes sur les valeurs rares et extrêmes. Cependant, tous manquent d'accessibilité aux données. Il y a généralement trop peu de financements accordés pour les études hydrologiques lors de l'élaboration des projets. La cartographie est un outil d'aide à la décision à l'échelle régionale qui peut être comprise par tous. Les effets du changement climatique ne sont pas encore visibles sur les précipitations extrêmes, on note seulement une augmentation des températures minimales. On constate un manque de critères de dimensionnement pour les barrages à partir des études hydrologiques et des approches hydrauliques. De gros efforts doivent être faits de la part du Ministère de l'Ecologie et des collectivités pour permettre aux acteurs de la prévention du risque inondation de mettre en place les meilleurs dispositifs de protection face aux crues.

### **Prise en compte du risque inondation dans l'aménagement du territoire, M. Reppelin (Courly)**

Cette présentation concernait la gestion du risque inondation dans la communauté urbaine de Lyon. Cette gestion est effectuée dans une politique de gestion globale du risque car la communauté est soumise à de nombreux risques pour lesquels la démarche en terme de prévention, prévision et protection est la même. La prise en compte du risque inondation est démontrée par la mise en œuvre du P.P.R.I. Pour la mise en œuvre de ce plan de prévention, un inventaire des différentes zones d'occupation des sols associées aux risques de débordements des lits, ruptures de digues, conséquents à de fortes crues est nécessaire. Le PPRI considère comme crues de référence, celle de 1840 pour la Saône et celle de 1856 pour le Rhône. Il détermine également les différentes responsabilités définies à partir de concertations entre les différents acteurs publics. Le PPRI est découpé par zones ou secteurs d'activité et par zone d'urbanisation. La détermination de zones inondables peut susciter certaines négociations d'ordre politique concernant la confrontation entre les zones d'activité économique et d'urbanisation et les zones d'expansion des crues. Le principe de précaution est souvent perçu par l'opinion publique comme démesuré par rapport au risque qu'elle estime encourir ; la notion d'acceptation du risque doit être travaillée auprès de l'opinion publique.

*Que se passerait-il si la crue de la Saône de 1840 se reproduisait aujourd'hui ?*

*Réponse : Suite à cette inondation, des mesures de protection et de prévention ont été prises avec un rehaussement des quais qui jouent maintenant le rôle de digue. Le problème actuel se situe en amont de Lyon dans les zones urbanisées situées dans les plaines alluviales. Il y a eu une forte augmentation de la vulnérabilité de ces zones. La crue de 1840 recalculée avec le plan d'occupation des sols actuel a une côte plus basse.*

*M. JOSSE (CG Gard) : Les maires répondent aux interdictions de construire en zones inondables que cela empêche le développement économique de la zone. A-t-il été fait une analyse de la proportion des zones à risque par rapport à la proportion de besoin d'occupation actuel et de développement économique futur ? Il faut faire la part entre les zones à risque et celles sans risque. Dans le Gard, 82% du territoire n'est pas inondable, 4% du territoire est occupé par l'homme et les besoins futurs*

concernent 2% des surfaces. En dehors des zones inondables, il y a beaucoup de place et bien suffisamment pour ne pas freiner le développement.

*Réponse : Cette analyse a été faite par la communauté urbaine de Lyon dans une vision de politique globale du risque, car même si le risque inondation n'est pas très important, la communauté est soumise à de nombreux autres risques tels que les risques technologiques avec « la vallée de la chimie », les risques de transport de matières dangereuses . Les zones inondables comme les champs d'expansion de crues peuvent être exploités à des fins touristiques dès lors qu'il n'y a aucune activité au moment des crues. C'est le cas des lônes en amont de Lyon. Dès lors que le risque se situe en zone résidentielle ou zone d'activités, le risque est déporté sur les terres agricoles pour leur protection, une inondation sur des terres agricoles engendre moins de conséquences économiques. Le coût du dépassement d'une crue centennale est relativement méconnu des autorités car il a tendance à engendrer un effet de panique avec la mise en œuvre effective d' une démarche de limitation du risque.*

### **Coût des inondations et financement des dommages, R. Nussbaum (Mission Risques Naturels)**

La modélisation des dommages causés par les inondations consiste en une génération de scénarios fondés sur la connaissance de l'aléa pour déterminer les dommages intéressant toutes les parties prenantes et le calcul de la perte assurée définie par les conditions de contrat. La Mission « Risque Naturel » a permis d'établir une cartographie du nombre total de logements sinistrés et de la proportion des bassins touchés associée à 3 types d'événements. L'estimation des dommages calée sur des scénarios établis à partir de données observées permet de déterminer des coûts moyens par événement. Les incertitudes sont bien plus grandes là où l'on ne dispose d'aucune donnée d'observation. Les modes de financement fonctionnent selon les deux approches temporelles, à priori et à posteriori. A posteriori, il se fait par une solidarité fiscale via des aides publiques ou privées. A priori, le financement est assuré soit par l'indemnisation publique avec le système de subventions ou de fonds de solidarité soit par l'indemnisation privée avec les assurances. En partenariat pour le même objectif de réduction des risques, le public et le privé ont une politique d'incitation à la prévention. Concernant les arbitrages, il y a une incitation économique à la prise de conscience du risque et à la réduction de vulnérabilité des conditions d'assurance. Les assureurs souhaiteraient la mise en œuvre d'un dispositif d'évaluation de la pertinence et de l'efficacité des PPRI pour stimuler l'action publique dans sa politique de prévention.

*L'échelle de classification du risque n'est pas fixée. Les notions de « courant », « rare », « extrême » varient selon les utilisateurs. Il est suggéré de faire de la communication aux particuliers sur les dépenses d'indemnisation pour les dommages occasionnés. Il faudrait envisager des partenariats durables en terme d'assurance pour les grands risques industriels. Il n'y a aucune information aux particuliers des risques naturels, il faudrait mettre en place un observatoire de la vulnérabilité pour analyser son évolution dans le temps. L'IFEN et la Commission Internationale pour la Protection du Rhin travaillent déjà dans ce sens.*

### **La maîtrise du risque de crue pour les grands barrages-réservoirs, M. Poupert (EDF-DPIH)**

De nombreux accidents sur les barrages résultent encore de problèmes de conception ou d'exploitation. Le volume stockable disponible à l'arrivée de la crue est le paramètre fondamental de l'influence du passage d'une crue sur les retenues et barrages. Le rapport entre volume disponible dans la retenue et le volume de la crue va déterminer l'efficacité du laminage. Le système de protection aura toujours un effet positif sur les crues, cependant l'efficacité de ces protections diminue avec l'importance de l'événement. Il y a deux types d'évacuateurs de crues : les évacuateurs à seuil libre et les évacuateurs à masque. La débitance est le paramètre majeur du dimensionnement des évacuateurs pour les crues extrêmes. Une occurrence rare est toujours recherchée pour la protection, mais il y a plusieurs manières de considérer la protection : soit on s'intéresse aux conséquences aval d'une

catastrophe, soit au dimensionnement en fonction du degré de protection souhaité, on optimise alors la hauteur des retenues et leur surface. Il existe différentes approches pour la protection des crues extrêmes. Pour certains ouvrages, les méthodes de dimensionnement peuvent être imposées. Il peut également y avoir des niveaux de protection fondés sur des « bonnes pratiques » ou sur des recommandations techniques, comme en France pour les barrages relevant du Comité Technique Permanent des Barrages. En cours d'exploitation, les opérateurs doivent se tenir informés des prévisions hydrologiques, et être en relation avec le Service de Prévision des Crues. Ils doivent appliquer des consignes d'exploitation qui visent notamment à ne pas dépasser la cote des Plus Hautes Eaux, à ne pas accentuer le débit naturel de la crue et à minimiser le volume d'eau re-largué.

*En 2002, au barrage de la Rouvière, la cote du plan d'eau est montée 70 cm au dessus de la cote PHE. Comment choisir la crue de référence pour de tels ouvrages ? On parle maintenant de crue de projet et de crue de sûreté. Les plus anciens ouvrages doivent faire l'objet d'une révision de l'évacuation des crues.*

*A la demande du Comité Technique Permanent des Barrages, les experts se penchent sur l'hydrologie et le dimensionnement des ouvrages de crue. Actuellement les risques de rupture sont plus liés au volume de la crue plutôt qu'à son débit de pointe. On s'interroge sur la sécurité des petits et moyens barrages par rapport aux très grandes crues. Il n'y a pas de consensus sur les périodes de retour à retenir pour le choix de la crue de projet. Le Bulletin technique CIGB n°125 recommande des périodes de retour assez faibles pour le dimensionnement de gros ouvrages, mais les experts eux-mêmes contestent parfois de telles pratiques.*

#### **Les outils de l'action publique, C. Dimitrov (CG P&C)**

La prévention du risque « inondation » nécessite la connaissance à la fois de l'aléa et des enjeux exposés. L'action publique intervient dans ce processus de prévention depuis la diffusion dans le public d'une culture du risque jusqu'à l'information préventive des populations. Des mesures de protection telles que les PPRI sont prises de manière à éviter l'exposition aux effets des grandes crues et à réduire ainsi les enjeux. La préparation et la gestion des situations à risque sont assurées en collaboration avec les services de prévision des crues, qui diffusent des messages de vigilance et d'alerte. Les enjeux de protection face au risque doivent être pris en compte dans les règles d'urbanisme et de construction, qui doivent tendre à une réduction des conséquences du risque inondation.

*Est-ce que les autorités françaises pourraient faire face à des événements exceptionnels, contrairement au cas des Etats-Unis avec Katrina ?*

*Réponse : En France, le Plan de Secours face à une crue centennale à Paris est fondé sur la référence qu'est la crue de 1910.*

#### **I.4 Conclusion générale du colloque, Patrick Le DELLIYOU (IG P&C, CTPB, Président du CFBR)**

La participation soutenue au colloque SHF sur les valeurs rares de précipitations et de débits témoigne à elle seule de la préoccupation forte des responsables face à ces phénomènes naturels rares, difficiles à modéliser et peu propices à l'expérimentation, dont les sociétés oublient trop facilement les effets.

Progresser dans ce domaine nécessite une participation active des chercheurs, plus de mise en commun des données hydrologiques constituées, plus de professionnalisme dans la prescription et dans la conduite des études hydrologiques, un effort de tous pour mieux mémoriser dans la durée et mieux

utiliser le retour d'expérience des épisodes majeurs observés, une communication très soignée en direction du public avec un langage – notamment cartographique - à réinventer.

Les choix dans ce domaine engagent des enjeux sociétaux majeurs et imposent d'abord que l'on se comprenne et que les risques hydrologiques soient convenablement pesés par tous.

C'est avec tout cela qu'on améliorera la qualité intrinsèque des travaux d'études hydrologiques.

Sur une demande du Comité Technique Permanent des Barrages, ce colloque organisé par la SHF et le Comité français des barrages et réservoirs, a été consacré à la gestion du risque crue dans l'aménagement du territoire et le dimensionnement des grands ouvrages.

Les composantes hydrauliques et les aspects liés au calibrage et à la sûreté des organes de passage des crues des barrages, non abordés ici, pourront faire l'objet d'un colloque ultérieur.