

Deux exemples d'inondations par ruissellement : quelles leçons en tirer pour une meilleure prévention ?

Yves Nédélec

Très souvent, le risque d'inondation est associé au voisinage d'un cours d'eau, dont le lit majeur couvre des zones désignées comme inondables. C'est pourtant loin d'être toujours le cas. Des inondations peuvent toucher un hameau, une route, des bâtiments, tous situés sur des terrains très éloignés de tout ruisseau ou rivière. L'origine de telles inondations sera dans certains cas une pluie très violente, dans d'autres un désordre dans l'écoulement des eaux pluviales, ou encore la stagnation inhabituelle de grandes quantités d'eau dans une zone habitée.

Ces inondations sont alors diversement désignées, et pas nécessairement en tant que telles : on les qualifie de torrent, de coulée de boue, ou encore de « véritable vague »... (cf. quelques récits de presse dans l'encadré 1). À travers ces dénominations, la présence de l'eau est intimement liée à la violence de l'écoulement, ou aux dépôts de terre qui l'accompagnent, plus qu'à la submersion.

Après de tels événements, les mises en cause sont d'autant plus virulentes que l'incident est inhabituel ou grave. Les voix se font alors entendre pour reprocher l'insuffisance de réseaux d'évacuation d'eaux pluviales, l'absence ou l'insuffisance de retenues de stockage, le défaut d'entretien des fossés, les sols dénudés...

Longtemps associés au rôle joué par les sols agricoles, les écoulements intenses hors du réseau hydrographique ont fait l'objet de nombreuses études, qui mettaient l'accent sur le risque de leur concentration au sein des parcelles plus que sur

leur devenir sur les versants. Ils constituent cependant une partie d'un enjeu socio-économique majeur, doublée d'une question hydrologique à part entière, moins étudiée cependant. C'est un savoir-faire s'appuyant sur le sens pratique ou des observations locales spécifiques, qui ont permis des actions de modération des écoulements dans des régions (Pays de Caux) ou des paysages particuliers (vignobles de coteaux), fréquemment sujets à de tels phénomènes.

Sollicité par la DRAF¹ de Haute-Normandie en 1997, et la DDAF² de l'Essonne en 2007, j'ai eu l'occasion d'examiner de plus près deux cas d'événements pluvieux aux conséquences désastreuses par suite de ruissellements importants. Bien que dix années presque jour pour jour séparent ces deux épisodes, plusieurs facteurs se montrent récurrents et suscitent une réflexion dans le temps.

Les deux cas d'études sont décrits dans un premier temps. En les utilisant comme illustrations, je propose ensuite des éléments de réflexion et des pistes pour tenter d'améliorer l'approche de ce type d'inondations, d'abord autour des pluies responsables, puis des outils hydrologiques adaptés, et enfin autour de l'aménagement des versants pour faire face au risque.

Le lecteur doit d'ores et déjà être averti que les conclusions de ces expériences s'expriment malheureusement plus en termes de besoin de recherche ou d'expérimentation, que de solutions techniques éprouvées.

1. Direction régionale de l'agriculture et de la forêt.

2. Direction départementale de l'agriculture et de la forêt.

Les contacts

Cemagref, UR HBAN
Hydrosystèmes et
bioprocédés, Parc de
Tourvoie, BP 44,
92163 Antony Cedex

Encadré 1

Quelques récits de presse pour cette année 2008...

10 juillet 2008 – La voix du Nord

Violents orages et inondations inévitables hier soir autour d'Aulnoye-Aymeries : une précipitation fulgurante. Trop, manifestement, pour être absorbée par le réseau d'égouts : plusieurs rues aulnoysiennes ont vu les maisons et les terrains envahis par les eaux. Rue Gabriel-Péri, comme dans le vieil Aulnoye, les descentes de garage ou les caves ont parfois récolté plus d'un mètre d'eau. « *C'est à chaque gros orage la même chose* », soupire ce riverain, habitué à « *ne plus rien laisser traîner en bas* ». Les riverains touchés dénoncent unanimement le réseau d'assainissement. « *Il n'y a pas assez de bouches d'égout, des canalisations trop petites !* » explosait hier une habitante du centre.

3 juin 2008 – Libération

Coulées de boue, inondations, à l'instar d'autres régions françaises, la Bretagne est soumise ces dernières semaines à de fortes intempéries qui provoquent d'importants dégâts. En Ille et Vilaine, les pompiers ont multiplié les interventions dans plusieurs communes, à commencer par le bourg de Val-d'Izé, près de Vitré, où le niveau de l'eau a atteint lundi plusieurs dizaines de centimètres, envahissant caves, rez-de-chaussée des maisons et commerces. « *On n'avait pas vu ça depuis quarante ans*, raconte Thierry Travers, premier adjoint de la commune. *C'est le résultat du cumul de plusieurs facteurs, sols détrempés et multiplication des averses avec une averse terrible lundi après-midi* ».

29 mai 2008 – L'Alsace

Les villages de Mommenheim et Eckwersheim ont ainsi été victimes de coulées de boue. Dans la première commune, l'eau et la boue sont montées à plus d'1 m de hauteur. Du jamais vu dans ce village, selon certains habitants qui ont vécu là toute leur vie.

La crue du 16 juin 1997 à Saint-Martin de Boscherville et Villers-Ecalles (Seine-Maritime)

Le 16 juin 1997, un orage d'une violence exceptionnelle s'est abattu dans la région de Rouen. Deux petits bassins versants proches de l'agglomération rouennaise ont été particulièrement touchés : un vallon qui débouche à Saint-Martin de Boscherville avant de rejoindre la Seine, et un autre qui débouche un peu plus au nord à Villers-Ecalles, avant de rejoindre la rivière Austreberthe (dont le bassin versant a fait l'objet depuis de la construction de multiples ouvrages, voir l'article correspondant dans ce numéro). Trois personnes trouveront la mort à Saint-Martin de Boscherville, leur voiture se trouvant emportée par le courant.

Devant l'ampleur des conséquences, une expertise hydraulique et hydrologique a été demandée au Cemagref par la DRAF de Haute-Normandie.

En 1997, la quantification des cumuls de pluie à partir d'échos radar est encore largement

imparfaite, et cet événement est une occasion de mener une analyse détaillée du déroulement local des précipitations. Les images radar montrent la progression, sur un axe sud-ouest/nord-est, entre 16 h 30 et 22 h 00, d'une cellule orageuse d'intensité modérée à forte (37 à 65 mm/h). Le caractère exceptionnel de cet orage provient du fait que les précipitations ont conservé localement cette intensité, avec parfois des pics d'intensité forte à très forte (120 à 200 mm/h), pendant une durée totale de 5 h 30.

La morphologie des deux bassins versants, chacun d'une superficie d'environ 14 km², est caractérisée par la présence de vallées profondément entaillées dans un plateau de faible pente, se terminant par des coteaux en déclivité prononcée. Ces vallées ne sont en eau que de façon exceptionnelle.

Cette morphologie est illustrée par la figure 1, sur laquelle les reliefs ont volontairement été exagérés pour faire ressortir le contraste entre plateaux dominants et vallons très encaissés. La cellule

orageuse a concerné au plus fort de l'épisode le plateau situé dans la moitié nord de la vue.

Les écoulements ont été très violents dans les vallons, empruntant tantôt la route descendant le long de ceux-ci, tantôt des passages enherbés situés légèrement en contrebas de la route (cette région comporte très peu de fossés routiers). Le bitume de la route a été arraché en de multiples endroits. Les eaux ont ensuite ralenti leur descente en pied de vallon, s'étalant dans les hameaux, et inondant habitations, fermes, rues.

Inondations du 29 avril 2007 sur le bassin versant de la Mérantaise (Essonne et Yvelines)

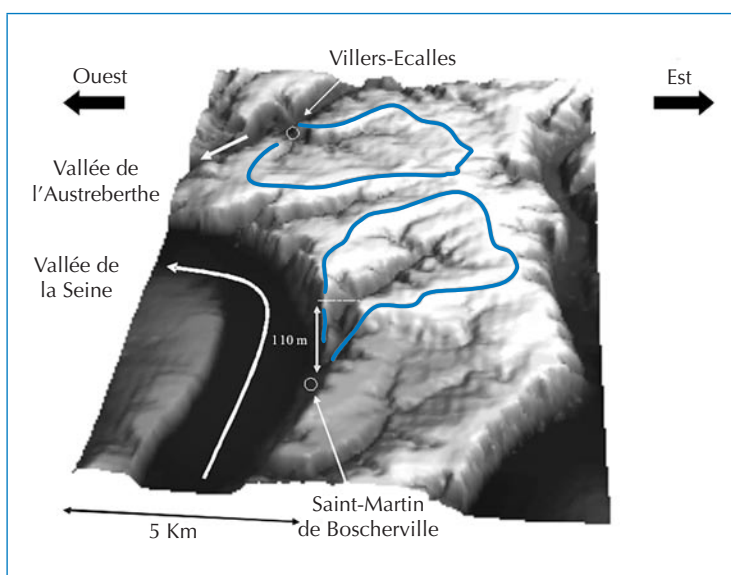
Le bassin versant de la Mérantaise a reçu le 29 avril 2007 les eaux d'un orage de très forte intensité. Cet orage a occasionné, en divers lieux du bassin versant, l'inondation d'un grand nombre d'habitations, ainsi que des dégâts importants par ravinement.

La Mérantaise est un affluent de l'Yvette, qu'elle rejoint à l'intérieur même de l'agglomération de Gif-sur-Yvette, en rive gauche. Le bassin versant, d'une superficie de 31 km² environ, s'étend de l'ouest vers l'est sur les départements des Yvelines et de l'Essonne. À la confluence, le bassin versant de l'Yvette couvre de son côté une superficie de 170 km² environ.

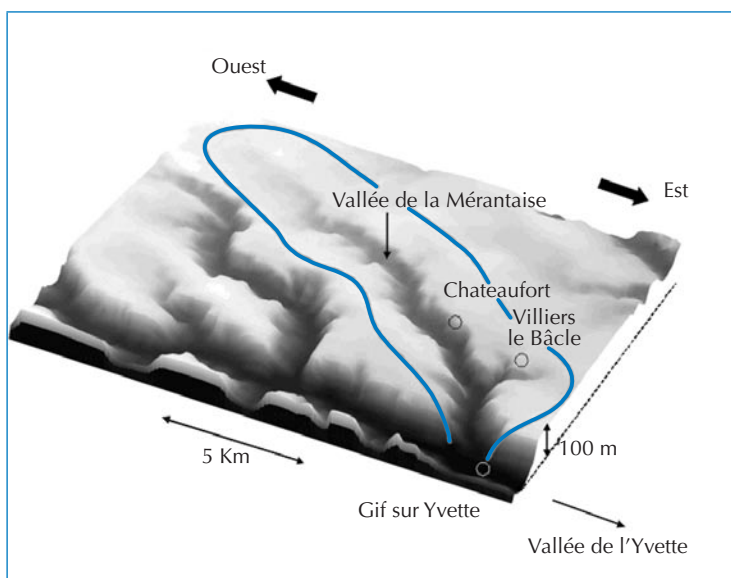
Le bassin versant de la Mérantaise est caractérisé par une vallée large mais profondément entaillée entre des plateaux bordés de coteaux pentus. Cette morphologie, assez comparable à celle rencontrée à Saint-Martin de Boscherville et Villers-Ecalles, est illustrée par la figure 2.

Trois sortes de problèmes sont apparus pendant et après l'orage du 29 avril 2007 : des inondations de zones habitées au pied d'un plateau agricole, des inondations de zones habitées en basse vallée, et enfin des problèmes d'érosion sur fortes pentes. Le nombre et la complexité des désordres ont conduit la DDE³ de l'Essonne à dresser un inventaire détaillé des zones et causes d'inondations.

Les photos 1 et 2 illustrent chacune une conséquence de ces incidents : aménagements d'urgence dans le premier cas, dégâts matériels importants dans l'autre. La photo 1 représente un talus en terre réalisé après l'orage, pour protéger des pavillons inondés (commune de Villiers-le-Bâcle, Essonne). Une lame d'eau stockée au bas



▲ Figure 1 – Morphologie des bassins versants de Saint-Martin de Boscherville et de Villers-Ecalles (en bleu : le contour approximatif des bassins versants).



▲ Figure 2 – Morphologie du bassin versant de la Mérantaise (en bleu : le contour approximatif des bassins versants).

de parcelles agricoles de plateau est à l'origine de l'inondation. La photo 2 représente la rue des Orfèvres dans l'agglomération de Chateaufort (Yvelines), rue de forte pente et très endommagée par des écoulements violents.

La gravité des conséquences de l'événement, dont l'inondation de quartiers entiers de l'aggloméra-

3. Direction départementale de l'équipement.



▲ Photo 1 – Talus en terre réalisé après l'orage, pour protéger des pavillons inondés (commune de Villiers-le-Bâcle, Essonne).



▲ Photo 2 – Rue des Orfèvres dans l'agglomération de Chateaufort (Yvelines).

tion de Gif-sur-Yvette, s'explique par un cumul important de précipitations sur une zone fixe, pendant une période de plusieurs heures faisant suite à un mois entier sans précipitations. Des cumuls de près de 90 mm, parfois supérieurs localement, ont ainsi été relevés en quatre à cinq heures.

Une particularité du bassin versant de la Méran-taise est l'ampleur des interventions de l'homme

sur la circulation des eaux. En effet, les écoulements du plateau sont collectés, en ses bords, par un dispositif ancien de rigoles, et destinés à l'alimentation des fontaines du château de Versailles. En outre, plusieurs retenues de stockage temporaire ont été construites sur le bassin versant pour contenir les rejets pluviaux de zones urbanisées, ou dans un but d'écrêtement des crues sur le cours même de la Méran-taise, en amont immédiat de Gif-sur-Yvette.

Les trois parties suivantes se reportent à ces deux cas pour faire ressortir des éléments utiles à l'analyse du phénomène et à sa prise en compte dans les règles d'aménagement de l'espace, ainsi que des questions à approfondir à travers de nouveaux programmes de recherche.

La première caractéristique de ces événements que l'on cherche à préciser est la nature des pluies qui les ont causés.

Ces précipitations qui posent problème

Les causes d'inondations sur des zones sans cours d'eau sont diverses. Mais elles sont souvent liées à des précipitations présentant soit une forte intensité, fût-ce sur une extension spatiale réduite, soit un déplacement lent. C'est ainsi le cas pour ces deux exemples.

Aux caractéristiques intrinsèques de l'épisode pluvieux viennent parfois s'ajouter des facteurs physiques, qui dépendent notamment des évolutions météorologiques antérieures. Par exemple, une période très sèche précédant des précipitations, peut avoir desséché les sols et diminué leur capacité d'infiltration, ce qui aggrave le ruissellement consécutif. Au contraire la période précédente peut avoir été très pluvieuse, ce qui aura alors saturé (engorgement) ou colmaté (battance) les sols. Le résultat est à nouveau une aggravation du ruissellement. Examinant également le rôle du travail du sol, de nombreux travaux de recherche ont abordé ces aspects avec pour objectif une limitation des phénomènes d'érosion ou de transport de certains polluants, comme par exemple l'étude de sols drainés sensibles à la battance (Augeard, 2006) ou les travaux du Laboratoire d'étude des interactions sol-agrosystème-hydro-système (LISAH) à Montpellier.

Revenant à la pluie, Il est absolument nécessaire de quantifier avec précision de tels épisodes intenses ou se déplaçant lentement, aussi bien

dans le temps que dans l'espace. En premier lieu, parce que si des intensités de pluie localement très fortes vont créer des écoulements violents, cette intensité présente une grande variabilité à laquelle un réseau de pluviomètres au sol ne peut accéder qu'au prix d'une densité suffisante et d'outils d'interpolation adaptés (Bourqui, 2008 ; Goovaerts, 2000). En tout état de cause, elle ne se maintient pas au même niveau sur tout un bassin versant ou tout un territoire. Ensuite, parce que la donnée la plus fiable actuellement du point de vue de la quantité cumulée, celle donnée par le pluviomètre au sol, ne permet pas une localisation précise et dynamique du recouvrement des bassins versants touchés par la zone pluvieuse.

Bien que l'imagerie radar appliquée à la quantification des pluies ne fût à l'époque qu'en développement, le découpage de la cellule orangeuse ayant arrosé Saint-Martin de Boscherville et Villers-Ecalles a été possible sur chacun des bassins versants, avec une maille de 1 km de côté. La figure 3 montre le résultat de ce découpage, qui a permis d'identifier des secteurs plus touchés que d'autres (cf. page 60, la partie relative aux outils hydrologiques).

Sur ces images, l'intensité de pluie maximale observée est de l'ordre de 60 mm/h, soit prati-

quement 170 l/s.ha ! On comprend aisément que la dynamique de l'événement est essentielle (les images sont disponibles tous les quarts d'heure) et que les cumuls localement atteints seront particulièrement importants du simple fait du déplacement lent de la zone arrosée. Les cumuls les plus élevés auront été pour cette pluie de 90 mm entre 14 h 00 et 20 h 00.

Dans le cas du bassin versant de la Mérintaise, les cumuls présentés par Météo France sont du même ordre : 85 mm en quatre heures à Villiers-le-Bâcle. Certains autres pluviomètres du bassin versant ont indiqué des cumuls bien plus importants, qui ont fortement marqué les esprits.

De fait, la notion de pluie exceptionnelle, perçue très directement par le public touché par les inondations, est actuellement très ancrée sur l'exploitation des données d'un pluviomètre isolé, ou d'un réseau de pluviomètres très distants au regard des précipitations en cause. Mais les images radar permettent désormais une analyse fiable d'un ou de quelques épisodes sur un secteur donné, et des avancées ont lieu depuis peu sur le volet spatial du caractère exceptionnel ou bien répétitif des événements. Ainsi, l'analyse simultanée de données de pluviomètres en réseau

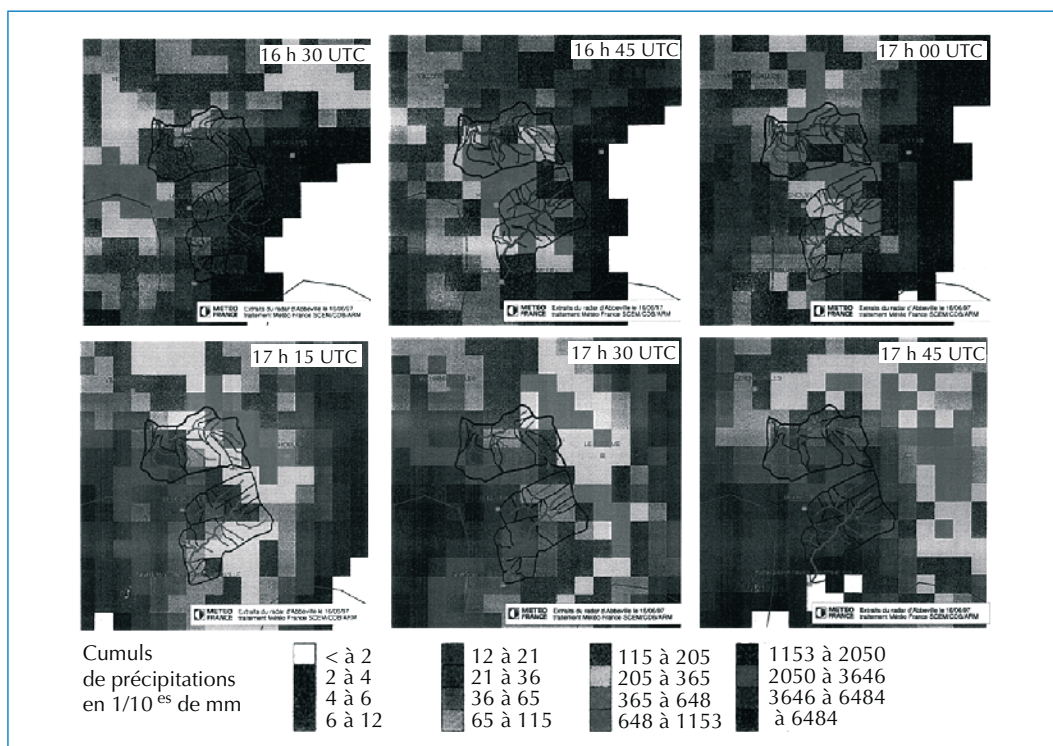


Figure 3 – Groupe d'images des précipitations du 16 juin 1997 à Saint-Martin de Boscherville et Villers-Ecalles (d'après les images du radar d'Abbeville, traitement Météo France SCEM/CDB/ARM).

et de données radar a été menée sur la région de Marseille pour définir une notion de sévérité des orages reliée à la taille des champs de pluie (Ramos *et al.*, 2006). On montre aussi que la survenue d'un cumul donné de pluie peut ainsi être à la fois très rare en un point fixé et relativement fréquente au sein d'un territoire de gestion, sans aucune contradiction.

Au-delà de l'occurrence du champ de pluie, la quantité d'eau qu'il contient a peu de chance de tomber exactement sur un unique bassin versant, ce qui en atténue fréquemment le caractère dangereux (Leblois, 2005). Pourtant, la pratique de l'ingénieur est d'aménager l'espace face à ces inondations (*cf.* page 61, la partie sur l'aménagement des versants) en intégrant une pluie ou un débit de projet unique. Il faut donc exclure le recours à une pluie de référence sans en examiner la signification précise selon la superficie, notamment, du bassin versant d'étude. Une telle démarche est encore à développer, d'autant que les données disponibles pour identifier un débit de projet sont pour ainsi dire inexistantes en dehors des cours d'eau.

Il apparaît à travers ces exemples ou d'autres situations de crise récurrentes, que des travaux de recherche tournés spécifiquement vers les caractéristiques spatiales de ces épisodes pluvieux, l'analyse simultanée de l'extension spatiale et des contours des bassins versants qui les reçoivent, l'analyse en intensité, durée et fréquence étendue à la superficie arrosée, sont d'actualité pour disposer de connaissances essentielles pour l'appréhension et surtout la prévention de ce type d'inondations. Les travaux en cours portent à la fois sur la caractérisation des pluies, et sur la possibilité de leur simulation stochastique tout en respectant les observations disponibles, afin de pouvoir aborder ces questions.

Quels pourraient être les outils hydrologiques adaptés ?

Les outils hydrologiques sont là pour répondre à des questions très diverses. Nous pouvons en distinguer de quatre sortes :

- des modèles liés à un événement isolé permettant la reconstitution de l'épisode en tant que transformation de la pluie en débit, et indirectement en hauteurs ou durées de submersion ;
- des modèles de régime permettant la caractérisation des écoulements en termes de fréquence ou période de retour ;

- des modèles de risque/prévention caractérisant un niveau de protection ou de vigilance, l'effet préventif d'un ouvrage (ou d'un ensemble d'ouvrages), ou enfin l'effet préventif d'un mode d'occupation du sol ;

- des outils de dimensionnement de dispositifs de prévention ou de protection.

Pour chacune de ces applications, l'hydrologue se trouve confronté à des difficultés liées à la nature de l'événement auquel nous nous intéressons ici : il met en jeu des quantités d'eau importantes sur des versants non localisés *a priori*.

Il ne sera pas possible dans cet article de revenir sur les connaissances et les méthodes disponibles dans chacun des cas. Les lignes qui suivent se borneront à présenter les deux premières approches telles qu'appliquées aux cas de Saint-Martin de Boscherville et Villers-Ecalles (Gilard *et al.*, 1997).

Le traitement de l'épisode isolé a été effectué en s'appuyant sur deux sources de données indépendantes : d'une part, sur une interprétation hydraulique simple des témoignages et marques de plus hautes eaux (estimation d'un niveau d'eau en régime uniforme), en différents points des bassins versants, et d'autre part, sur les résultats de deux modèles hydrologiques conceptuels robustes : GR4h et IHACRES (Perrin, 2000) – téléchargeables sur le site du Cemagref. Une estimation réaliste des pluies effectivement reçues par les bassins versants a été rendue possible par l'exploitation des données radar. Deux conclusions importantes ressortent de l'étude : il est possible d'obtenir une bonne correspondance entre les débits de pointe issus des deux méthodes ; en revanche, la durée caractéristique de l'épisode telle que relatée par les témoins (« deux heures d'écoulement au plus fort de la crue ») n'a pu être approchée par les modèles testés (de l'ordre de six heures). Il apparaît ainsi difficile, à partir de telles observations, de valider un volume de crue, qui serait pourtant une référence utile à la quatrième approche visant à dimensionner des aménagements de ralentissement des écoulements.

À titre de donnée de référence, pour situer d'autres événements par rapport à celui-ci, les débits spécifiques maximaux estimés pour cet épisode, sont compris entre 7 et 11 l/s.ha pour Saint-Martin de Boscherville, et entre 8 et 14 l/s.ha pour Villers-Ecalles.

L'approche de l'événement en matière de régime a dû se reporter aux données de référence en matière de pluie ou de ruissellement sur des vignobles de coteaux. C'est en effet ce contexte particulier de parcellaire agricole à fort ruissellement qui a fait l'objet d'études avancées (Galea *et al.*, 1995). S'il ne correspond pas tout à fait à la morphologie des bassins versants de Saint-Martin de Boscherville et Villers-Ecalles, il reste plus adapté que le contexte des cours d'eau généralement visé.

S'agissant de la lame d'eau précipitée, il est apparu que pour sa moyenne sur chacun des bassins versants, la pluie d'une durée d'une heure présentait une période de retour de cinquante ans, s'élevant à cent ans pour la pluie de six heures, montrant ainsi que le caractère exceptionnel de l'orage provenait de sa durée plus que de son intensité.

S'agissant des débits, les formules proposées sur les vignobles de coteaux ont montré une certaine pertinence dans le cas traité, et ont permis de dégager des modèles débits-durée-fréquence, puis de situer la période de retour de la crue sur chacun des bassins. L'absence de références a rendu difficile la mise en cohérence de la période de retour (de l'ordre de vingt-cinq ans pour un jeu de paramètres, et de cent ans en révisant celui-ci, notamment en termes de capacité d'infiltration) et de la perception historique de l'événement (présent dans les souvenirs avec une même violence vers 1900). Là encore, quel sens donner à une période de retour pour un événement touchant essentiellement un territoire limité, mais de localisation incertaine *a priori*.

Quant à disposer d'outils hydrologiques aidant à quantifier le risque ou la protection, désormais formellement du ressort des collectivités locales (Vignerot *et al.*, 2006), à dimensionner des ouvrages hors du réseau hydrographique permanent, il reste à mener un travail de rassemblement et d'harmonisation de données de référence sur des versants. Ce travail est jusqu'à ce jour essentiellement tourné, comme on l'a vu vers la pluie, la rivière ou des contextes très spécifiques, pour lesquels il a été systématisé. Un travail important a été réalisé par exemple pour la mise en œuvre d'alertes opérationnelles sur les cours d'eau en contexte méditerranéen à partir d'observations radars, par un outil baptisé AIGA⁴ (Lavabre *et al.*, 2006). L'expérience apportée par toutes les méthodes éprouvées sera utile à un développement resté maigre pour ce type plus général

d'inondations (en contexte d'usage du sol et en plage d'intensité). On pourra au moins utiliser, en les comparant entre elles, les méthodes classiques associées au ruissellement (SCS⁵, Caquot, méthode rationnelle...), dont une excellente présentation générale est réalisée dans Galea *et al.* (1995). Compte tenu de l'incertitude sur les lieux où pourront être observés avec précision (mesures de débits, de hauteurs d'eau...) les événements, on peut d'ores et déjà s'attacher à rechercher des méthodes d'évaluation reposant sur des critères flous ou non quantitatifs. En tout état de cause, la collecte et la mémorisation de témoignages visuels – comme réalisées par la DDE de l'Essonne dans le cas de la Méranaise (Anonyme, 2007) – n'est pas sans valeur pour l'estimation hydrologique, et doivent être systématisées.

Des progrès sont également nécessaires dans la connaissance plus fondamentale des processus d'écoulement sur les versants, naturels ou en présence d'aménagements, qui peuvent se révéler d'une grande complexité.

L'aménagement des versants pour faire face au risque

L'aménagement des versants comporte deux voies d'intervention vis-à-vis du risque d'inondation, la **maîtrise des écoulements** pour diminuer l'aléa, et le **contrôle de l'occupation du sol** pour atteindre une moindre vulnérabilité.

Développée pour organiser ces actions au voisinage des rivières, la méthode « Inondabilité » (Gilard, 1998) cerne les outils et les démarches à mettre en œuvre. Dans le cas de précipitations intenses et de conséquences déconnectées de la rivière, une difficulté liée à l'incertitude sur la localisation de l'aléa vient s'ajouter. La performance de modélisations hydrauliques, envisageables sur la rivière, n'est plus disponible pour examiner des zones d'écoulement cachées au sein de territoires très étendus.

La **maîtrise des écoulements** est problématique dans de telles conditions.

Les discussions entre acteurs du terrain (collectivités, services de l'État, population) créent rapidement une tension entre d'un côté, le souhait d'une résolution à chaud des problèmes, caractérisé par la prise en compte de niveaux de protection excessivement élevés, et de l'autre, la recherche hors période de crise d'une gestion raisonnée et globale du risque. En réalité, celui-ci est partout

4. La méthode AIGA (adaptation d'information géographique pour l'alerte en crue) a été développée pour afficher en temps réel le risque pluviométrique et une anticipation du risque hydrologique. Lors d'un événement, le système produit des cartes d'alerte toutes les heures sur l'ensemble de la zone affectée (y compris pour les cours d'eau non jaugés). Cette méthode a été développée par Météo-France et l'unité de recherches Ouvrages hydrauliques et hydrologie du Cemagref d'Aix-en-Provence.

5. *Soil Conservation Service*.

présent, et les actions ne peuvent être décidées d'un coup sur l'ensemble du territoire.

Il paraît pertinent, vis-à-vis de ce type de risque, de formuler des règles générales d'aménagement qui contribueront à diminuer le niveau de risque, plutôt légères mais d'application systématique, de la même façon que des règles architecturales pourraient par exemple adapter l'habitat à la construction en zone inondable.

Si certaines de ces règles peuvent rétablir une certaine facilité d'infiltration en compensation des ruissellements accentués (dispositifs d'infiltration, revêtements poreux, superficies enherbées ou boisées), elles seront rapidement confrontées à des volumes d'eau importants à prendre en compte, et d'autres dispositions devront pour cela assurer un équilibre entre stockage temporaire et conduite des écoulements, surtout si, comme dans ces deux cas, coexistent des secteurs de plateaux et des secteurs de forte pente.

Le **stockage temporaire**, c'est-à-dire la contention de volumes d'eau jugés nuisibles, est souvent la solution spontanément envisagée par les populations touchées ou les acteurs de l'aménagement des bassins versants. Il apparaît à travers de multiples expériences, dont celles relatées ici, que le dépassement des limites de capacité n'est jamais

exclu, et que ce dépassement peut constituer un facteur aggravant si les précautions nécessaires ne sont pas prises. L'attention de l'aménageur devra donc toujours être maintenue sur ces précautions. Un examen des ouvrages du bassin versant de la Mérintaise montre que la volonté de contenir les eaux a probablement primé sur la modération du risque de débordement (Nédélec, 2007). On notera que l'équipement de télégestion des ouvrages, effectif sur le bassin de la Mérintaise, présente l'avantage de permettre le cas échéant de réduire le risque de débordement des ouvrages les plus sollicités en fonction de la localisation des pluies.

La conduite des écoulements : il n'est pas aberrant de chercher à maîtriser les écoulements intenses en les canalisant plutôt qu'en retenant les eaux. D'autant qu'un cheminement de l'eau domestiqué par le trajet emprunté et par la résistance des matériaux le supportant, posera moins le problème des dépôts à l'aval, problème à résoudre parfois à grands frais de déblaiement. Il faut pour cela maintenir l'équilibre des dispositifs envisagés avec des capacités de rétention en amont, en aval, voire sur le parcours même de l'eau.

Des exemples de règles d'aménagement sont portés dans le tableau 1. Associées à des désordres rencontrés sur le bassin versant de la Mérintaise.

▼ Tableau 1 – Exemple de règles d'aménagement combinant stockage temporaire et conduite des écoulements, susceptibles d'atténuer des désordres tels que rencontrés sur le bassin versant de la Mérintaise.

Exemple de désordre	Règle d'aménagement	Commentaire	Stockage temporaire	Conduite de l'écoulement
Habitations en zones de stockage naturel des eaux de ruissellement	Protection par endiguement amont	Solution retenue en urgence, le risque de surverse avec ses conséquences doivent être pris en compte en priorité	X	
	Création de fossés ou canaux secs au milieu de la zone habitée	Retenue seule, cette disposition peut aggraver le risque à l'aval, étude nécessaire		X
	Combinaison de fossés ou canaux secs et petites retenues temporaires	Présente l'avantage de mieux gérer les surverses des petits ouvrages de stockage, les canaux secs permettent aussi d'anticiper en maintenant plus longtemps hors d'eau les secteurs inondables	X	X
Route en forte pente au revêtement susceptible d'être dégradé	Revêtement systématiquement renforcé et forme de chaussée en V	Solution coûteuse si son emploi est systématique, mais l'application à certains axes très exposés est à étudier		X
	Renforcement des points singuliers (confluence d'écoulements, raccords aux regards, trottoirs...)	Solution moins coûteuse, les observations de ces deux cas montrent une vulnérabilité accrue de ces singularités en cas de fort courant		X
	Fossés de bord de route avec limiteurs de débit (photo 3)	Solution jouant sur les deux tableaux, lorsque la place est disponible, peu d'autres possibilités de stockage temporaire	X	X



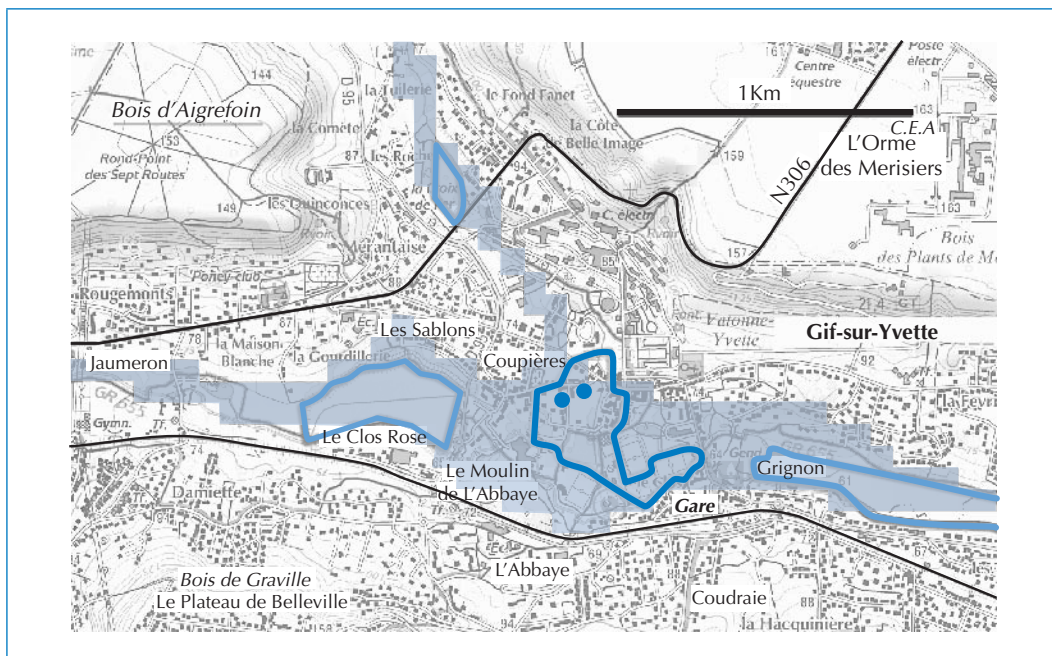
▲ Photo 3 – Fossé de bord de route avec limiteurs de débit.

taise le 29 avril 2007, ces règles restent toutefois des exemples et non des préconisations. D'autant qu'en théorie, elles concernent tout autant le bassin versant touché par les inondations que ses voisins, qui pourraient subir des événements analogues.

L'occupation du sol : partant du principe que lors de précipitations exceptionnellement intenses vis-à-vis de la capacité d'infiltration des sols (orage faisant suite à plusieurs semaines sans précipitations), le ruissellement sera essentiellement conditionné par la topographie, une étude des transferts sous forme d'accumulation de l'amont vers l'aval, grossière mais simple dans sa mise en œuvre, a été effectuée sur le bassin versant de la Méranaise. Pour cela un modèle numérique de terrain, en altitudes entières et au pas de 75 m a été utilisé. Le calcul des sens d'écoulement et l'accumulation de l'amont vers l'aval ont pu être effectués de manière performante au moyen du logiciel d'information géographique GRASS⁶. Ce logiciel libre comporte en effet des modules hydrologiques développés dans ce but. La carte d'accumulation obtenue est associée à une échelle de couleur virant du jaune (amont) au bleu (aval), adaptée à l'interprétation des zones de passage et d'étalement de l'eau. La carte peut être superposée à un fond IGN⁷ au 1/25 000^e. L'opération a été détaillée sur deux secteurs inon-

6. *Geographic Resources Analysis Support System.*

7. Institut géographique national.



◀ Figure 4 – Carte des accumulations et carte IGN au 1/25 000^e, secteur de Gif-sur-Yvette ; contour en bleu foncé : principale zone inondée le 29 avril 2007 (recensement DDE de l'Essonne), contours en bleu clair : bassins de stockage, cercles en bleu foncé : immeubles résidentiels construits en 2005 et 2007.

dés lors de l'orage du 29 avril 2007 : le centre de Gif-sur-Yvette, proche de la confluence, et un lotissement en bordure de plateau, distant de tout cours d'eau permanent.

Le caractère très étalé de la tâche bleue encadrant la confluence de la Mérantaise et de l'Yvette, montre sans pousser plus loin l'analyse de l'inondabilité que le risque est élevé dans des rues entières du centre de Gif-sur-Yvette. À l'opposé, trois retenues sèches de stockage en dérivation des cours d'eau (contours en bleu clair) ont été implantées avec pertinence en bordure de cette tâche. Ce cas de champ d'expansion de crue en bordure de rivière relève des analyses présentées dans les autres articles de ce numéro, mais avant de revenir au cas des inondations par ruissellement, nous noterons que la construction d'habitations en zone inondable est encore à ce jour difficilement maîtrisable, comme l'attestent des constructions d'immeubles résidentiels intervenues en 2005 et 2007 (cercles en bleu foncé sur la figure 4), alors même qu'au cours de ces deux années, des orages importants touchaient le secteur.

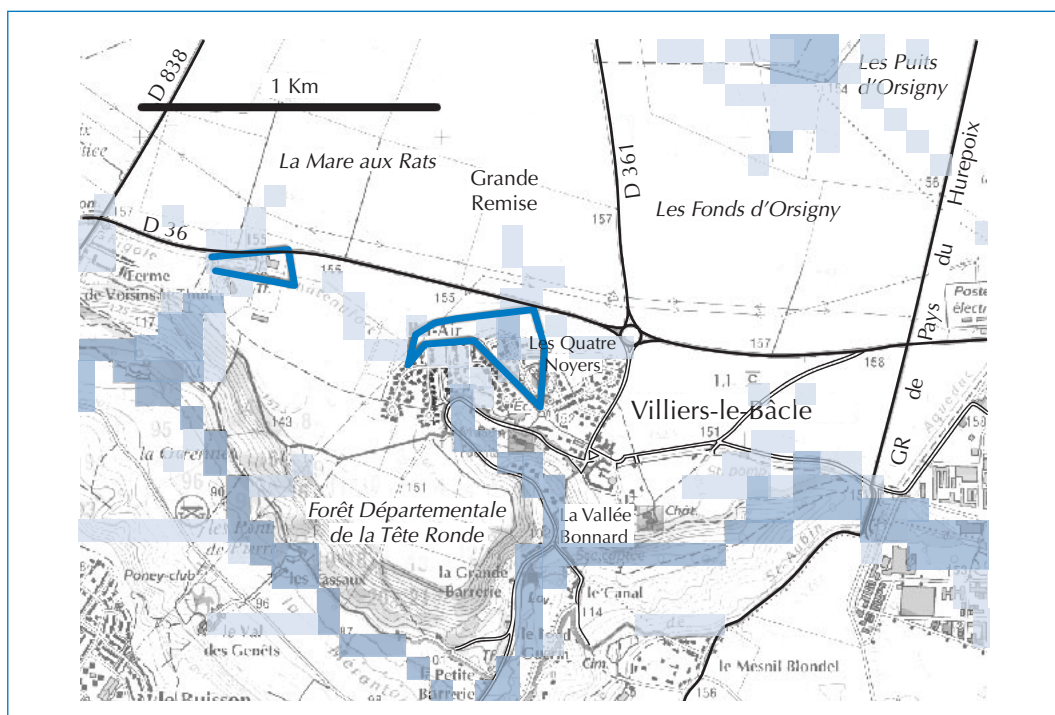
Le cas du lotissement inondé dans la commune de Villiers le Bâcle est différent : implanté en bordure de parcelles agricoles (photo 1), il est

éloigné de tout cours d'eau permanent. Il se trouve en revanche sur une zone dont la topographie induit un début de concentration des eaux de ruissellement (pixels en bleu clair). Outre la présence d'habitations sur ce passage d'écoulements concentrés, la rétention sur place de l'eau a été favorisée par un busage de la rigole dite « de Chateaufort », sujette à un fort écoulement lors de cet événement. Ce busage, accompagné d'un talutage, barre entièrement l'écoulement du ruissellement, et prolonge l'inondation des terres et habitations situées au nord de la rigole.

Cette analyse ne permet pas de déduire des éléments quantitatifs sur les risques encourus par ce lotissement, ni même de prévoir l'impossibilité de construire sur d'autres zones précises, mais elle permettrait dans un cadre plus général et détaché d'événements catastrophiques, par sa rapidité de mise en œuvre, d'identifier les secteurs où le passage de l'eau serait potentiellement problématique face à des précipitations intenses.

La figure 6 confirme d'une certaine manière la signification physique de l'approche de la figure 5. En effet, les passages de ruissellement sont identifiables assez nettement à partir d'une visite de terrain et du traitement du contraste d'une vue satellitaire postérieure au 29 avril 2007

► Figure 5 – Carte des accumulations et carte IGN au 1/25 000^e, secteur de Villiers le Bâcle ; contours en bleu : lotissement et zones d'activités inondés le 29 avril 2007 (recensement DDE de l'Essonne).



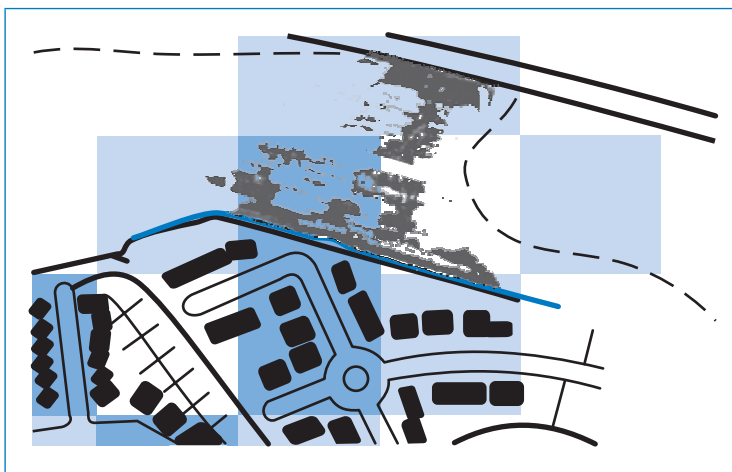
(cf. <http://www.panoramio.com/photo/14817551> et zoomer sur la vue Google Earth™). L'emplacement des pixels en bleu clair coïncide avec les traces du passage de l'eau. Le talus de la photo 1 mis en place face à ce ruissellement est également figuré.

Un développement plus poussé pourrait être imaginé à partir du modèle STREAM⁸, développé par l'INRA⁹ pour quantifier le risque d'érosion, et envisageable dans un cadre d'analyse systématique. Ce modèle repose sur le même principe d'accumulation, mais en étant complété par un raffinement des facteurs d'orientation de l'écoulement, et par un critère de risque limité au volume d'eau (Cerdan *et al.*, 2001). La dynamique de l'écoulement n'y est pas traitée, mais les travaux en cours sur la modélisation distribuée des transferts d'eau, qui serait applicable à l'échelle de ce type d'événement (Viallet *et al.*, 2006), laissent peu d'espoir d'utilisation systématique, par la masse de travail préparatoire à mettre en œuvre.

Conclusion

Dix années pratiquement jour pour jour séparent les deux inondations présentées, survenues dans des contextes très semblables. De multiples événements comparables se sont certainement déroulés entre temps, parfois bien analysés dans leur déroulement hydrologique et hydraulique, parfois appréhendés sur le seul plan des secours et des dégâts.

Quelles évolutions peut-on constater entre 1997 et aujourd'hui ? Celle de la connaissance des pluies, avec notamment le développement de cartes radar fiables vis-à-vis des cumuls et de la dynamique des précipitations, et la traduction en alertes diffusées par Météo France et les médias nationaux. Celle de la réglementation qui renforce la mise en œuvre de démarches systématiques de gestion du risque d'inondation par ruissellement (diagnostic, organisation de la gestion de crise, aménagement, schémas dépar-



▲ Figure 6 – Agrandissement à partir de la figure 5 du lotissement inondé et de la parcelle amont ; en bleu : talus érigé suite aux inondations ; en gris foncé : mise en évidence des traces de ruissellement par analyse du contraste sur vue satellitaire.

tements de prévention des risques naturels). Entre ces deux domaines aux évolutions positives, il existe une telle diversité des niveaux et qualités d'observation, que l'émergence de règles d'actions préventives reste timide. Les données de référence pour la modélisation des crues et le dimensionnement d'ouvrages de prévention sont en nombre insuffisant.

Les deux exemples présentés n'ont pas vocation à fournir un remède aux inondations hors du réseau hydrographique ; ils ont servi de support à l'exposé de questions en voie d'approfondissement, d'attitudes et d'outils simples pour l'appréhension du risque, et fourni quelques ordres de grandeur pour situer l'intensité des désordres.

Il reste aux unités de recherche, en partenariat avec les collectivités locales touchées ou en situation de risque, à identifier et alimenter un domaine de connaissances spécifique, en favorisant l'harmonisation des observations et de leur analyse, pour en dégager des règles techniques éprouvées. □

8. *Sealing and Transfer by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management.*

En français : imperméabilisation et transfert par le ruissellement et l'érosion en relation avec la gestion agricole.

9. Institut national de la recherche agronomique.

Résumé

Les inondations ont généralement pour origine la proximité d'une rivière. Toutefois des précipitations importantes peuvent occasionner la submersion, par le ruissellement, de territoires à l'écart de tout cours d'eau. Les conséquences peuvent être tout aussi graves, et l'enjeu est de taille. Pourtant les connaissances sur ce type d'inondations restent modestes, tant la variété et le caractère imprévisibles des événements sont grands. À travers deux exemples, cet article fait ressortir des éléments utiles à l'analyse du phénomène, la prise en compte dans les règles d'aménagement de l'espace, ainsi que des questions à approfondir à travers de nouveaux programmes de recherche.

Abstract

Floods are generally due to the vicinity of a river. Nevertheless, strong rainfall events and the subsequent surface runoff may submerge parts of land away from any watercourse. The results may reach the same disastrous level, and their prevention constitutes a major concern. However, little knowledge is available today on such floods, so great being the events' diversity and unpredictability. By mean of two case studies, this paper brings out some useful elements for the analysis of such processes, the accounting for them in land settlement, as well as questions which should be addressed by future research programs.

Bibliographie

AUGEARD, B., 2006, *Mécanismes de genèse du ruissellement sur sol drainé sensible à la battance : études expérimentales et modélisation*, PhD thesis, ENGREF, Paris, 234 p.

BOURQUI, M., 2008, *Impact de la variabilité spatiale des pluies sur les performances des modèles hydrologiques*, thèse de doctorat, ENGREF, AgroParisTech, Paris, 333 p.

GOOVAERTS, P., 2000, Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall, *Journal of Hydrology*, vol. 228, n° 1-2, p. 113-129.

RAMOS, M.-H. *et al.*, 2006, From point to areal rainfall : linking the different approaches for the frequency characterisation of rainfalls in urban areas, *Water Science and Technology*, vol. 54, n° 6-7, p. 33-40.

LEBLOIS, E., 2005, On the probabilistic link between falling rain and basin rain, *in : European Geosciences Union General Assembly*, European Geosciences Union, Vienne.

GILARD, O. *et al.*, 1997, *Crue du 16 juin 1997 à St Martin de Boscherville et Villers-Ecalles (76), rapport d'expertise hydraulique et hydrologique*, Cemagref, unité Hydrologie, hydraulique, 58 p.

PERRIN, C., 2000, *Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative*, INPG, Grenoble, 530 p.

GALEA, G. *et al.*, 1995, *Maîtrise du ruissellement et de l'érosion en vignoble de coteau – Guide à l'usage des aménageurs*, Cemagref Éditions, Antony, France, 126 p.

VIGNERON, S. *et al.*, 2006, *Les collectivités locales et le ruissellement pluvial*, ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement rural, Paris, 80 p.

LAVABRE, J. *et al.*, 2006, AIGA : a flood forecasting tool. Application to the French Mediterranean region, *Climate Variability and Change – Hydrological Impacts*, vol. 308, p. 214-219.

Anonyme, 2007, *Recensement des zones inondées suite à l'orage du 29 avril 2007 sur les communes de Villiers-le-Bâcle et Gif-sur-Yvette*, DDE de l'Essonne, Service Urbanisme, risques et actions juridiques, 30 p.

GILARD, O., 1998, *Les bases techniques de la méthode inondabilité*, Cemagref Éditions, 207 p.

NÉDÉLEC, Y., 2007, *Inondations et maîtrise des écoulements sur le bassin de la Mérantaise (91, 78) – Éléments d'analyse en vue de démarches sur le bassin versant*, Cemagref, unité Hydrosystèmes et bioprocédés, 34 p.

CERDAN, O. *et al.*, 2001, Incorporating soil surface crusting processes in an expert-based runoff model : Sealing and Transfer by Runoff and Erosion related to Agricultural Management, *Catena*, vol. 46, n° 2-3, p. 189-205.

VIALLET, P. *et al.*, 2006, Towards multi-scale integrated hydrological models using the LIQUID framework, *in : 7th International Conference on Hydroinformatics*, Nice.