DOI 10.1051/lhb/2011001 La Houille Blanche, vol. 1, 2011, p. 14-21

Besoins operationnels et progrès actuels en matière de connaissance des phenomènes physiques dans l'hydrologie des crues

André BACHOC [1], Rémy GARÇON [2], Fabrice DALY[3], Alain GAUTHERON[4], Eric GAUME[5], Charles PERRIN[6], Charles OBLED[8], Thierry LEPELLETIER[7]

[1.] *SCHAPI (SRNH/DGPR/MEEDDM), 42 Avenue Gaspard Coriolis 31 057 TOULOUSE CEDEX 01, e-mail : andre.bachoc@developpement-durable.gouv.fr*

[2.] *EDF-DTG, 21 Avenue de l'Europe, BP41, 38040 GRENOBLE CEDEX 09, e-mail : remy.garcon@edf.fr*

[3.] *Direction régionale de l'environnement d'Ile-de-France 79, rue Benoît Malon 94257 Gentilly, e-mail : fabrice.daly@developpement-durable.gouv.fr*

[4.] *DDT de l'Isère, SPC Alpes du Nord, BP45, 17 bd J. Vallier 38040 Grenoble cedex 9, e-mail : alain.gautheron@developpement-durable.gouv.fr*

[5.] *Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, BP 4129, 44341 Bouguenais Cedex, e-mail : gaume@lcpc.fr*

[6.] *Cemagref, UR Hydrosystèmes et Bioprocédés, Parc de Tourvoie, BP 44, 92163 Antony Cedex, e-mail : charles.perrin@cemagref.frmailto :LHB@shf.asso.fr*

[7.] *Hydratec, Tour Gamma D, 58 quai de la Rapée, Paris 75012, e-mail : lepelletier@hydra.setec.fr*

[8.] *Université de Grenoble, ING – LTHE, e-mail : charles.obled@hmg.inpg.fr*

RÉSUMÉ. –

Mots-clés : Crue

Operational needs and current improvements in terms of knowledge of physical processes in flood hydrology

ABSTRACT. –

Key-words : Flood

I. INTRODUCTION

J'ai souhaité que cette conférence soit un travail collectif pour dire à plusieurs voix, à travers la mienne, les besoins, ainsi que les progrès les plus importants, récents ou en vue, en matière de connaissance des phénomènes hydrologiques, au sens large, au bénéfice des applications opérationnelles, notamment pour :

— une bonne qualification des crues et des inondations, qui constitue un des éléments nécessaires pour ajuster les mesures de prévention, en application de la directive européenne 2007/60/CE du 23 octobre 2007 sur l'évaluation et la gestion des inondations, que nous dénommerons plus loin « directive inondations »,

— et surtout une prévision des crues et des inondations suffisamment anticipée et précise, y compris sur les incertitudes, en vue de l'alerte et des secours. Cette mission est assurée, pour les 20 000 km de cours d'eau surveillés par l'Etat par le réseau de prévision des crues constitué du service hydrométéorologique pour l'appui à la prévision des inondations (SCHAPI), les services de prévision des crues (SPC) et les unités d'hydrométrie (UH). Elle est étroitement liée à la gestion des ouvrages, hydroélectriques, d'écrêtement des crues ou assurant d'autres fonctions.

Nous illustrerons ces besoins et ces progrès, en particulier sur le bassin de la Seine.

Nous proposerons aussi de reconnaître qu'il peut exister des ruptures, dans les processus physiques dominants et leur connaissance, entre trois classes d'évènements : les crues courantes, les crues moyennes (de l'ordre de la centennale, comme la vedette du jour dont nous célébrons le centenaire), et les crues exceptionnelles, pour reprendre les termes de la directive sur l'évaluation et la gestion des inondations.

II. LES BESOINS ET LES PROGRÈS POUR LA CONNAISSANCE ET LA PRÉVISION DE LA PLUIE

II.1. Radars hydrométéorologiques et pluviomètres au sol : des progrès réalisés, beaucoup d'autres à venir

Au cours des dernières années, l'observation des pluies a connu de fortes évolutions. L'extension du réseau radar hydrométéorologique Aramis à 24 radars sur l'hexagone a permis de mieux appréhender la dynamique spatio-temporelle des évènements pluvieux et notamment les phénomènes convectifs. Sur le traitement du signal, des avancées significatives ont été réalisées avec la prise en compte du profil vertical de réflectivité grâce à l'exploitation multi-sites des radars. Cependant, force est de constater que la calibration des images à partir des données de pluviomètres au sol reste indispensable pour une utilisation quantitative en hydrologie. L'utilisation désormais opérationnelle de nouvelles technologies comme la double polarisation et le doppler, permettant de mieux caractériser les météores, d'améliorer la relation entre la mesure de réflectivité et les précipitations, et de

Article published by SHF and available at http://www.shf-lhb.org or http://dx.doi.org/10.1051/lhb/2011001

mesurer les vitesses de vent en altitude, laisse présager de notables progrès à venir. L'amélioration constante de la lame d'eau radar pose cependant la question de l'homogénéité des résultats et de la longueur des séries pour une utilisation en données d'entrée pour le calage des modèles hydrologiques. L'utilisation de lames d'eau combinant des données provenant de radars et de réseaux au sol, comme la lame d'eau Antilope, semble une voie d'avenir, à améliorer et à faire perdurer.

Néanmoins dans les zones de relief, les effets de masque rendent l'imagerie radar Aramis quasi inopérante. Ces secteurs sont cependant le siège d'effets orographiques importants liés à l'altitude mais aussi à la nature des types de temps et à l'orientation des massifs [Gottardi F., 2009]. L'impact de la température sur l'accumulation et la fonte nivale, l'absence de réseau de mesure de précipitations au dessus de 2 000 m d'altitude en raison des difficultés liées aux conditions atmosphériques (vent, température, …) et les problématiques d'approvisionnement en énergie rendent difficile la simple compréhension des phénomènes sur des bassins de montagne parfois à forts enjeux (l'Isère à Grenoble, le Var à Nice, l'amont de bassins de la Garonne et de l'Adour, …). L'arrivée de nouveaux matériels comme les disdromètres, permettant de mieux cerner la phase des précipitations, et l'expérimentation de radars à bande X en PACA dans le cadre du projet RYTHMME, ouvrent de nouvelles perspectives.

II.2. La préservation et le renforcement nécessaires de la qualité des réseaux de pluviomètres, tant que l'évaluation quantitative de la pluie par l'imagerie radar n'est pas consolidée

Ces avancées métrologiques ne doivent pas masquer les questions de fond concernant la densité des réseaux d'observation, la qualité de leur exploitation, et leur pérennité dans le temps. Certains secteurs resteront mal couverts par le réseau de radar et justifient une densité plus importante de pluviomètres au sol (par exemple sur les hauts bassins de l'Yonne et du Loing). De plus les besoins pour la prévision des crues de la Seine à Paris ne peuvent correspondre à ceux des prévisionnistes pour l'Huveaune et *a fortiori* aux besoins du gestionnaire des réseaux d'assainissement de Marseille ou de Seine-Saint-Denis. La variabilité spatiale de la précipitation augmente quand diminue le pas de temps à prendre en compte (au plus de l'ordre du tiers du temps de montée de l'hydrogramme de crue), ce qui fait qu'à précision relative égale, il faut des réseaux plus denses pour les bassins à temps de réaction rapide. La connaissance des phénomènes extrêmes et de l'évolution du climat nécessite aussi de longues séries de données. Il ne s'agit pas uniquement de préserver les séries existantes mais de produire un effort supplémentaire pour les compléter et sauvegarder les données historiques. La mise en œuvre de ré-analyses pluviométriques paraît une voie séduisante car celles-ci permettent à l'utilisateur d'obtenir des séries complètes sur de longues périodes. Mais cette facilité d'utilisation ne doit pas masquer la variabilité de l'incertitude en fonction de la qualité et de la quantité de données assimilées. Ces ré-analyses devraient encore évoluer vers des pas de temps infra-journaliers, indispensables à la modélisation hydrologique.

Si les perspectives à moyen terme restent la complémentarité entre les réseaux au sol et les radars, cette complémentarité doit être définie et il faudra encore un certain temps pour que les résultats soient pleinement opérationnels. Au fur et à mesure que les données issues des radars se développent et sont disponibles, elles doivent être critiquées et comparées à celles qui sont issues des pluviomètres au sol, afin d'optimiser le choix de l'information pluviométrique dans les différentes applications liées à la prévision des crues.

Il est, par exemple, envisageable de :

— caractériser le comportement individuel de chaque pluviomètre existant (lacunes, biais, statistiques sur les précipitations…), les corrélations entre postes et la représentativité de chacun,

— comparer les cumuls et intensités mesurés aux pluviomètres à ceux données par la lame d'eau radar sur les pixels correspondants (pluviomètres fictifs), en données brutes et corrigées, selon des indicateurs statistiques.

— comparer les cumuls obtenus aux exutoires avec diverses lames d'eau radar et avec une interpolation des mesures par les pluviomètres.

L'interopérabilité des réseaux devient indispensable, avec en ligne de mire l'application de la directive Inspire à l'horizon 2014 (diffusion des données météorologiques des autorités publiques sur Internet). D'ici là, nous devrons rester vigilants à ce que l'optimisation des réseaux au sol permette d'assurer une qualité d'observation suffisante pour continuer à progresser de façon fiable, et pour cela encourager les démarches de coopération et de cofinancement des réseaux, tout en favorisant la concentration des résultats et leur dissémination.

De façon générale, pour les bassins relativement grands, où l'utilisation des seules pluies observées permet déjà d'atteindre des échéances de prévision raisonnables, il est urgent de mieux cerner l'incertitude sur les lames d'eau de pluie observée, qui apparaît comme l'une des principales sources d'erreurs. En effet, les modèles hydrologiques obtiennent encore des résultats assez médiocres, à la fois en raison de l'imprécision des données en temps réel et du manque de données de calage précises et homogènes sur un nombre d'épisodes suffisamment représentatifs. Les cumuls par épisode sont le paramètre le plus important, mais la répartition plus précise des pluies dans le temps et dans l'espace est également utile et souvent nécessaire.

II.3. La prévision des précipitations s'améliore mais reste encore trop incertaine

Pour la prévision des crues sur des bassins plus réactifs, ou l'anticipation sur des bassins lents mais à forts enjeux (comme le bassin de la Seine à Paris), tout progrès en matière de prévision immédiate constituera un bonus important. La prévision immédiate (à quelques heures) des précipitations a fait des progrès récents, notamment par l'utilisation de l'imagerie radar, mais ils restent limités au regard de l'attente forte des gestionnaires de bassins rapides, et sont beaucoup moins nets que ceux de la prévision d'autres variables météorologiques. En particulier pour des évènements à caractère convectif, il subsiste des difficultés dans la prévision de la localisation et la dynamique des précipitations. L'arrivée de modèles non-hydrostatiques à mailles très fines, comme AROME, laisse espérer des améliorations sur l'estimation des quantités mais aussi sur leur localisation et leur temporalité. Le réseau pour la prévision des crues est prêt pour approfondir le couplage entre ces modèles atmosphériques et les modèles hydrologiques, en vue de valoriser rapidement, et d'évaluer, l'apport pour l'hydrologie. Dans l'attente, il est nécessaire d'accepter et de gérer la possibilité de fausses alertes pour des bassins versants à court temps de réponse, du fait des limites de l'état de l'art.

II.4. Le recours à des méthodes probabilistes pour mieux cerner les incertitudes

Pour mieux prendre en compte l'incertitude de ces prévisions, les hydrologues s'intéressent depuis longtemps aux approches probabilistes. Les évolutions récentes des performances de calcul des modèles météorologiques permettent aujourd'hui de réaliser des prévisions d'ensemble, en réalisant plusieurs simulations basées sur des perturbations des conditions initiales et/ou de la paramétrisation du modèle. Ces scénarios peuvent être exploités statistiquement en amont de leur utilisation dans un modèle hydrologique ou bien considérés comme autant de scénarios possibles. Et leur couplage avec des modèles hydrologiques permet de générer plusieurs dizaines de traces, permettant des évaluations statistiques.

Pour satisfaire les besoins spécifiques des utilisateurs, des méthodes d'adaptation des résultats des modèles météorologiques ont vu depuis longtemps le jour. Pour plusieurs équipes d'hydrologues, l'approche privilégiée a été la recherche de situations analogues. Le principe de la méthode est de rechercher dans le passé des conditions météorologiques similaires à celles qui sont prévues jusqu'à 8 ou 10 jours d'avance, puis d'identifier les précipitations observées correspondantes sur les bassins versants concernés. Ces conditions météorologiques sont caractérisées, par exemple, par la distribution spatiale des géo-potentiels (courbes de niveau représentant l'altitude pour une valeur de pression atmosphérique donnée), dont la prévision est plus fiable et plus robuste que celle des précipitations. Cette technique connaît un regain d'intérêt grâce notamment à la mise à disposition de ré-analyses météorologiques de qualité sur de longues périodes (NCEP NCAR 1948-2008 et ERA40 1958-2002), fortement demandées par les climatologues. Si la technique est encore peu utilisée aux pas de temps infra-journaliers, c'est plus du fait de la limitation de disponibilité d'archives pluviométriques que de la méthode [Marty R, 2010 ; Ben Daoud A, 2010].

La prévision d'une autre variable est importante en montagne, et n'a pas fait jusqu'ici l'objet des mêmes progrès : la température, et notamment l'altitude de l'isotherme 0°C, cruciale pour distinguer pluie et neige.

II.5. Des prétraitements importants des données pluviométriques nécessaires notamment pour la prévision

Naturellement, l'intégration dans la modélisation hydrologique de prévisions probabilistes nécessite d'importants prétraitements des prévisions de précipitations pour prendre en compte les différents cycles de rafraîchissement des prévisions tant hydrologiques que météorologiques, pour désagréger temporellement ou spatialement ces prévisions de précipitations et pour assimiler d'autres informations qualitatives, par exemple sur la prévision du début, de la fin ou des intermittences des précipitations [Marty R, 2010].

III. LES BESOINS ET LES PROGRÈS POUR L'ESTIMATION STATISTIQUE DES CRUES : LE CAS DE LA SEINE À PARIS

L'usage, pour l'Ile-de-France au moins, est de qualifier de majeures les crues de plus de 6 m à l'échelle de Paris Austerlitz (environ décennale) et d'exceptionnelles celles supérieures à 7 m (T environ 30 ans). Il peut y avoir confusion avec la terminologie normalisée par la « directive inondations », et il est nécessaire d'aller au-delà, en quantifiant l'évaluation statistique des crues.

Le débit de 1910 est estimé à 2400 m^3/s par de nombreuses études basées soit sur la reconstitution de l'hydrologie amont soit sur l'élaboration de courbes de tarage à Paris, mais cette valeur est incertaine, ainsi que la périodicité, pour laquelle, nous constatons simplement que la hauteur atteinte en 1910 (8,62 m) l'a été deux fois en 4 siècles (1910 et 1658) et approchée une autre fois (1740) ; bien que ces données ne soient pas homogènes hydrologiquement, il est donc peu probable qu'elle soit millennale, et elle a pu légitimement être considérée comme la crue (PHEC) de référence. C'est un phénomène exceptionnel de période de retour au moins centennale.

Des analyses plus approfondies du déroulement et des circonstances aggravantes des crues passées pourraient également permettre de contribuer à mieux évaluer l'ordre de grandeur des crues exceptionnelles futures dont il faudrait se prémunir.

Depuis 1997, il n'y a guère eu d'études de reconstitution par modélisation. On peut néanmoins évoquer quelques valeurs clés des débits de la crue de 1910 en certains points du bassin pour que les valeurs publiées en 1997 soient prises avec toutes les précautions nécessaires dans les études relatives à la crue centennale. En effet, il paraîtrait utile de citer des éléments de critique ou de contre-expertise de ces valeurs, issus directement des valeurs jaugées à l'époque et qui n'ont pu être suffisamment valorisées (cf. colloque SHF « Incertitudes et mesures hydrologiques » d'avril 2008). Il a été mis évidence que le débit publié en 1997 notamment sur la Seine aval était nettement sous-estimé en comparaison des jaugeages réalisés à l'époque et dont les incertitudes sur les mesures elles-mêmes ne justifient pas les différences. A titre d'exemple le débit à Mantes publié en 1997 est de 2770 m^3/s, à comparer à 3250 m^3/s publiés en avril 1910 par Willemin, après exploitation de la campagne soutenue de jaugeages au cours de la crue. Le cas de Mantes est d'ailleurs remarquablement bien renseigné. Des jaugeages à l'amont et à l'aval confirment en outre la cohérence des débits mesurés. Pourtant un débit plus important sur la Seine aval que le débit publié en 1997 serait difficilement compatible avec 2400 m^3/s à Paris, les différences n'étant que partiellement explicables par les apports intermédiaires (Oise) et par les débits passant en dehors du lit de la Seine (canaux, égouts).

Ces éléments contradictoires illustrent bien une première difficulté rencontrée dans l'estimation statistique des crues extrêmes : elle repose, dans le cas de stations localisées à l'aval de bassins hydrographiques de grande étendue (telle que la station de Paris Austerlitz), sur des traitements statistiques de chroniques de débits observés, avec des incertitudes importantes sur les forts débits : les ajustements statistiques classiques pour estimer les débits d'occurrence rare sont biaisés en particulier par les incertitudes sur l'hydrométrie. Par ailleurs, un ajustement statistique basé sur des mesures de débits de crues non exceptionnels, réputées moins approximatives, ne permet pas d'estimations précises des débits des crues de période de retour élevées : 100 ans et plus. L'expérience a montré que des méthodes d'extrapolation de type gradex [Guillot P., Duband D., 1967] utilisant la pluviométrie donnent des résultats souvent satisfaisants pour les bassins versants à structure géomorphologique relativement simple mais sont difficilement applicables lorsque l'onde de crue résulte de la superposition d'apports en provenance de sous bassins versants hétérogènes. C'est le cas

de la Seine à Paris dont les débits de crue résultent de la superposition des apports des sous bassins de la petite Seine, de la Marne et de l'Yonne.

Notons au passage que l'on dispose pour la Seine d'une chronologie continue des cotes de crues sur une période de plus de deux siècles ; mais ces informations sont très difficilement exploitables pour ajuster des niveaux de crue d'occurrence rare car la série n'est pas hydrologiquement homogène, les niveaux historiques observés résultant des conditions météorologiques mais aussi des transformations anthropiques. Par exemple le niveau de la Seine atteint en janvier 1910 à Paris pourrait être abaissé aujourd'hui jusqu'à 1.20m avec les mêmes conditions météorologiques qu'alors, du fait de l'action conjuguée des aménagements apportés à l'hydraulicité du lit mineur dans la traversée de Paris et des lacs réservoirs (sous réserve de conditions favorables, les lacs ne devant pas être pas remplis, et d'une gestion optimisée) [Lepelletier Th, 1998].

On peut tenter de cerner les aléas aux stations aval de grands bassins hydrographiques (telle que la station du pont d'Austerlitz sur la Seine) à l'aide de démarches inspirées des approches anglo-saxonnes de quantification des aléas. Ainsi, la « méthode statistique de courbes enveloppes », a été appliquée dans l'étude de 2009 sur le système de la Loire estuarienne [Lepelletier Th., Prudhomme-Lacroix B., 2010] pour quantifier des niveaux extrêmes en tout point de l'estuaire pour trois périodes de retour statistique : 50, 100 et 200 ans, avec encadrement des niveaux calculés par des intervalles de confiance. Le principe consiste à raisonner à l'échelle du bassin en réalisant tout d'abord une analyse physique spatio-temporelle globale (et non purement statistique) afin de préciser les relations structurelles entre les différents facteurs intervenant dans les mécanismes de génération des niveaux de crue exceptionnels. Il y a là une rupture avec les approches traditionnelles basées sur des études locales. Cette analyse débouche sur la définition d'un jeu limité d'événements synthétiques (quelques dizaines) résultant d'une combinaison statistique homogène d'un nombre limité de paramètres « excitateurs », ceux ci devant être statistiquement indépendants, à moins qu'on ne puisse déterminer précisément leur corrélation. Chaque événement est ensuite simulé à l'aide de modèles hydrologiques et hydrauliques calés sur le domaine de l'étude. L'aléa cherché correspond à l'enveloppe des valeurs obtenues, tous événements confondus. Ces démarches constituent une piste intéressante.

Dans un autre ordre d'idée, les approches bayesiennes font l'objet d'un regain d'intérêt de la part de la communauté hydrologique depuis la popularisation des algorithmes d'inférence statistique dit « Monte Carlo Marcov Chain » [Kuczera, 1999 ; Naulet et al., 2005 ; Reis & Stedinger, 2005 ; Payrastre, 2005, Neppel et al., 2010 ; Gaume et al., 2010]. Celles-ci permettent en effet d'intégrer des informations de nature variée lors des ajustements statistiques et donc d'enrichir l'information disponible au-delà des séries continues de débits observés : crues historiques ou paléo-crues aux débits incertains, maximums régionaux, dires d'experts… D'autre part, ces techniques conduisent à un calcul explicite des incertitudes sur les débits de périodes de retour calculés, incertitudes bien trop souvent ignorées ou largement sous-évaluées (cf. Gaume et al, dans ces mêmes actes pour quelques exemples). Des travaux de recherche sur ce sujet sont en cours dans le cadre du projet EXTRAOFLO du programme ANR RiskNat (coordonné par Michel Lang, Cemagref).

IV. LES BESOINS ET LES PROGRÈS POUR LA SIMULATION DES PHÉNOMÈNES HYDROLOGIQUES ET HYDRAULIQUES, OU GLOBALEMENT POUR LA PRÉVISION DES CRUES

IV.1. Les nécessaires avancées sur les incertitudes liées à la modélisation, notamment pour la prévision

Malgré de très nombreux travaux de recherche dans les domaines de la modélisation hydrologique et hydraulique, il faut reconnaître que les modèles restent largement perfectibles et leurs résultats encore assez incertains. Cette incertitude est souvent délicate à quantifier. De nombreuses méthodes s'y attachent pour un aspect particulier de la chaîne de modélisation (mesures de pluie ou de débit, prévisions de pluies, structure et/ou paramétrage du modèle), mais c'est généralement l'incertitude totale sur les sorties du modèle qui intéresse le plus le prévisionniste des crues qui sera conduit d'ici peu à afficher des valeurs prévues de débit et de niveau d'eau, ce qu'il ne devra pas faire sans indiquer l'incertitude associée à ces prévisions.

De plus, pour l'organisation de la sécurité civile, le décideur est moins intéressé par la disponibilité d'une incertitude mathématique un peu abstraite, que par un scénario à la fois pessimiste et réaliste. Il faut donc développer aussi une capacité à prévoir non seulement une valeur moyenne et une fourchette ou un fuseau qualifiés, mais aussi une valeur haute restant réaliste, notion variable suivant la gravité des enjeux.

Les retours d'expérience sur les systèmes de prévision de crues en place aujourd'hui dans un certain nombre de SPC permettent de mettre en lumière les approches plus fécondes et celles aboutissant à des impasses jusqu'ici. Le choix optimum dépend très fortement des caractéristiques hydro-morphologiques du bassin versant. Ainsi les débits de crue des bassins à fort potentiel de ruissellement et à temps de réaction rapide (quelques heures) dépendent de la lame d'eau moyenne précipitée, mais aussi de l'intensité et de la localisation des précipitations sur le bassin versant. Aussi, les résultats des modèles de prévision sont souvent peu précis en raison des fortes approximations attachées à l'estimation de la lame d'eau. L'amélioration de l'observation de la pluie est donc une condition nécessaire.

Par contre, les systèmes de prévision intéressant de grands bassins hydrographiques dont le temps de réaction à l'aval est de plusieurs jours, peuvent fournir des résultats précis à condition de concevoir une architecture globale intégrant l'ensemble des modules de calcul dans une logique de traitement « amont-aval » combinant des modules de production et de propagation calés et des modules de recalage des prévisions à l'aide des données hydrométriques observées. La qualité de la prévision passe alors par le recalage (ou une assimilation) en temps réel : c'est là que les marges d'amélioration apparaissent les plus fortes.

Les analyses rétrospectives des simulations passées peuvent permettre de constater empiriquement la distribution des erreurs du modèle et donc de quantifier les incertitudes à venir, dont la qualité et la transposabilité temporelle restent cependant largement à explorer. Le modélisateur a peu de prise sur celles qui sont liées aux entrées du modèle, mais il peut s'attacher à réduire celles issues du modèle lui-même. Il semble intéressant d'explorer plusieurs voies :

— Développer des méthodes d'évaluation plus exigeantes des modèles, qui permettraient de mieux en évaluer les limi-

tes. L'analyse des performances des modèles peut s'avérer trop bienveillante et éloignée de leurs conditions réelles d'utilisation. De véritables « crash tests » [Andréassian V.& al, 2009] doivent être mis en place, par exemple pour évaluer les capacités d'extrapolation des modèles en dehors des gammes de calage [Klemeš V., 1986] (en cela, la crue de 1910 est un bon exemple) ou leur capacité à faire face à des niveaux d'information dégradée, comme c'est souvent le cas dans l'exercice des prévisions. Des évaluations comparatives, sur des ensembles de cas d'études et en utilisant des critères d'évaluation exigeants et parlants pour les utilisateurs (critères sur les montées de crue, dépassements de seuils, etc.), doivent également permettre de progresser dans la compréhension du fonctionnement des modèles et l'évaluation de leurs valeurs relatives. C'est en généralisant de telles démarches que la confiance des utilisateurs dans les modèles pourra s'accroître.

— Faire une meilleure exploitation des informations existantes, sur les distributions temporelles (notamment pour l'initialisation des modèles [Javelle P., 2008] ou spatiales. A titre d'exemple, une meilleure exploitation des informations de débit à l'amont d'un point de prévision [Lerat J., 2009 ; Munier S., 2009] ou des informations sur la répartition spatiale de la pluie devraient contribuer à de meilleures performances. Cela peut s'appuyer sur des schémas de distribution raisonnables issus d'un compromis entre complexité des modèles et maintien des qualités évoquées précédemment (capacité d'extrapolation, robustesse), en définissant de nouvelles modalités de couplage entre modèles hydrauliques et hydrologiques, et/ou en utilisant des schémas d'assimilation améliorés permettant de réduire les erreurs du modèle en temps réel. Une prise en compte accrue de la variabilité spatiale des facteurs à l'origine des crues, en particulier dans les régions méditerranéennes, apparaît aujourd'hui pouvoir être réalisée par des approches de modélisation spatialisées, pour lesquelles les développements méthodologiques et informatiques des décennies passées ont abouti à des outils et des stratégies de calage qui autorisent une utilisation opérationnelle [Bouvier et al.,2008 ; Roux et al., 2009].

L'interfaçage d'un modèle de transfert sol, végétation, atmosphère avec une fonction de routage permet l'évaluation des bilans d'eau. Ce couplage a été réalisé de manière intensive pour évaluer les modèles climatiques globaux et régionaux dans le cadre des ré-analyses et des études du changement climatique. La chaîne Safran Isba Modcou [Habets, et all, 2007], mise en œuvre par Météo-France, fait partie des ces modèles déterministes, nécessitant la définition de nombreux paramètres en fonction de leur niveau de représentation des phénomènes physiques. Si l'apport de la télédétection permet de mieux cerner certains paramètres, les performances de tels modèles butent encore sur l'extension spatiale de notre compréhension de la physique des sols. De plus la taille relativement grande des mailles de ce type de modèles et les puissances de calcul nécessaires semblent encore peu adaptées à l'hydrologie opérationnelle. Par contre ils peuvent être utilisés en termes de forçage ou d'adaptation des conditions initiales d'autres outils.

— Développer des méthodes pour démarrer les modèles sur des bases assez proches de la réalité, grâce à

  — des modèles continus comme GRP [Javelle P., 2008 ; Berthet L., 2010],

  — des méthodes d'assimilation des données permettant d'ajuster les résultats des modèles hydrologiques ou hydrauliques sur les mesures acquises dès le début de l'évènement [CERFACS, 2009 ; Castaings W. et al, 2009 ; Berthet L., 2010].

Enfin, alors que les attentes sont fortes, il est indéniable que les efforts consentis au cours des dernières décennies pour répondre à la question récurrente de la prévision sur les bassins versants non jaugés n'ont abouti qu'à des solutions encore éloignées des exigences opérationnelles en termes de performances et de fiabilité [Oudin L., 2007]. La transposabilité spatiale des modèles en dehors des sites où ils ont été mis au point et calés doit être améliorée. Pour cela, le travail sur la mise au point de nouveaux critères de similarités hydrologiques et sur la définition de voisinages plus pertinents doit être développé.

Et sur certains bassins versants, comme la partie amont du bassin de la Seine (Morvan, plateau de Langres), les modèles pluie-débit sont calés sur des évènements trop peu nombreux et d'ampleur trop moyenne pour être suffisamment performants. Une bonne maîtrise de la variabilité de leurs réactions en fonction de l'humidité des sols, de la répartition des pluies, de la présence de neige ou de gel, améliorera leur fiabilité.

IV.2. En complément des modèles, la consolidation de l'expertise hydrologique

La prévision des crues est un exercice particulièrement périlleux par rapport à d'autres types de prévisions, parce qu'elle concerne essentiellement des phénomènes rares et exceptionnels. Par définition, peu nombreux sont les phénomènes du passé comparables et bien documentés, à partir desquels des modèles de prévision peuvent être calés et validés. L'hydrologue prévisionniste travaille donc sans filet puisqu'il doit produire des scénarios d'évolutions de situations qui n'ont que peu ou pas d'équivalent dans le passé. Dans ce type de situation, l'expertise, qui n'est que très partiellement synthétisée dans les modèles numériques, est déterminante pour produire des extrapolations pertinentes : l'exercice de prévision ne peut se limiter à la simple utilisation de modèles qui restent et resteront imparfaits. Il est donc important que les prévisionnistes puissent disposer d'outils simples d'aide au diagnostic hydrologique en temps réel à partir des données observées disponibles (calculs de rendements d'écoulement des bassins versants au cours des crues, de vitesses de propagation d'ondes de crues…), comme la base de données pour l'expertise hydrologique (BDEH) en cours de développement par le SCHAPI et les SPC. De plus, les retours d'expériences sur les crues majeures sont aussi une étape essentielle de la construction d'un corpus de connaissance à partir duquel cette expertise peut se construire [Gaume & Bouvier, 2004 ; Gaume et al, 2004 ; Delrieu et al., 2005 ; Huet, 2005 ; Gaume & Borga, 2008 ; Borga et al., 2008 ; SPC Loire Cher Indre, 2009, Gaume et al., 2009 ; Marchi et al., 2009].

IV.3. Se donner les moyens d'anticiper plus et plus largement en indiquant seulement des ordres de grandeur

D'autre part, les prévisions hydrologiques se doivent d'éclairer les décisions de gestion de crise : évacuer ou non une zone inondable, choisir le mode de ravitaillement ou de secours, … Les erreurs de jugement suite à des prévisions erronées sont alors très mal acceptées. Cela ne signifie pas nécessairement que les prévisions doivent être quasi-parfaites, mais que les utilisateurs des prévisions doivent être informés du niveau des incertitudes associées aux prévisions pour pouvoir mesurer les risques qu'ils prennent [Houdant B.,2004]. La diffusion de la carte de vigilance pour les crues

et des autres informations du site internet « vigicrues.gouv.fr » aux acteurs institutionnels et au grand public constitue un acquis important. Des prévisions sont effectuées désormais bien plus régulièrement – *a minima* deux fois par jour – habituant les utilisateurs à ce type d'information et démontrant que les prévisions hydrologiques sont relativement fiables en période courante. De plus, ce site a étendu la pratique de la prévision hydrologique à la notion de vigilance appliquée depuis plusieurs années à l'anticipation météorologique, en modifiant imperceptiblement mais sûrement la philosophie générale de la prévision : un risque de dépassement de seuil, dépassement non certain, est aussi une information essentielle pour la préparation à la crise.

Une forte demande sociale s'exprime pour aller au-delà. Le défi à relever est de décliner cette philosophie :

— plus précisément et avec plus d'anticipation, un horizon de prévision variable suivant les points de prévision (de 5 à 6 jours à Paris par exemple) sur les 20 000 km de cours d'eau surveillés par l'Etat,

— et, sous une forme plus globale avec un risque affiché et assumé de fausses alertes, sur les bassins versants plus réactifs (dont le temps de réaction est, globalement, de moins de 6h).

L'affichage des incertitudes n'a pas été jusqu'à présent la règle courante des services de prévision des crues qui se sont souvent limités aux cas où des prévisions précises sont possibles : horizons de prévision relativement courts sur de grands bassins versants. Or, la connaissance anticipée d'une possible inondation, même incertaine, peut être indispensable pour mettre en place une réponse appropriée. Un délai de 3 à 5 jours est par exemple nécessaire pour mobiliser les moyens et organiser la réponse à la crue de nombreux services à Paris, alors même qu'une erreur de 10 ou 20 % sur le débit peut fortement changer le scénario attendu et la gravité des conséquences. Les réponses à une crue sont souvent graduées et les premières mesures peu coûteuses – typiquement la mobilisation de moyens – peuvent être prises sur la base d'un simple ordre de grandeur de l'ampleur possible de la crue, en fonction d'une prévision comprenant 3 paramètres : la hauteur atteinte, l'échéance et la probabilité. Dans un tout autre contexte que celui de la Seine à Paris, des premiers tests ont été conduits en région méditerranéenne pour évaluer en quoi des prévisions distribuées et incertaines de coupures de routes par inondations pouvaient être utiles aux services de secours lors des crues soudaines [Versini et al., 2009]. Malgré les incertitudes associées aux prévisions hydrologiques, les premiers résultats sont très prometteurs. Ces travaux se poursuivent actuellement dans le cadre du projet de recherche PreDiFlood du programme ANR Risk Nat (coordonné par Eric Gaume, LCPC).

IV.4. Un effort d'amélioration qui s'organise progressivement

Le dialogue plus dense aujourd'hui entre chercheurs, chargés d'études et opérationnels (SCHAPI et SPC), conduit à la mise en place d'observatoires, ou à la constitution d'archives de données sur de multiples bassins versants, ainsi qu'à un renforcement de l'hydrométrie. Il débouche sur des diagnostics plus ciblés et des améliorations pour l'observation de divers types de rivières et de bassins versants et l'extrapolation à des bassins versants démunis de séries de mesures longues et consolidées, et pour le dépassement des limites actuelles dans la représentation des phénomènes (pour l'initialisation des modèles, les « doubles pointes » de crues, la variabilité des temps de propagation des crues, …), ou dans la maîtrise des incertitudes.

V. VERS DES MÉTHODES ET OUTILS D'ANALYSE ET DE PRÉVISION ADAPTÉS À LEUR PLAGE D'UTILISATION

Les développements à mener dans le domaine de l'hydrologie des crues doivent être conçus ou recadrés en prenant bien en compte les phénomènes qui affectent la légitimité des extrapolations et donc limitent la validité de la projection des connaissances présumées. L'hydrologie opérationnelle est en effet marquée par des hétérogénéités de comportement qui n'en finissent pas de compliquer l'existence de ses pratiquants.

De telles ruptures se situent aussi bien au niveau des processus physiques (météorologiques, hydrologiques, hydrauliques dans le lit des cours d'eau et dans les zones inondées), que des comportements (des ouvrages, des gestionnaires de crises et des personnes touchées par l'inondation).

Cela vaut déjà, à l'amont de l'hydrologie proprement dite, pour les quantités d'eau apportées par les précipitations. Il est de notoriété publique que les distributions de ces volumes d'eau n'obéissent ni à Laplace ni à Gauss et, en conséquence, même sur un bassin de taille moyenne (plus de 1000 km^2), un prévisionniste peut, au terme de 5 années d'exercice, être brutalement confronté à des cumuls deux ou trois fois plus abondants que ceux qu'ils aura déjà rencontrés. Il pourra également être surpris par la répartition spatiale de ces précipitations. Les « barrières » climatiques sont capricieuses : les débordements d'épisodes espagnols par delà les crêtes des Pyrénées, de pluies cévenoles sur le bassin de la Loire ou d'épisodes de Lombarde sur l'Arc et le Guil ont des extensions spatiales et des intensités bien délicates à anticiper. Rappelons que, si 2010 correspond au centième anniversaire de la fameuse crue de la Seine, c'est aussi le cinquantième d'un épisode qui a vu tomber, sur le nord-ouest du Massif Central, des pluies que l'on n'envisageait jusque là en France qu'en milieu méditerranéen [La Houille Blanche, 1961].

Comme chacun sait, cette irrégularité statistique des quantités d'eau précipitées est gravement amplifiée par les non-linéarités des mécanismes d'écoulement. Limites de rétention des sols, développement de zones contributives, saturation des réseaux karstiques sont autant de causes de forte variabilité de l'efficacité marginale des pluies (20 mm de pluie en plus n'ont pas du tout le même effet suivant le cumul antérieur). Chaque avancée apportant une solution – même schématique – aux problèmes posés par ces changements de comportement, est précieuse. Est-il, de ce point de vue, un meilleur exemple que le saut qualitatif permis, à la fin des années 1960, par la méthode du gradex [Guillot P. et Duband D., 1967], sur les bassins où elle était applicable ? Comment ne pas évoquer aussi ici les difficultés supplémentaires créées par la présence d'une couche de neige et sa capacité, toujours incertaine, à retenir longtemps – en cas de fonte ou de pluie – une grande quantité d'eau liquide, jusqu'à un seuil au-delà duquel l'écoulement augmentera brutalement ?

Enfin, à l'aval de l'hydrologie, d'autres effets de seuils – hydrauliques, cette fois – viennent encore compliquer les choses.

Finalement, l'irrégularité des phénomènes et la grande variabilité qui s'ensuit aboutissent à fragiliser de plusieurs

manières notre appréhension des phénomènes rares. Les dispositifs de mesure eux-mêmes, quand ils ne sont pas neutralisés par les conditions extrêmes, ne peuvent être qualifiés aussi bien que pour les gammes physiques dans lesquelles ils fonctionnent couramment. Outre les données dont la disponibilité, la qualité et la représentativité sont compromises, les modèles eux-mêmes sont amenés à fonctionner dans des gammes où ils sont moins bien calibrés. On peut ainsi s'interroger sur la valeur des modèles pour les bassins amont de la Seine lors d'évènements exceptionnels, même si, en s'appuyant sur le fait que la partie « propagation hydraulique » devrait rester assez correcte en grand crue, la prévision en crues majeures sur la base de modèles robustes pourrait faire l'objet de développements spécifiques. Enfin les opérateurs humains, notamment quand il s'agit de prévisions en temps réel, ont tendance à perdre, eux aussi, les points de repère qui leur permettent habituellement d'exercer une critique efficace des données d'entrée et des sorties de modèles.

Sans même aborder ici les autres problèmes qui peuvent, à l'aval, affecter la gestion de la crise, on imagine l'ampleur des efforts à mener pour garantir que le dispositif de prévision conserve ses performances en présence de phénomènes rares ou, pour le moins, présente une certaine résilience : l'adaptation des outils mis en place aux types d'évènements auxquels ils devront faire face n'est pas acquise par avance et elle mérite une attention particulière. Ce qui a été dit au § 4.1 pour les « crash test » des modèles hydrologiques, vaut pour l'ensemble de la chaîne. Des gains récompensent toujours l'investissement dans les systèmes d'observation et dans l'analyse des données collectées. L'exploitation des informations – même qualitatives – disponibles sur les phénomènes historiques, la constitution de bases de connaissances synthétisant ces évènements du passé, sont susceptibles d'apporter aux services de prévision, au moment critique, le recul et les points de repère qui atténueront quelque peu les dégradations accompagnant le passage du domaine des crues courantes à celui des crues rares ou exceptionnelles, comme on l'a vu au § 4.2.

Enfin, plus les phénomènes sont rares, plus notre ignorance augmente, plus la connaissance de ce qu'on ignore prend de l'importance : la maîtrise des incertitudes de prévision et leur communication, dont il a déjà été question aux § 4.1 et 4.3, sont d'autant plus stratégiques que ces dernières sont élevées. L'augmentation de l'incertitude, lorsque l'on s'éloigne des gammes où la connaissance des phénomènes est la plus fine, doit pour cela être appréhendée avec lucidité.

VI. CONCLUSION

Pour l'Ile-de-France

Elle n'est pas à l'abri des inondations. En particulier, les illusions qui continuent à flotter autour de l'efficacité des protections fixes ou amovibles et de la capacité des barrages-réservoirs à éviter la catastrophe doivent être ramenées à leur juste mesure : leur efficacité décroît avec l'intensité de la crue et leur effet à Paris en conditions optimales (crue en janvier alors que les réservoirs sont presque vides) ne serait que de -70 cm pour 800 millions de m^3 de stockage. Il est utile de le rappeler régulièrement pour maintenir la vigilance, que l'étude de l'IIBRBS a contribué à réveiller. Ce colloque anniversaire organisé par la SHF est aussi très bienvenu pour cela, même si nous espérons tous que l'année 2010 ne sera pas l'année de la nouvelle crue centennale ; car ce serait une catastrophe pour la communication sur les statistiques de crues, et, plus sérieusement, parce que nous ne sommes pas encore vraiment prêts à y faire face.

Et au niveau national

Ici comme ailleurs, il est donc essentiel de continuer à mobiliser toutes les ressources pour réduire le risque d'inondation, dans le cadre donné par la directive européenne sur l'évaluation et la gestion des inondations et les plans de gestion des risques d'inondation qu'elle demande de mettre en œuvre.

Il s'agit d'abord de mieux évaluer et partager l'évaluation des risques d'inondation, sur un plan statistique et par la description des phénomènes et des enjeux concernés, en partageant de mieux en mieux une limitation stricte de l'urbanisation des zones inondables en sauvegardant l'essentiel du fonctionnement urbain, voire en l'améliorant. Il convient aussi de réduire au mieux la vulnérabilité des biens et des personnes exposées. C'est un autre volet important de la prévention au sens strict. La poursuite des actions de protection est aussi à l'ordre du jour, mais elle sera d'autant plus efficace qu'elle sera dépouillée des illusions prométhéennes que nous commençons à relativiser dans ce domaine comme dans d'autres, … avec des poches de résistance.

Nous ne pouvons pas finir sans évoquer l'amélioration de nos outils, de nos procédures et de nos équipes pour la prévision des crues et l'aide à la gestion des crises d'inondation, dans les SPC et au SCHAPI, ou pour la gestion de crise elle-même, au niveau des équipes du préfet, des maires et des autres acteurs locaux qui ont à définir et mettre en œuvre les PCS (plans communaux de sauvegarde). Des liens méthodologiques sont à développer, d'une part entre les outils de prévision qui permettent d'élaborer des scénarios d'inondation assortis de probabilités et les plans de gestion de crise, et d'autre part entre l'urbanisme (aménagements nouveaux) et la facilitation de la gestion de crise. Ici aussi nous serons d'autant plus efficaces que nous restons conscients du caractère réversible des avancées. Souvenons-nous qu'il existait déjà un réseau d'observation et d'annonce des crues de la Seine dès 1876, ayant produit de bonnes prévisions à 5 jours de la crue de 1876 par Belgrand (cf. annales des ponts et chaussées), et peut-être moins performant en 1910.

Deux lignes, enfin, sur les effets du changement climatique, encore difficile à cerner du fait de fortes incertitudes, mais avec une tendance à l'augmentation des pluies hivernales dans le nord de la France.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Ben Daoud A. (2010) — *Améliorations et développements d'une méthode de prévision probabiliste des pluies par analogie. Application à la prévision hydrologique sur les grands bassins fluviaux de la Saône et de la Seine, Thèse de doctorat, Grenoble-INP*

[2] Berthet L. (2010) — *Prévision des crues au pas de temps horaire : pour une meilleure assimilation de l'information de débit dans un modèle hydrologique. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris*. 290 p

[3] Bouvier C., Marchandise A., Brunet P., Crespy A. (2008) — Un modèle distribué parcimonieux pour la prédétermination et la prévision des crues éclair. Application au bassin du Gardon d'Anduze (France), *World Water Congres, Montpellier (France), novembre 2008*

[4] Castaings W., Dartus D., Le Dimet F.X., Saulnier J.M. (2009) — Sensitivity analysis and parameters estimations for distributed hydrological flodds modeling : potentiel of variational methods, *Hydrology and Earth System Sciences*. **13** 503-517

[5] Cemagref (2008) — *Rapport Convention Cemagref - SCHAPI*. 23 p

[6] Cerfacs (2010) — Maquettes D'assimilation De Donnees Pour Les Codes Athys Et Mascaret, *Rapport Convention Cerfacs - SCHAPI : Assimilation de données pour l'hydrologie et l'hydraulique*

[7] Gaume E., Bouvier C. (2004) — Analyse hydro-pluviométrique des crues du Gard et du Vidourle des 8 et 9 septembre 2002, *La Houille Blanche.* **6** 99-106

[8] Gaume E, Livet M., Desbordes M., Villeneuve J-P. (2004) — Hydrologic analysis of the Aude, France, flash flood 12 and 13 november 1999, *Journal of Hydrology.* **286** 135-154

[9] Gaume E., Borga M. (2008) — Post flood field investigations after major flash floods : proposal of a methodology and illustrations. doi :10.1111/j.1753-318X.2008.00023.x, *Journal of flood risk management*. **1** 175-189

[10] Gaume E., Bain V., Bernardara P., Newinger O., Barbuc M., Bateman A., Blaškovičová L., Blöschl G., Borga M., Dumitrescu A., Daliakopoulos I., Garcia J., Irimescu A., Kohnova S., Koutroulis A., Marchi L., Matreata S., Medina V., Preciso E., Sempere-Torres D., Stancalie G., Szolgay J., Tsanis J., Velasco D., Viglione A. (2009) — A collation of data on European flash floods. doi10.1016/j.jhydrol.2008.12.028, *Journal of Hydrology.* **367** 70-78

[11] Gaume E., Gaál L., Viglione A., Szolgay J., Kohnová S., Blöschl., G. (2010) — Bayesian MCMC approach to regional flood frequency analyses involving extraordinary flood events on ungauged sites, *Journal of hydrology. [In press]*

[12] Gottardi F. (2009) — *Estimation statistique et ré-analyse des précipitations en montagne. Utilisation d'ébauches par types de temps et assimilation de données d'enneigement. Application aux grands massifs montagneux français. Thèse de doctorat Institut national Polytechnique de Grenoble.* 252 p

[13] Guillot P., Duband D. (1967) — La méthode du GRADEX pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies, *AISH Publication n°* **84** 560-569

[14] Habets F., A. Boone J. L . Champeaux P. Etchevers L. Franchisteguy E. Leblois E. Ledoux P. Le Moigne E. martin S. Morel J. Noilhan P. Quintana Segui F. Rousset-Regimbeau P. Viennot (2008) — The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France. doi10.1029/2007JD008548, *J. Geophys. Res.* **113** D06113

[15] Houdant B. (2004) — *Contribution à l'amélioration de la prévision hydrométéorologique opérationnelle. Pour l'usage des probabilités dans la communication entre acteurs. Thèse de doctorat, ENGREF*. 209 p

[16] Huet, Ph. (2005) — *La méthodologie des retours d'expériences après les accidents naturels, première tentative de codification, Rapport de l'inspection générale de l'environnement. Rapport technique, Ministère de l'écologie et du développement durable, Paris, France*

[17] Javelle P. (2008) — *Comparaison des modèles de prévision des crues développés au Cemagref : GR3H et GR3P*

[19] Klemeš V. (1986) — Operational testing of hydrological simulation models, *Hydrological Sciences Journal.* **31(1)** 13-24

[20] Kuczera G. (1999) — Comprehensive at-site flood frequency analysis using Monte Carlo Bayesian inference, *Water Resources Research*. **35 (5)** 1551-1557

[21] (1961) — *La Houille Blanche*. **B**

[22] Marti R., Lepelletier Th (1997) — I.1 L'hydrologie de la crue de 1910 et autres grandes crues du bassin de la Seine, *La Houille Blanche*. **8** 33 - 39

[23] Lepelletier Th, Prudhomme Lacroix B.(2010) — Détermination des lignes d'eau extrêmes dans l'estuaire de la Loire par une approche statistique de courbes enveloppes », *Colloque SHF Risques d'inondation en Ile-de-France, Paris, 25-26 mars 2010*

[24] Lerat J. (2009) — *Quels apports hydrologiques pour les modèles hydrauliques ? Vers un modèle intégré de simulation des crues. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.* 300 p

[25] Marchi L., Borga M., Preciso E., Sangati M., Gaume E., Bain V., Delrieu G., Bonnifait L., Pogancik N. (2009) — Comprehensive post-flood survey of a flash flood in Western Slovenia : observation strategy and lessons learned doi : 10.1002/hy p. 7542, *Hydrological Processes*. **23 (26)**

[26] Marty R. (2010) — *Prévision hydrologique d'ensemble adaptée aux bassins à crue rapide : élaboration de prévisions probabilistes de précipitation à 12h et 24h, désagrégation horaire conditionnelle pour la modélisation hydrologique, application à des bassins de la région Cévennes-Vivarais, Thèse de doctorat, Grenoble-INP*. 235 p

[27] Munier S. (2009) — *Modélisation intégrée des écoulements pour la gestion en temps réel d'un bassin versant anthropisé. Thèse de doctorat*

[28] Naulet R., Lang M., Ouarda T.B.M.J., Cœur D., Bobee B., Recking A., Moussay D. (2005) — Flood frequency analysis on the Ardèche River using French documentary sources from the two last centuries, *Journal of Hydrology*. **313** 58-78

[29] Neppel L., Renard B., Lang M., Cœur D., Gaume E., Jacob N., Payrastre O., Pobanz K., Vinet F.(2010) — Flood frequency analysis using historical data : accounting for random and systematic errors, *Hydrological Sciences Journal. [in press*

[30] Oudin L., Andreassian V., Perrin C., Michel C., & Le Moine N. (2008) — Spatial proximity, physical similarity and ungaged catchments : confrontation on 913 French catchments, doi10.1029/2007WR006240, *Water Resources Research*. **44** W03413

[31] Payrastre O. (2005) — *Faisabilité et utilité du recueil de données historiques pour l'étude des crues extrêmes de petits cours d'eau. Etude du cas de quatre bassins versants affluents de l'Aude. PhD thesis, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, France*

[32] Reis D.S., Stedinger J. R.(2005) — Bayesian MCMC flood frequency analysis with historical information, *Journal of Hydology*. **313 (1–2)** 97-116

[33] Roux H., Maubourguet M.-M., Castaings W., Dartus D.(2009) — Analysis of flash flood processes dynamics in a mediterranean catchment using a distributed hydrological model, *11th Plinius Conference on mediterranean storms, 07 – 11 September 2009, Barcelona, Spain*

[34] Spc Loire Cher Indre (2009) — *Crue du 31 octobre au 6 novembre 2008 sur le bassin amont de la Loire. Rapport d'étude*

[35] Versini P.-A., Gaume E., Andrieu H. (2009) — Simulations hydrométéorologiques distribuées et prévision des coupures de routes dans le Gard), DOI 10.1051/lhb/2009081, *La Houille Blanche*. **6** 72-75