

Enseignements de retours d'expériences de barrages à pertuis ouverts, de 1905 à nos jours

Christine Poulard ^a, Paul Royet ^b, Jerzy Ratowski ^c et Anna Lenar-Matyras ^c

Cet article se compose de cinq parties décrivant chacun un ensemble d'ouvrages, sélectionnés de manière à apporter des éclairages complémentaires sur la conception et le fonctionnement de barrages à pertuis ouverts.

Le principe du barrage à pertuis ouvert, appelé parfois « barrage sec » ou « retenue sèche », est simple : il s'agit de barrer un thalweg en laissant à l'eau un passage restreint pour limiter le débit en cas de crue (figure 1). Ce thalweg, chemin emprunté par les eaux de ruissellement, peut être une rivière, comme sur la figure 1 ou la photo 2, ou un thalweg sec comme sur les photos 9a et 9b. Le pertuis régule les flux supérieurs à sa capacité d'évacuation, et la retenue se remplit avec l'excédent de débit. Quand le niveau d'eau atteint le seuil de surface, ce dernier évacue les débits arrivants et permet d'assurer la sécurité de l'ouvrage.

Depuis les années 1960, de nombreux barrages à pertuis ouverts ont été construits en France ou sont en projet. Les réalisations se révèlent très diverses, selon le contexte ou même simplement en fonction de certains choix techniques.

Les cinq ensembles retenus pour illustrer cet article couvrent plusieurs périodes et plusieurs tailles de bassins ; le tableau 1 en résume les caractéristiques. D'autres exemples sont décrits par ailleurs, dans des fiches de retour d'expérience disponibles auprès du Cemagref (Poulard *et al.*, 2005).

Nous commençons par un ensemble de barrages centenaires en Pologne, étudiés à l'occasion d'un projet de recherche, et complétons avec de très grands barrages construits à la même époque aux États-Unis. En effet, nous n'avons pas connaissance de barrages français aussi anciens. Citons cependant le barrage dit « digue de Pinay », construit en 1711-1712 sur la Loire ; cet ouvrage était composé de deux ailes en maçonnerie de part et d'autre du lit mineur. Son pertuis était une tranchée, à ciel ouvert. Des estimations lui attribuent une réduction du pic de crue de 3 400 à 2 500 m³/s lors de la crue de 1866 (Graeff, *in* Cretin, 2005). Malheureusement, cet ouvrage a été détruit en 1984 lors de la construction du barrage de Villerest. Il est en quelque sorte le précurseur du projet de barrage du Veudre, non encore réalisé sur l'Allier, et du barrage de Mouzon¹, récemment achevé sur la Meuse.

Pour la France, ce sont des réalisations dans le Gard et la Seine-Maritime qui seront décrites et commentées, en approfondissant davantage les questions de dimensionnement et de fonctionnement.

À l'exception des barrages de la Miami River, les auteurs ont visité les ouvrages cités dans le tableau et ont échangé avec les maîtres d'ouvrages et leurs consultants. Les maîtres d'ouvrages sont d'ailleurs remerciés à la fin de cet article, car ces contacts ont permis d'approfondir l'analyse des dossiers et d'identifier les difficultés.

1. Cf. http://www.epama.fr/files_fr/epama_projets/mouzon/epama6_mouzon_pcp.php4

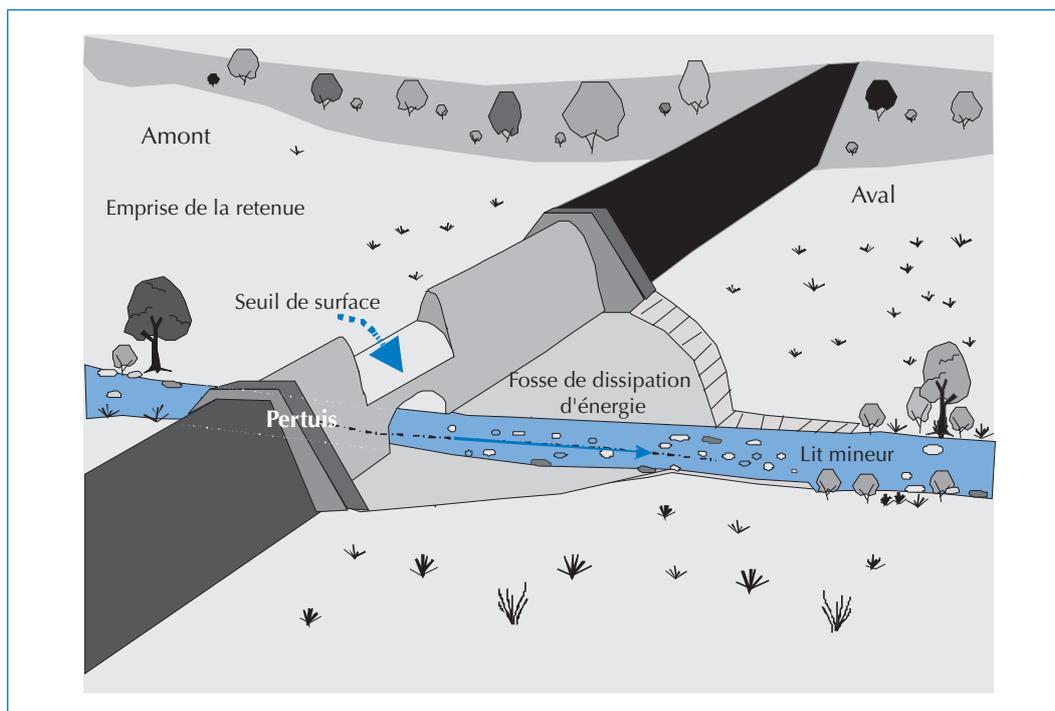
Les contacts

a. Cemagref, UR HHLY, Hydrologie-hydraulique, 3 bis quai Chauveau, CP 220, 69336 Lyon Cedex 09

b. Cemagref, UR OHAX, Ouvrages hydrauliques et hydrologie, 3275 route de Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

c. Institut d'hydraulique et de gestion de l'eau, Université Polytechnique de Cracovie, ul. Warszawska 24, 31-155 Cracovie, Pologne

► Figure 1 – Principe du barrage à pertuis ouvert (avec déversoir de crue central).



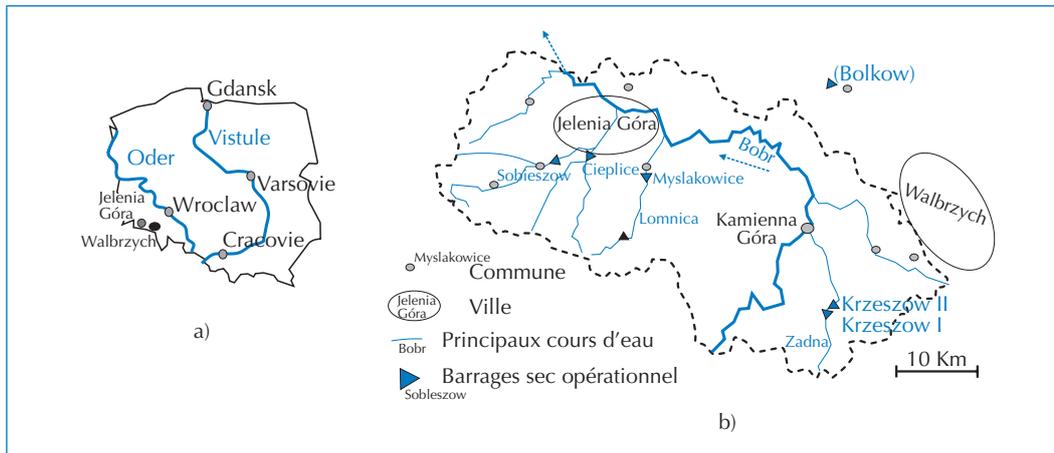
► Tableau 1 – Résumé des caractéristiques des cinq ensembles de barrages à pertuis ouverts.

Bassin	Année de construction	Nombre de barrages	Surface de bassin versant interceptée (km ²)	Hauteur de barrage (m)	Capacité de stockage avant surverse (millions de m ³ ou hm ³)
Haut-bassin de l'Oder, Sudètes (Pologne)	1905 à 1929	6 + 5	18 à 120	3 à 20	0,5 à 16,74
Miami River (États-Unis)	1918 à 1922	5	660 à 2850	19,8 à 33,50	86,4 à 385
Département du Gard	1968 à 1982	5	44 à 113	15 à 58	4,7 à 16,2
Ville de Nîmes	1991 à 2007	20	2,5 à 6,5	2,5 à 7,5	0,01 à 0,4
Seine-Maritime	Pour les dossiers consultés :	Dossiers consultés :	Très variable	Inférieure à 5 m	< 0,04
• Austreberthe	1999 à 2004	11			< 0,03
• Lézarde	1978 à 2003	40			
		+ 32 prévus			

Barrages du début du XX^e siècle en Pologne : une grande diversité de solutions techniques

Le premier exemple présenté est composé d'une dizaine d'ouvrages en Basse-Silésie (Pologne), construits dans le massif des Sudètes entre 1905

et 1929 sur des sous-affluents de l'Oder (figure 2, tableau 2). Sur les douze barrages à pertuis ouverts réalisés alors, onze sont toujours opérationnels. Ce paragraphe traite essentiellement des cinq ouvrages protégeant la ville de Jelenia Góra, visités par les auteurs en 2005, en compagnie de leur gestionnaire.



◀ Figure 2 – Localisation des barrages visités dans la vallée du Haut-Oder : a) localisation de Jelenia Góra et Wałbrzych en Pologne ; b) localisation des barrages de l'Inspectorat du RZGW de Jelenia Góra (bassin versant du Bóbr à Jelenia Góra : 1 050 km²).

Historique

Suite à une importante inondation en 1897, des travaux d'aménagement ont été décidés dans les Sudètes, alors rattachées à la Prusse. Le projet comprenait la construction de pièges à sédiments et de cascades de seuils, de réservoirs (multifonctionnels et de stockage) et enfin de barrages secs. Les travaux ont commencé en 1901. Le tableau 2 résume les caractéristiques des ouvrages protégeant les villes de Wałbrzych et Jelenia Góra.

La crue de juillet 1997 a durement touché le bassin de l'Oder et en particulier la ville de Wrocław. Les régions de Jelenia Góra et Wałbrzych ont égale-

ment connu de fortes pluies, mais les barrages ont très bien rempli leur rôle et les inondations ont été limitées. Par exemple, le barrage de Sobieszów a limité le débit sortant à 60 m³/s, pour un débit entrant maximum égal à 200 m³/s.

Caractéristiques principales des barrages

Ces barrages secs sont particulièrement intéressants à étudier en raison de leur ancienneté et de leur diversité. Ils sont en excellent état ; ceux qui en avaient besoin ont été restaurés récemment.

Les volumes de stockage varient de 0,5 à 16,74 hm³ (tableau 2) ; le total cumulé est de

2. Référence : « Województwo Dolnośląskie – Studium zagospodarowania przestrzennego pasma Odry – Bariery i zagrożenia », Wojewódzkie Biuro Urbanistyczne we Wrocławiu.

▼ Tableau 2 – Résumé des caractéristiques des barrages de Silésie², protégeant Wałbrzych (groupe W) et Jelenia Góra (groupe JG).

Groupe	Nom (* sites visités)	Année de construction	Bassin versant (km ²)	Hauteur du barrage (m)	Emprise de la retenue		Pertuis
					Surface maximum (ha)	Volume maximum (hm ³)	Débit maximum aval (m ³ /s)
W	Międzygórze	1905-09	25,0	29,20	6	0,83	10,0
W	Stronie Śląskie	1906-08	51,5	16,58	24,5	1,38	37,1
W	* Bolków	1908-12	19,0	13,6	23,1	0,87	4,0
W	Kaczorów	1929	18,0	15,1	20,8	1,08	6,0
JG	* Krzeszów I	1905-06	43,0	3,39	29,1	0,61	-
JG	* Krzeszów II	1905-06		4,8	30,0	0,52	20,0
JG	* Cieplice	1906-09	69,0				
JG	* Sobieszów	1906-09	118,6	11,0	200,0	6,74	60,0
JG	* Mysłakowice	1910-13	49,6	9,8	101,0	3,56	50,0
W	Mirsk	1908-10	62,6	12,3	99,6	3,92	32,0
W	Świerzawa	1907-11	37,0	19,3	30,6	1,90	12,0
	Jamołtówek	1907					9,5

26 hm³. Les hauteurs des barrages sont généralement comprises entre 3 et 20 m. Les barrages sont situés pour la plupart dans des vallées larges. Certains, cependant, sont construits dans des vallées étroites et encaissées, comme à Międzygórze.

Les six barrages visités sont bien représentatifs au regard du volume de stockage, avec des ouvrages parmi les plus petits (Krzeszów I, hauteur de barrage 3,30 m et volume de stockage de 0,61 hm³) et les plus grands (Sobieszów, barrage de 11 m de haut avec un volume de stockage de 6,74 hm³). En revanche, aucun ne fait partie des quatre ouvrages de plus de 15 m de haut. Le barrage de Międzygórze est sans doute le plus impressionnant, avec une hauteur de presque 30 m, mais il est construit dans une vallée étroite et ne peut stocker que 0,83 hm³.

Gestion des barrages et des emprises

Ces barrages sont gérés par l'Office régional pour la gestion de l'eau (le « RZGW ») du bassin de l'Oder. L'inspecteur de Jelenia Góra s'étend sur un millier de km² et gère cinq barrages secs (figure 2). Le RZGW a mis au point des règles de gestion des ouvertures de vannes en fonction des niveaux d'eau. Le RZGW peut également gérer les crues à l'échelle du bassin en régulant le débit de canaux reliant certains cours d'eau amont. L'interconnexion concerne aussi une retenue d'eau potable, le barrage de Sosnowka, qui peut stocker de l'eau durant les crues. Le maître d'ouvrage est satisfait de ce fonctionnement, rendu possible par

l'existence d'une équipe technique compétente et rapidement mobilisable.

Description et analyse de quelques barrages

Les barrages visités sont tous de hauteur inférieure à 15 m, avec des emprises de retenues de 20 à 200 ha. Aucun n'est situé dans les têtes de bassin montagneuses, mais dans un contexte de collines ou même de plaine (figure 1). Nous allons commenter quelques caractéristiques, en pointant les différences et les points communs.

EMPLACEMENT ET NATURE DES EMPRISES

Au début du XX^e siècle, il était sans doute plus facile de trouver et réserver des surfaces pour la construction de barrages. En particulier, la ville de Jelenia Góra s'est étendue depuis jusqu'à la limite des emprises de Cieplice et Sobieszów : sans les barrages, ces terres auraient été englobées dans le tissu urbain ou seraient en passe de l'être. L'espace réservé pour les emprises est plus souvent maintenu à l'état naturel, avec une intéressante mosaïque d'habitats (photo 1). Pour le barrage de Sobieszów, cet espace vert se prolonge d'ailleurs en aval par un parc municipal. D'autres emprises, situées en zone agricole, sont mises en valeur de manière extensive (prairies de fauche pour Bolków).

CORPS DE BARRAGE

Tous les barrages visités sont des barrages en terre, avec éventuellement une partie centrale en béton recouvert de maçonnerie.

C'est le cas du barrage de Sobieszów (photo 2) ; la partie en béton porte les organes hydrauliques (pertuis et déversoirs). Toute la largeur de la partie maçonnée est un seuil de surface.

Dans d'autres cas, seuls les organes hydrauliques sont en béton ; les déversoirs sont alors latéraux. C'est le cas du barrage de Krzeszów, avec un seuil de déversoir qui se prolonge sur une quinzaine de mètres vers l'amont, parallèlement au cours d'eau (photo 3).

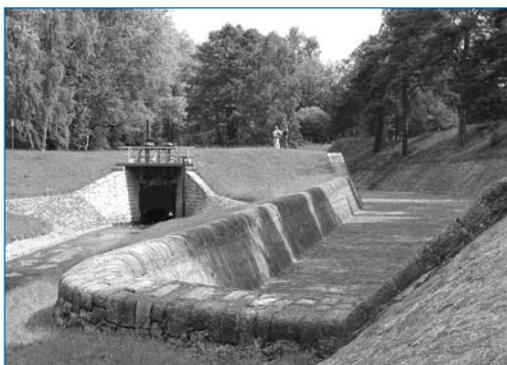
Les barrages de Cieplice, Sobieszów et Mysłakowice sont construits en terrain plat et ne peuvent s'appuyer sur des versants. Ils sont donc prolongés par des ailes en remblai, pour délimiter une cuvette en forme de U. Le barrage le plus long est Sobieszów, avec plus de trois kilomètres. De ce fait, certains barrages recoupent aussi des affluents et comportent des pertuis secondaires.

▼ Photo 1 – Emprise de la cuvette de Cieplice (200 ha) vue depuis la digue de la rivière Wrzosówka ; au premier plan à droite : photo prise au même endroit pendant un épisode d'inondation en 1997.





▲ Photo 2 – Parement aval de la retenue de Sobieszów, partie centrale maçonnée avec fosse de dissipation.



▲ Photo 3 – Parement amont du barrage de Krzeszów I, pertuis et entrée du déversoir à entonnement latéral.

En crue, l'aval est soumis à des flux très érosifs : ceux des écoulements qui sortent du pertuis en charge, à cause de leur vitesse, et ceux du déversoir, qui possèdent beaucoup d'énergie. Le fond du lit et les berges à l'aval du pertuis sont donc maçonnés, en général sur une longueur de plusieurs dizaines de mètres (voir par exemple la photo 2). Le barrage de Mysłakowice, rénové récemment, comporte en outre des blocs brise-jets placés sur le trajet de l'écoulement. La crête déversante est en effet plus large que le lit mineur du cours d'eau, et la convergence assez brusque en sortie de barrage justifie l'ajout de ce dispositif.

PERTUIS

Les pertuis apparaissent légèrement moins larges que le lit mineur naturel. Ils n'étaient pas munis de vannes à leur construction, mais ils ont quasiment tous été équipés de vannes manuelles depuis.

Le barrage de Sobieszów a la particularité de compter deux pertuis, l'un au-dessus de l'autre (photo 2). Ce dispositif détermine un fonctionnement en deux phases en cas de crue : le petit pertuis dans le prolongement du lit mineur commence à écrêter relativement tôt, mais si la crue se prolonge et que l'eau atteint le deuxième pertuis, alors on augmente le débit sortant, ce qui



a)



b)

◀ Photo 4 – Deux exemples de configurations de pertuis sur les retenues sèches des Sudètes : a) Sobieszów, parement amont en béton avec deux pertuis superposés, grilles de protection anti-flottants ; b) Bolków amont, entrée des pertuis avec vannes et grille anti-flottants.

diminue le rythme de montée de l'eau et retarde le moment d'un éventuel déversement.

Les grilles de protection contre les flottants sont également diverses (photo 4). À Sobieszów (photo 4a), deux grilles successives sont espacées d'une dizaine de mètres. La grille la plus proche du pertuis est incurvée et son extrémité supérieure scellée dans le barrage pour empêcher l'arrivée de corps flottants par le haut, à la décrue par exemple. À Bolków (photo 4b), il y a une seule grille verticale basse très proche du pertuis. À Stronie Slaskie, la grille est inclinée. D'autres pertuis en sont dépourvus, comme Krzeszów (photo 3).

La plupart de ces grilles métalliques ont des entre-axes importants, et bloquent efficacement les éléments de grande taille, comme les branches. En revanche, des touffes de hautes herbes ont causé à plusieurs reprises des colmatages totaux ou partiels des petits pertuis, notamment à Bolków (photo 4b).

Intégration des ouvrages

PERCEPTION DES OUVRAGES

L'esthétique des barrages eux-mêmes est un critère subjectif. Ils sont maintenant implantés depuis plus d'un siècle, et leur efficacité à laminar les crues facilite très certainement leur acceptation. En outre, les remblais en terre sont enherbés, ce qui adoucit leur impact dans le paysage. Parmi les barrages visités, ceux de Sobieszów et Cieplice sont les plus imposants, et cependant ils étaient très fréquentés pendant notre visite en juin 2005. Ils sont situés dans des zones vertes, facilement accessibles depuis Jelenia Góra. Les promeneurs et baigneurs préfèrent d'ailleurs l'aval des barrages, avec leurs surfaces maçonnées et régulières.

ÉLÉMENTS D'APPRÉCIATION DES IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX

Il est peu probable que des contraintes environnementales aient été explicitement posées au moment de la construction des barrages de Silésie, et pourtant les perturbations sur le milieu sont relativement limitées, même selon nos critères actuels. Cet exemple est en outre intéressant par sa diversité : chaque barrage est unique, ce qui permet de comparer plusieurs solutions techniques utilisées.

Le lit mineur est artificialisé à l'amont du barrage, sur une longueur heureusement limitée, puis se poursuit au droit du barrage par un pertuis. À l'exception de Bolków, les pertuis ont en général

des sections proches de celle du lit mineur naturel et ne posent pas trop de problème de franchissabilité. Ils sont bien situés dans le prolongement du lit naturel. Quand ils sont portés par une partie en béton, les pertuis sont plus courts et ne posent quasiment aucun problème.

Rappelons que les emprises des retenues en lit majeur constituent des zones naturelles intéressantes, offrant des biotopes diversifiés, prairies, bosquets et forêts (photo 1).

Bilan

Les barrages des Sudètes existent désormais depuis un siècle, et font partie du paysage – voire du patrimoine. Ils sont bien entretenus et remplissent toujours parfaitement leur rôle. Leur construction a été motivée par une crue exceptionnelle, et faisait partie d'un programme plus large. Il a été possible, à l'époque, de trouver les surfaces nécessaires, y compris dans les parties plates des vallées, et la capacité de stockage ainsi définie permet d'assurer un laminage important.

Même si le principe de base est le même, chaque barrage est de conception originale. Cette diversité permet de comparer les solutions techniques utilisées, au niveau du comportement hydrologique ou encore de la protection des pertuis, mais aussi pour les effets sur l'environnement.

En particulier, cet exemple sert de base à une étude en cours, qui confronte les règles de bon fonctionnement des milieux aux contraintes de génie civil et d'efficacité hydrologique. L'objectif est de développer une approche facilitant le dialogue multidisciplinaire, afin de réaliser des ouvrages perturbant le moins possible le statut écologique.

Barrages à pertuis ouverts du bassin de la Miami River (États-Unis) : une capacité de stockage cumulée de 1 000 hm³

Pour compléter cet aperçu de l'état de l'art au début du XX^e siècle, nous citons également cinq grands barrages construits entre 1918 et 1922 sur la Miami River et ses affluents (Ohio, États-Unis). Ils ont été réalisés dans le cadre d'un programme de travaux décidé suite à une inondation catastrophique survenue en 1913. Toujours opérationnels, ils sont gérés par le *Miami Conservancy District*, (MCD). Les informations reprises ci-dessous sont tirées de dossiers publiés en ligne sur les sites du

▼ Tableau 3 – Principales caractéristiques des barrages de la Miami River (d'après le site internet du MCD).

Nom du barrage	Germantown	Englewood	Lockingtown	Taylorville	Huffman
Cours d'eau	Twin Creek	Stillwater River	Loramie Creek	Great Miami River	Mad River
Surface du bassin versant (km ²)	700	1 685	660	2 840	1 700
Type de barrage	Terre	Terre	Terre	Terre + déversoir central béton	Terre + déversoir central béton
Hauteur sur t. n. (m)	30,5	33,7	21	20,4	19,8
Cote du déversoir (m)	249	267	256	250	255
Surface à cette cote (km ²)	14,2	32,1	16,3	44,5	37,1
Capacité de stockage avant déversement (hm ³)	131	385	86,4	230	206
Cote de la crête (m)	253,2	272,2	291,0	255,3	259,9
Temps de vidange après une crue de protection OPF (j)	8	28	7	5	5

MCD³ et de la bibliothèque de la ville de Dayton⁴, ainsi que d'une communication de J. David Rogers du *Natural Hazards Mitigation Institute*⁵ (*University of Missouri-Rolla*).

Les capacités de stockage vont de 86 à 385 hm³. Remplies jusqu'au niveau des déversoirs, les cinq retenues s'étendraient sur une surface totale de 144 km² en stockant plus d'un milliard de m³.

Programme de travaux et objectifs fixés

Des conditions pluviométriques exceptionnelles ont provoqué en 1913 des inondations de grande ampleur dans plusieurs États, principalement l'Ohio et l'Indiana. Le cumul de précipitations sur quatre jours est estimé entre 203 et 300 mm sur le bassin de la Great Miami River, autour de la ville de Dayton, en Ohio. Cette ville est construite dans le lit majeur de la Miami River, juste à l'aval d'une confluence avec deux affluents majeurs ; la surface de bassin drainé y est de 6 500 km².

Élus et citoyens se sont fortement mobilisés. La commune de Dayton, consciente que la bonne échelle de travail n'était pas celle d'une seule ville, a fédéré les communes voisines dans une association régionale, la *Miami Valley Flood Prevention Association*. Le *Miami Conservancy District* a ensuite été créé pour coordonner les études et les travaux.

Les études ont été confiées à l'ingénieur Arthur Morgan, avec la consigne suivante : « La vallée a subi une catastrophe qui ne doit plus se produire ; trouvez une solution ». Morgan a mis sur pied

une équipe d'une cinquantaine d'ingénieurs pour reconstituer les événements de 1913, étudier le bassin et analyser sans *a priori* les solutions possibles. Il a écarté la reconstruction systématique de protections locales, la rupture soudaine des digues existantes ayant en fait considérablement aggravé les dégâts en 1913. Au final, il a retenu un aménagement comprenant notamment cinq grands barrages à pertuis ouverts, la construction de digues là où elles demeurent indispensables, et l'élargissement du lit mineur – avec destruction de bâtiments installés dans la plaine alluviale et gênant les écoulements en crue.

La détermination de la crue de projet de protection était une question clef. La pratique habituelle était alors de se protéger contre la dernière grande crue connue. Morgan et ses collaborateurs ont étudié plusieurs chroniques de débit européennes longues de plusieurs siècles. Ils en ont déduit qu'une crue de période de retour millénaire était de l'ordre de 20-25 % supérieure à une crue centennale. Au final, la crue de projet de protection définie (*Official Plan Flood, OPF*) est supérieure de 40 % à la crue de mars 1913. Il n'est pas donné d'estimation de la période de retour de la crue de 1913, mais elle est sans doute très élevée. En effet, cet événement est né de précipitations exceptionnelles arrivant sur des sols en cours de dégel, et encore recouverts de neige par endroits. La crue maximale possible (*Probable Maximum Flood*), définie conformément aux pratiques anglo-saxonnes, est néanmoins supérieure à cette OPF. Les études ont duré cinq années, et les travaux eux-mêmes cinq autres années.

3. Cf. www.miamiconservancy.org/flood/dams.asp (consulté en juin 2008).

4. Cf. <http://home.dayton.lib.oh.us/Archives/Flood1913/FloodHistorSketch.html> (consulté en juin 2008).

5. Cf. <http://web.mst.edu/~rogersda/umrcourses/ge301/Dayton%20Flood-Updated.pdf> (consulté en juin 2008).

Caractéristiques principales des barrages

Les barrages sont construits selon le même principe que les barrages de Silésie, mais avec des dimensions plus imposantes (tableau 3).

Le concepteur a préféré des barrages à pertuis ouverts plutôt que des ouvrages multi-usages avec une retenue d'eau permanente, pour être certain du mode de fonctionnement – y compris à long terme. Aucune contrainte environnementale n'est formulée dans les documents consultés.

Trois barrages sur cinq sont constitués d'une seule partie, un remblai en terre, avec un évacuateur de crue latéral en béton. Les deux autres se composent comme Sobieszów d'une partie centrale en béton portant les pertuis et au-dessus de ceux-ci le déversoir, avec un prolongement de part et d'autre par des remblais en terre s'avancant dans le lit majeur.

La longueur du corps de barrage varie de 500 m à près de 2 km ; les barrages sont traversés par deux à quatre conduits parallèles en béton. La taille des conduits est déterminée en fonction de la capacité d'évacuation du cours d'eau avant débordement. Aucun des pertuis n'est vanné, la gestion des crues est donc passive.

Les hauteurs de barrage sont comprises entre 19,8 et 33,7 m. Le plus petit des cinq, Lockington, a une capacité de stockage avant surverse de 86,4 hm³ et draine un bassin de 660 km². Le plus haut est Engelwood, avec un barrage de 33,7 m ; il est aussi le plus grand, avec une capacité de stockage avant surverse de 385 hm³. Sa vidange après une crue de projet de protection OPF prend vingt-huit jours. Pour les autres, cinq à huit jours sont nécessaires.

Gestion des barrages et des emprises

Le *Miami Conservancy District* assure la gestion et l'entretien des cinq barrages secs. L'entretien est une tâche importante, même s'il n'y a pas de pièces mobiles ; l'état des revêtements en béton, notamment dans les pertuis, doit être contrôlé.

Des servitudes autorisent le MCD à inonder les emprises pendant les crues, à en réglementer le développement, et à accéder à l'ensemble du terrain. Le MCD délivre des permis d'exploitation pour divers usages comme l'agriculture, l'extraction de granulats, le pompage. Rappelons que la surface cumulée des cinq emprises atteint 144 km². Un village, Osborn, se trouvait dans l'emprise du barrage de Huffman ; ses habitants ont été déplacés.

Éléments d'économie

Le site du MCD estime les dégâts dus à la grande crue de 1913 à deux milliards de dollars actuels, en particulier dans la ville de Dayton. L'activité économique y aurait mis près de dix ans à se rétablir. En outre, environ quatre cent personnes ont perdu la vie dans l'Ohio.

La réalisation des barrages coûterait actuellement de l'ordre du milliard de dollars. Un projet de rénovation de vingt-quatre millions de dollars est en cours, sur la période 1999-2010.

Le système de protection a fonctionné plus d'un millier de fois depuis sa création, avec au maximum un taux de 60 % de remplissage des retenues. Des inondations majeures ont été évitées en 1937, puis en 1959, 1982 et 1991, parfois avec des conditions comparables à celles de 1913. Les frais d'entretien sont couverts par une taxe collectée sur les propriétés protégées, calculée en fonction de leur valeur et de la protection reçue.

Bilan

L'exemple des barrages de la Miami River a été présenté ici parce que de nombreuses informations sont disponibles et diffusées, et que la démarche novatrice suivie a grandement contribué à faire évoluer les pratiques depuis. L'idée des barrages n'était pas privilégiée au départ, mais cette solution a émergé de la comparaison raisonnée de plusieurs possibilités ; elle s'est révélée adaptée aux conditions et à la topographie locale. La spécificité de cet exemple réside dans la taille des ouvrages. Parfois, le principe de la gestion des inondations par rétention en amont est présenté comme nécessairement lié à des ouvrages de taille modeste, en supposant sans doute que les grands ouvrages sont contraires au respect de l'environnement. Il nous semble que la discussion mériterait d'être approfondie et argumentée. Plusieurs petits ouvrages sont-ils moins néfastes qu'un ouvrage important, bien conçu, et construit sur un seul site ?

Les barrages du département du Gard : influence du volume des crues dans l'efficacité des ouvrages

La façade sud-est du Massif Central connaît périodiquement des crues très violentes, surtout en automne. Après celles d'octobre 1958, le département du Gard s'est lancé dans la construction

▼ Tableau 4 – Principales caractéristiques des barrages écrêteurs de crues du Gard.

Nom du barrage	La Rouvière	Ceyrac	Conqueyrac	Sainte-Cécile	Sénéchas
Cours d'eau	Crieulon	Rieumassel	Vidourle	Gardon d'Alès	Cèze
Surface du BV	94 km ²	44 km ²	83 km ²	109 km ²	113 km ²
Type de barrage	Poids béton	Poids béton	Mixte	Remblai à masque	Voûte
Année de mise en service	1970	1968	1982	1967	1977
Hauteur sur t. n.	18 m	16 m	17 m	41 m	58 m
Volume retenue permanente	0,6 hm ³	0 hm ³ ^(x)	0,15 hm ³	1,65 hm ³ ^(y)	3 hm ³
Cote batardeau	77,00	148,40	115,00	242,00	243,80
Cote du déversoir	85,00	156,40	125,00	261,20	266,20
Surface à cette cote	215 ha	163 ha	275 ha	96 ha	75 ha
Capacité écrêtement	8,3 hm ³	4,5 hm ³	9,1 hm ³	9,9 hm ³	9,6 hm ³
Cote de la crête	87,00	157,90	126,50	267,5	271,5

^(x) Au barrage de Ceyrac, le batardeau ne crée pas de retenue permanente, car la cuvette est karstique.

^(y) Quarante ans après la mise en service, la moitié de cette capacité est envasée.

de cinq grands barrages écrêteurs de crues, édifiés entre 1967 et 1982 et dont les principales caractéristiques sont rassemblées dans le tableau 4.

Conception hydraulique

Sur le plan hydraulique, et à quelques variantes près, tous ces barrages fonctionnent sur le même principe :

- une retenue permanente en fond de cuvette est créée soit par la présence d'un batardeau, soit par une entrée surélevée des pertuis ; à Sainte-Cécile et Sénéchas, cette retenue est utilisée en été pour le soutien d'étiage ;

- à l'abri de ce batardeau et de grilles qui les protègent contre l'obstruction par les flottants⁶ (photo 5), deux pertuis de grandes dimensions (section totale de 6,3 à 18 m² selon les barrages) traversent le barrage à sa base ; ce n'est qu'au barrage de Sénéchas que les pertuis sont équipés de vannes, mais dans le seul but d'augmenter le stockage pour le soutien d'étiage estival, sachant que les vannes sont ouvertes pour toute la saison des crues d'automne et d'hiver ;

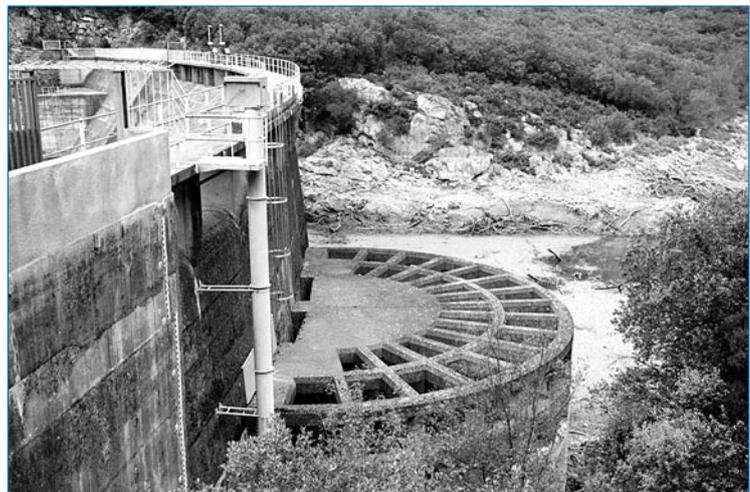
- pour les crues moyennes, la mise en charge des pertuis provoque le remplissage de la retenue, tout en limitant fortement le débit rejeté en aval à des valeurs allant de 80 à 300 m³/s selon les barrages ;

- pour les crues exceptionnelles, et une fois la retenue pleine, un seuil de surface permet le déversement du débit entrant excédentaire.

On note quelques différences concernant le seuil de surface. Pour deux des barrages, il s'agit d'un seuil totalement libre de grande longueur : 156,4 m à Ceyrac et 335,8 m à Conqueyrac. Pour deux autres barrages, le seuil libre est surmonté d'une passerelle qui le scinde en passes de plus ou moins grandes dimensions : dix-neuf passes de 4 m de largeur et 2 m de tirant d'air à la Rouvière et six passes de 12 m de largeur et 5 m de tirant d'air à Sénéchas. Le barrage de Sainte-Cécile se distingue par son évacuateur de surface constitué d'une tulipe dont le seuil circulaire a 45,5 m de

6. Certains barrages disposent également d'une protection contre les flottants par une drome disposée en travers de la retenue.

▼ Photo 5 – Barrage de la Rouvière : batardeau créant la retenue permanente et grille en béton de protection contre les flottants (photo prise à l'occasion de l'inspection décennale 2004, avec vidange de la retenue permanente).



longueur développée ; le seuil donne dans un puits puis dans une galerie de 40 m² de section passant sous le remblai d'enrochements.

Dimensionnement hydrologique

Les études hydrologiques d'origine de ces barrages ont été réalisées en 1959 par M. Ouvrard, juste après les crues dévastatrices du 30 septembre et du 4 octobre 1958. La méthode statistique (ajustement sur une loi exponentielle) était utilisée pour l'étude des pluies. Les seules données pluviométriques de longue durée (cinquante ans ou plus) disponibles à l'époque concernaient seulement quelques stations. À partir de ces données ont été établies des lois exponentielles liant intensité, durée et fréquence. Le tableau 5 indique les caractéristiques du hétérogramme fictif de l'événement de période de retour 1 000 ans.

▼ Tableau 5 – Caractéristiques du hétérogramme fictif de période de retour 1 000 ans adopté pour l'étude hydrologique d'origine des barrages du Gard.

Durée	Hauteur cumulée
1 h	120 à 156 mm
12 h	276 à 300 mm
24 h	320 à 420 mm

La détermination des débits ruisselés a été faite selon la méthode de l'hydrogramme unitaire avec une durée de crue relativement courte : temps de montée de deux à trois heures et durée de décrue de six à douze heures, selon la taille des bassins versants.

Le dimensionnement des barrages répondait aux principes suivants :

- volume de la retenue permanente déterminé en fonction des besoins pour le soutien d'étiage, ce qui définit la cote d'alimentation des pertuis ;
- la crue de période de retour 1 000 ans, arrivant sur une retenue à la cote du plan d'eau permanent, devait être contenue dans le réservoir, sans déversement sur le seuil de surface ; cette période de retour n'était que de 100 ans pour le barrage de Sénéchas ;
- la crue de période de retour 5 000 ans, arrivant sur une retenue déjà pleine au niveau du déversoir devait être évacuée sous une cote maximale qui laisse une revanche variable par rapport à la crête (revanche de 0 à 0,6 m pour les barrages

en béton et de 0,7 à 1,0 m pour les barrages en remblai).

Les crues subies par ces barrages

Jusqu'en 2001, ces cinq barrages n'ont connu que deux événements notables :

- le 22 octobre 1977, c'est-à-dire l'année de sa mise en service, le barrage de Sénéchas s'est rempli jusqu'à la cote 266,23 soit 3 cm au-dessus du seuil de surface ;
- le 7 octobre 2001, le barrage de la Rouvière s'est presque totalement rempli, la cote maximale de la retenue ayant atteint 0,19 m sous le seuil de surface. Cet événement est passé relativement inaperçu car le barrage a très bien joué son rôle en réduisant le débit naturel de la crue de 800 m³/s en entrée à 150 m³/s en sortie. Cette crue a apporté énormément de bois flottés, arrêtés par la drome, qui cette année-là a tenu.

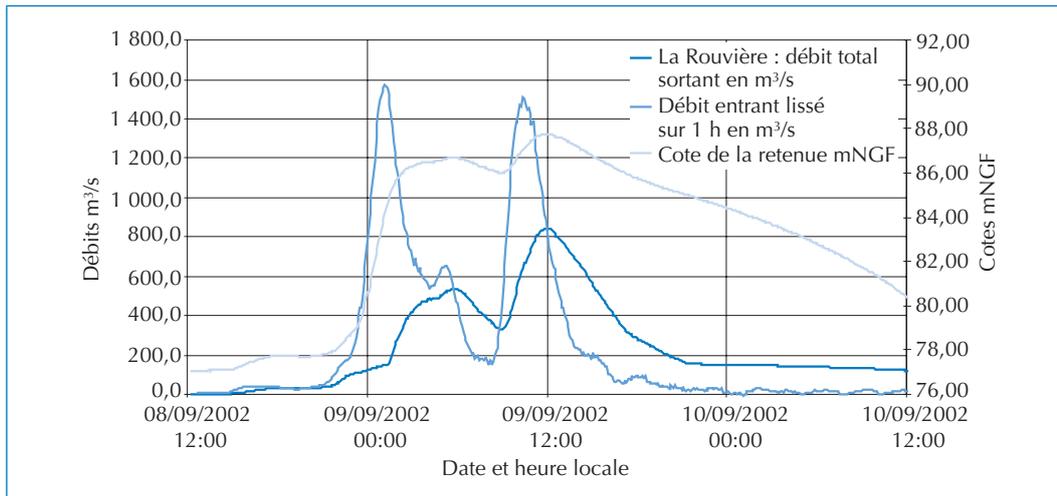
Mais l'événement le plus marquant est celui des 8 et 9 septembre 2002, qui a touché l'ensemble du département du Gard et une partie des départements limitrophes. Les cinq barrages écrêteurs de crue du département ont connu des crues très variables, faibles pour certains, exceptionnelles pour d'autres. Ainsi les barrages de Sénéchas et Sainte-Cécile n'ont pas atteint, et de loin, leur cote de déversoir de surface :

- à Sénéchas, cote maximum de 239,98⁷ pour une cote du déversoir de surface de 266,20 ; en aval, la Cèze a cependant connu une crue historique ;
- à Sainte-Cécile, cote maximum de 245,75 pour une cote du déversoir de surface de 261,20 ; en aval, dès Alès, le Gardon puis le Gard ont connu une crue historique.

Les trois barrages écrêteurs situés sur le haut bassin versant du Vidourle et de ses affluents ont, quant à eux, connu leurs plus hauts niveaux depuis leur mise en service et ont tous trois déversé sur leur seuil de surface, avec, pour le barrage de la Rouvière, un déversement sur le couronnement.

Les nombreuses données disponibles ont permis une analyse fine de cet événement, de la pluviométrie, des écoulements et du comportement hydraulique des barrages (Fouchier *et al.*, 2004). Les deux-tiers du département ont subi des cumuls de précipitation dépassant 300 mm sur la durée de l'événement et, pour le bassin ver-

7. Valeur à vérifier (enregistrement partiel à notre disposition).



◀ Figure 3 – Barrage de la Rouvière : hydrogrammes lors de l'événement des 8 et 9 octobre 2002.

sant de la Rouvière, le plus touché, nous avons estimé que la période de retour de la pluie en vingt-quatre heures était comprise entre 500 et 1 500 ans. Sur le haut bassin versant du Vidourle, l'événement pluviométrique a été caractérisé par deux corps de pluies intenses séparés de moins de douze heures.

Nous avons pu reconstituer les hydrogrammes des crues au droit des barrages. La figure 3 présente les résultats pour le barrage de la Rouvière.

La synthèse de l'efficacité des trois barrages lors de cet événement est résumée dans le tableau 6.

Ce tableau montre que, malgré le dépassement de la cote du seuil de surface, et même de la crête pour la Rouvière, les barrages ont apporté une contribution importante à la réduction des débits de pointe à leur aval immédiat. Cependant, plus en aval sur le Vidourle, l'effet des barrages est de moins en moins sensible au fur et à mesure que le cours d'eau principal reçoit des affluents non régulés. À Sommières, là où sont les principaux enjeux, le débit de pointe a été estimé à 2 550 m³/s. Il aurait été de 3 140 m³/s en l'ab-

sence des barrages. Les barrages ont donc permis un laminage de 19 % du débit et une baisse de la ligne d'eau de 0,5 m (BRL, 2003). La même conclusion vaut pour la Cèze et le Gardon : en septembre 2002, les barrages de Sénéchas et de Sainte-Cécile, implantés en amont des bassins versants, n'ont eu qu'une efficacité très marginale vis-à-vis d'un événement qui, dans ce secteur, a touché surtout les moyens bassins versants.

La révision des études hydrologiques

À la lumière de l'événement de septembre 2002, nous avons procédé à une analyse des études hydrologiques d'origine (Fouchier *et al.*, 2004), ce qui a ensuite amené à la réactualisation de l'hydrologie de ces barrages. Cette dernière a confirmé les ordres de grandeur des valeurs des débits de pointe de crues des études d'origine, mais a mis en évidence une sous-estimation importante des quantiles de pluies de longue durée⁸, conduisant à une sous-estimation encore plus importante des volumes et durées de crues. Ainsi, le niveau de protection a été réévalué à la baisse par rapport à celui affiché par les concepteurs. Le débordement sur les seuils de

8. Les études d'origine étaient basées sur des séries de données pluviométriques trop courtes, d'où cette sous-estimation.

	La Rouvière		Conqueyrac		Ceyrac	
	1 ^{er} pic	2 ^e pic	1 ^{er} pic	2 ^e pic	1 ^{er} pic	2 ^e pic
Débit de pointe entrant (m ³ /s)	1575	1470	622	325	296	510
Débit de pointe sortant (m ³ /s)	535	840	90	230	85	177
Taux de laminage de chaque pointe	66 %	43 %	86 %	29 %	71 %	65 %
Taux de laminage de la crue	47 %		63 %		65 %	

◀ Tableau 6 – Efficacité des barrages lors de l'événement de septembre 2002.

surface correspond à une période de retour de 30 à 100 ans et non de 1 000 ans comme initialement estimé (20 ans au lieu de 100 ans pour Sénéchas).

Quant au passage des crues extrêmes, les barrages équipés de seuils libres présentent un niveau de sécurité qui reste conforme aux règles de l'art. Par contre, le barrage de Sainte-Cécile, équipé d'un évacuateur en puits, doit faire l'objet de travaux lourds.

Bilan

Le cas des barrages du département du Gard montre clairement que les études hydrologiques doivent s'intéresser aux volumes des crues, au moins autant qu'aux débits de pointe. Quant à l'efficacité du laminage, elle diminue rapidement vers l'aval, au fur et à mesure que le cours d'eau reçoit des affluents au débit non régulé.

Sur le plan des choix techniques, on relèvera les imposants dispositifs de grilles pour éviter l'obstruction des pertuis. Et on notera que, bien que la plupart de ces barrages soient gardés, l'exploitant a fait le choix délibéré d'un fonctionnement passif en crue, choix tout à fait justifié vu la rapidité et la violence des phénomènes.

Toujours vis-à-vis des corps flottants, les seuils libres de Ceyrac et Conqueyrac ou bien les passes de grandes dimensions de Sénéchas inspirent beaucoup plus confiance que les passes basses et étroites de la Rouvière, sachant que les protections complémentaires par drome flottante dont sont équipés certains barrages se sont révélées d'une fiabilité toute relative (plusieurs cas de rupture sous la pression des flottants piégés par la drome).

Enfin, le cas de Sainte-Cécile montre qu'il est dangereux de faire reposer la sécurité hydraulique sur un ouvrage susceptible de se mettre en charge, avec un débit évacué qui alors plafonne. De ce point de vue, la prudence impose de disposer d'un évacuateur à seuil libre, dont le débit augmente rapidement avec la charge ; c'est la meilleure des sécurités vis-à-vis des incertitudes de l'hydrologie.

Sur le plan environnemental, les barrages du Gard constituent des obstacles infranchissables pour les espèces aquatiques. Cet aspect n'a visiblement pas été au cœur des préoccupations des concepteurs. Par contre, leur retenue permanente permet, pour deux d'entre eux, d'apporter une

contribution précieuse au soutien des étiages estivaux particulièrement sévères dans cette région.

Les ouvrages de la ville de Nîmes

La ville de Nîmes est implantée au pied du plateau des Costières, selon un axe nord-est/sud-ouest, avec une urbanisation qui d'une part gagne vers le sud-est (plaine du Vistre) et d'autre part vers les collines au nord-ouest. Un chevelu dense de thalwegs secs (appelés cadereaux) draine la bordure des Costières, traverse la ville dans le sens nord-ouest/sud-est (le plus souvent en souterrain) et rejoint le Vistre qui coule vers le sud-ouest, parallèlement à la bordure du plateau. Un important réseau karstique vient compliquer l'hydrologie avec, en particulier, une résurgence au centre ville.

L'événement du 3 octobre 1988 et le plan de protection contre les inondations (PPCI)

Des précipitations très importantes ont été enregistrées lors de cet événement : 420 mm en vingt-quatre heures au Mas de Ponge, dont 350 mm en six heures, une intensité horaire maximale de 80 mm/h. Les écoulements torrentiels qui ont traversé la ville ont causé la mort de neuf personnes et 600 M€ de dégâts. Une première expertise attribuait une période de retour de 150 à 250 ans à la pluie tombée sur la ville, et ce dans une gamme de durée de précipitations de deux à six heures, tandis que les débits en différents points du réseau hydrographique étaient estimés sur la base des relevés de laisses de crues et à l'aide de modèles hydrauliques. Le volume d'eau écoulé a été estimé à 14 hm³, dont 4 hm³ stockés temporairement dans le karst.

Puis ont été rapidement engagées les études du PPCI, ayant abouti à un programme reposant sur trois grands types d'aménagements :

- des barrages écrêteurs de crue implantés en tête des bassins versants des cadereaux, en amont de l'entrée dans la ville ;
- un recalibrage des ouvrages enterrés ou à ciel ouvert de traversée du centre ville ;
- des bassins écrêteurs en aval du centre ville et avant la confluence des cadereaux avec le Vistre.

Le choix technico-économique qui a été fait pour le dimensionnement de ces aménagements

repose sur des objectifs différenciés selon les zones :

- en amont du centre ville, les aménagements (et en particulier les barrages écrêteurs) sont dimensionnés hydrauliquement pour la crue de période de retour 40 ans. Leur dimensionnement en terme de sécurité prend en compte une crue de débit double de celui estimé lors de l'événement du 3 octobre 1988 ; un tel événement se voit associée une occurrence de 1 700 ans environ ;

- dans la traversée du centre ville, les ouvrages sont dimensionnés pour permettre le transit sans débordement de la crue de période de retour 40 ans ;

- les bassins aval sont dimensionnés pour ne pas aggraver les débits vers le Vistre par rapport à la situation antérieure au PPCI et ce, pour un événement de période de retour 100 ans.

La pluie de projet qui a servi au dimensionnement des aménagements est une pluie de période de retour 100 ans : pluie type double triangle avec un cumul sur quatre heures de 170 mm, dont 90 mm en une heure.

Sur l'ensemble de ce programme, estimé à l'origine à 125 M€ (valeur 1989), ce sont essentiellement une vingtaine de barrages et bassins écrêteurs à l'amont de la ville qui ont été réalisés à ce jour, pour un coût de 30 M€. La capacité totale de stockage ainsi obtenue est d'environ 1,2 hm³.

Description des barrages

Les barrages sont tous du même type ; pertuis de fond avec une section de contrôle à l'entrée et protection par une grille, remblai de 4 à 7 m de hauteur avec zonage des matériaux et système de drainage, évacuateur de surface avec seuil marqué par une poutre en béton et coursière (photo 6). Le bassin de dissipation est protégé par des enrochements. Aucun des pertuis n'est équipé de vannes, à l'exception du bassin de l'aérodrome. Pour ce dernier, la taille des deux pertuis (2 m de diamètre) a conduit à les équiper de vannes à flotteur permettant de maintenir un débit aval constant quelle que soit la cote de remplissage du bassin (photo 8).

Les événements de septembre 2002 et de septembre 2005

Depuis leur construction, les barrages ont été sollicités essentiellement à l'occasion de deux



◀ Photo 6 – Barrage du terrain de l'Armée, en fin de construction (source : ville de Nîmes).

épisodes et un des auteurs de l'article a été chargé d'en faire l'inspection post-crue (Royet, 2002 et 2005).

L'événement des 8 et 9 septembre 2002, décrit plus haut pour les barrages du département du Gard a bien sûr également touché Nîmes, mais avec des intensités pluviométriques nettement moindres. Avec un cumul pluviométrique sur trente-six heures variant de 160 à 240 mm selon les pluviomètres et une intensité maximale sur courte durée de 13 mm en six minutes, cet événement se voit attribuer une période de retour de 15 à 50 ans. Lors de cet événement, seuls cinq barrages (dont trois sur un même cadereau) ont légèrement déversé sur leur seuil de surface (charge de 0,1 à 0,5 m). Aucun des barrages n'étant à cette époque équipé de dispositif de mesure de hauteur d'eau (limnimètres), l'évaluation des hauteurs maximales dans les retenues a été faite à partir de l'observation des laisses de crues, donc avec une précision au mieux décimétrique. Il n'est pas possible de reconstituer des hydrogrammes.

L'événement de septembre 2005 est beaucoup plus riche d'enseignements, car à deux jours d'intervalle se sont succédé deux épisodes pluviométriques quasiment identiques mais avec des réponses des bassins versants totalement différentes ; de plus, plusieurs barrages étaient équipés de limnimètres enregistreurs.

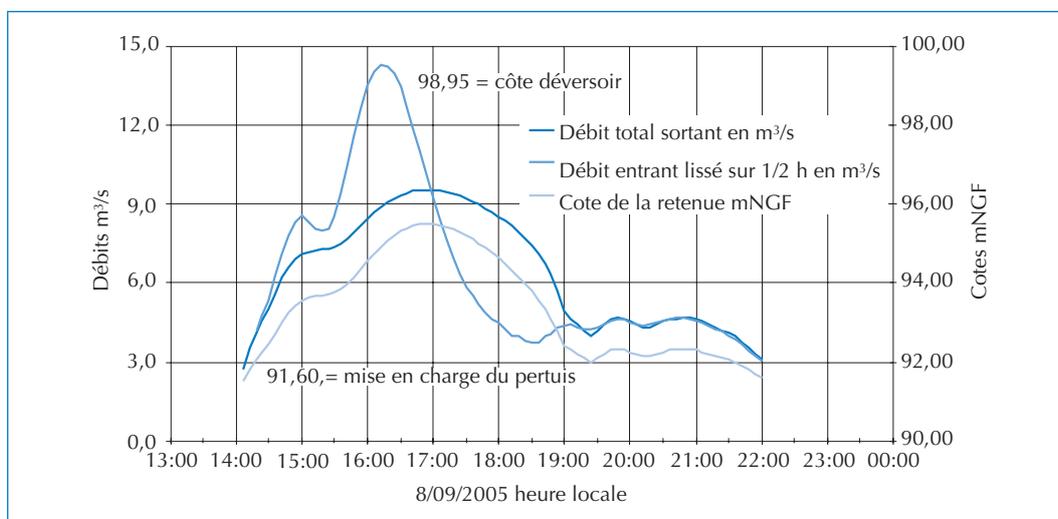
L'événement pluvieux s'est déroulé du 6 au 8 septembre, avec une accalmie le 7. Les précipitations des journées du 6 et du 8 septembre ont été comparables aussi bien en déroulement (deux corps d'averse intenses séparés par une courte pause) en intensité (de l'ordre de 250 mm en journalier sur les postes les plus arrosés) qu'en répartition spatiale (deux fois plus de pluie à

l'ouest qu'à l'est de la ville). Cet événement pluvieux présente une occurrence très variable selon la durée sur laquelle on considère les précipitations :

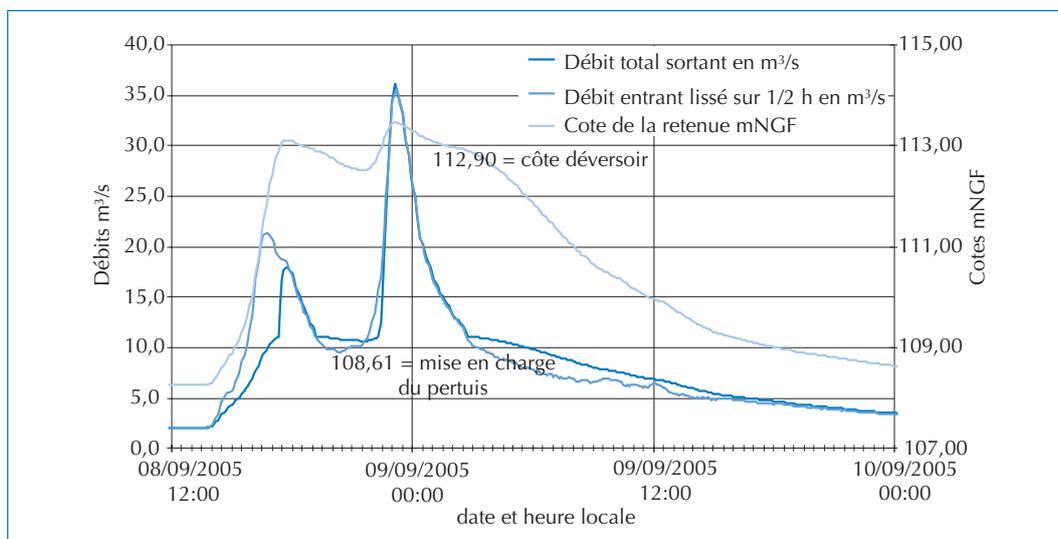
- fréquence courante (10-35 ans) pour les pluies horaires, avec cependant une valeur rare à un poste ;
- fréquence rare (d'ordre centennale) pour les pluies de durée quatre heures ;
- période de retour entre 50 et 20 ans pour les pluies en vingt-quatre heures ;
- et événement de fréquence exceptionnelle pour les totaux en soixante-douze heures qui ont excédé 500 mm sur deux postes de la ville.

La pluie du 6 septembre 2005 n'a pratiquement pas rempli les bassins (remplissage partiel de deux petits bassins), mais elle a significativement mobilisé le karst. La pluie du 8 septembre, dont le cumul de précipitations fut pourtant inférieur ou égal à celui de la première pluie, est arrivée sur des sols déjà bien humides et sur un karst partiellement rempli ; elle a donc été bien plus productive en termes d'écoulements que celle du 6 septembre. La moitié des barrages a déversé et l'autre moitié s'est significativement remplie, avec une répartition géographique ouest-est qui suit globalement celle de la pluie. Deux des barrages étaient équipés de limnimètres enregistreurs ce qui a permis de suivre l'évolution du remplissage et de reconstituer la crue naturelle entrante (figures 4 et 5).

► Figure 4 – Barrage de l'Oliveraie, crue du 8 septembre 2005.



► Figure 5 – Barrage de Roquemaillère, crue du 8-9 septembre 2005.



Comme on le voit sur ces figures, le barrage de l'Oliveraie a efficacement écrêté la crue, tandis que le bassin de Roquemaillère, rempli par le premier pic de crue, ne disposait plus d'aucune capacité de stockage lorsque le deuxième pic est arrivé. Ce dernier n'a donc pas été écrêté.

Le retour d'expérience sur les grilles de protection des pertuis

La ville de Nîmes a testé diverses solutions qui ont été progressivement affinées suite au comportement constaté lors des crues de 2002 et 2005. Une contrainte particulière était liée au contexte urbain de ces aménagements qui imposait le respect de normes visant à empêcher l'introduction de personnes (y compris d'enfants) à travers ces grilles. Ainsi l'espacement des barreaux ne devait pas dépasser 15 cm, dimension beaucoup plus petite que celle habituellement requise vis-à-vis des considérations de non-obstruction du pertuis.

Par contre, on a systématiquement réalisé des grilles de grande surface, au moins dix à vingt fois la surface de la section de contrôle du pertuis. Ainsi, même si le faible espacement des barreaux a eu pour conséquence une obstruction par les branchages et les feuilles, il restait toujours une section libre, supérieure à celle du pertuis (photo 7). De plus, le dépôt des branchages et feuilles (matériaux transportés à la surface de l'écoulement) s'est fait essentiellement à la vidange de la retenue.

Dans deux cas, les grilles de protection sont des ouvrages en forme de cloche, aux dimensions



▲ Photo 7 – Bassin du terrain de l'Armée ; grille en forme de tunnel protégeant le pertuis ; on peut remarquer que la partie verticale n'a pas été obstruée par les flottants déposés à la décrue.



◀ Photo 8 – Bassin de l'aérodrome ouest : grille de protection des vannes à flotteur à l'entrée des conduites.

impressionnantes, qui viennent couvrir l'ouvrage d'entrée du pertuis. Au bassin de l'aérodrome, ce dispositif est justifié par la nécessité de protéger également le dispositif à flotteur permettant de régler la section de contrôle du pertuis (photo 8). Au barrage du pont de la République, le dispositif de contrôle d'entrée du pertuis est une tour avec plusieurs orifices étagés et la cloche recouvre l'ensemble.

Bilan

Du retour d'expérience des barrages du PPCI de la ville de Nîmes, on retiendra essentiellement deux leçons.

L'événement de septembre 2005 a montré que le comportement hydrologique des bassins versants est très dépendant de l'état initial des sols et surtout, dans ce cas particulier, de l'état de remplissage du karst. Il est donc très délicat de juger de l'efficacité des aménagements en se référant seulement à l'occurrence de la pluie, dont on a vu au passage qu'elle dépend de la durée sur laquelle on la considère. La très faible taille des bassins versants et la variabilité spatiale des précipitations rendent encore plus complexe l'exercice.

La ville de Nîmes a « testé » différentes solutions et formes de grilles, dans un contexte de contraintes urbaines qui obligeait à dimensionner l'espacement des barreaux vis-à-vis de considération de non-intrusion. Les solutions trouvées sur les derniers barrages réalisés ont montré leur efficacité : les grilles sont de très grandes dimensions, elles comportent des parties horizontales et des parties verticales et sont dimensionnées pour résister au poids d'une importante épaisseur de flottants. Ceux-ci se déposent d'ailleurs surtout à la vidange, ce qui ne compromet en aucune

façon l'efficacité hydraulique de l'aménagement, à condition que les grilles soient nettoyées dans les meilleurs délais, pour être à nouveau efficaces en cas de seconde crue rapprochée.

Seine-Maritime : une forte densité de petits ouvrages conçus pour une protection locale

Il existe une centaine de barrages secs et bassins, en déblai ou endigués, sur les 214 km² du bassin versant de l'Austreberthe, et au moins autant sur les 213 km² du bassin de la Lézarde (Cemagref, 2005). Cette densité inhabituelle s'explique par des aléas d'inondation et des enjeux répartis sur l'ensemble des bassins. Les inondations surviennent par débordement de cours d'eau, mais également par ruissellement. En effet, l'amont des bassins est constitué de plateaux loessiques, entaillés par des thalwegs secs où l'eau se concentre pendant les épisodes pluvieux ; il n'est pas rare que les ruissellements y atteignent une vitesse de 1 à 2 m/s. Ces écoulements sont donc potentiellement dangereux quand ils débouchent sur des routes ou dans des lieux habités.

L'occupation du sol des bassins se modifie ; la surface agricole en prairie se réduit au profit des labours, et beaucoup de maisons individuelles sont construites, surtout à l'aval, et plus particulièrement sur le bassin de la Lézarde à proximité du Havre. Cette évolution augmente en même temps la vulnérabilité et l'aléa, car l'imperméabilisation des surfaces accentue les problèmes de ruissellement. En réponse, des aménagements sont construits, aussi bien pour lutter contre les crues (barrages à pertuis ouverts de toutes tailles) que pour réduire l'érosion de terres arables (bandes enherbées, talus...).

Les acteurs locaux

Sur le bassin de l'Austreberthe, les tâches sont réparties entre deux syndicats, qui devraient fusionner dans les années à venir. Le syndicat intercommunal des rivières Austreberthe et Saffimbec (SIRAS), créé en 1824, possède une compétence de lutte contre les inondations par débordements de rivière depuis 1995. Cette dernière lui permet d'entreprendre études et des travaux sur l'ensemble des communes du bassin versant. L'autre syndicat, le syndicat mixte des bassins versants de l'Austreberthe et du Saffimbec (SMBVAS), est l'un des vingt-deux syndicats de bassins créés dans le département en 2000. Son

but est de lutter contre les ruissellements et ses conséquences : inondations, érosions, transport de polluants, sédimentation.

Sur le bassin versant de la Lézarde, le syndicat mixte de bassin versant de la Lézarde (SMBVL) coordonne les actions de lutte contre les inondations à l'échelle du bassin versant. Il est maître d'ouvrage des études, mais les communautés de communes ou d'agglomération ont conservé la maîtrise d'ouvrage des travaux. Il s'agit de la communauté de l'agglomération havraise (CODAH) à l'aval, de la communauté de communes de Criquetot l'Esneval au nord, et de la communauté de communes de Saint-Romain de Colbosc à l'est. Dans ce contexte institutionnel complexe, c'est la CODAH, par son poids démographique et ses services techniques, qui fédère les initiatives. Citons enfin le syndicat des rivières d'Harfleur (SYRHA) créé en 1839, qui a actuellement pour mission la surveillance, l'entretien et l'aménagement des lits mineurs des berges et des rives de rivières du bassin versant.

D'autres acteurs publics apportent leur appui technique ou financier : les services de l'État, la région, le département, l'agence de l'eau, ainsi que l'association régionale pour l'étude et l'amélioration des sols (AREAS, basé à Saint-Valéry-en-Caux) et l'agence régionale de l'environnement de la Haute-Normandie (AREHN).

Description des ouvrages

Les barrages secs que nous avons visités sont très semblables dans leur principe aux petits barrages de la ville de Nîmes ou de Silésie, avec un corps de barrage en terre et des organes hydrauliques, pertuis et surverse, portés par une partie en béton. Cependant, l'aléa n'est pas lié à des inondations par débordement de cours d'eau, mais à de forts ruissellements. Ainsi, les ouvrages sont construits dans des thalwegs secs, juste en amont des enjeux menacés.

Les photos 9a et 9b montrent des ouvrages en dérivation ayant la même fonction. La photo 9a présente des bassins en cascade, séparés par des seuils de surface renforcés par des matelas Reno. La photo 9b permet de bien voir le modelé de terrain, avec un plateau loessique et des thalwegs secs où les écoulements se concentrent. Le bassin de rétention a été construit pour protéger le groupe d'habitations des ruissellements en provenance de parcelles agricoles. Les eaux sont fortement chargées en sédiment, ce qui oblige à un entretien régulier, avec curage.

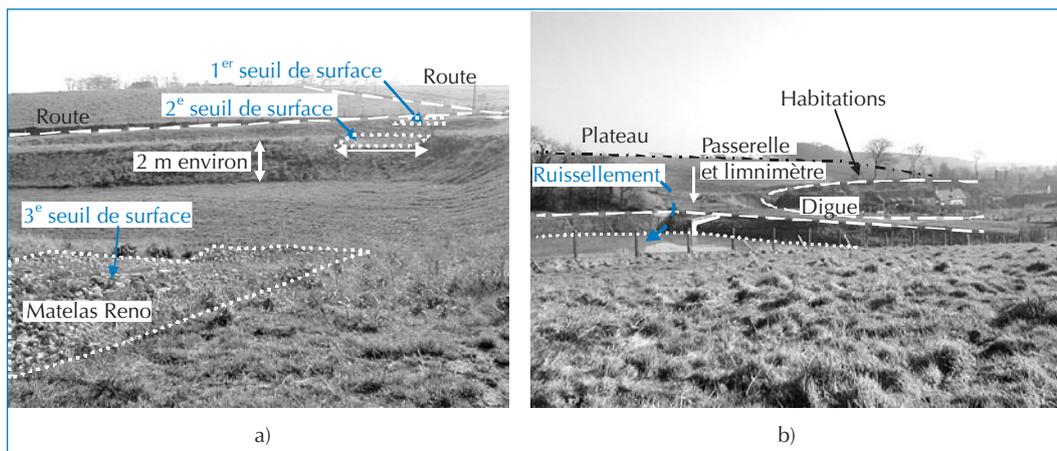


Photo 9 – Petits bassins de rétention sur microthalwegs secs : a) bassins en cascade (bassin versant de l'Austreberthe) ; b) bassin en amont d'un groupe d'habitations (bassin versant de la Lézarde).

Éléments de dimensionnement et de diagnostic

Des orages violents sont à l'origine de forts ruissellements en versant, qui causent des dommages matériels mais menacent également les vies humaines, notamment quand ils arrivent sur des axes routiers. Le grand nombre de barrages reflète la multiplicité des zones à risque, chaque barrage ayant été dimensionné individuellement ou par petits groupes, pour un effet local. Les maîtres d'ouvrages rencontrés suivent généralement les recommandations de l'AREAS, qui conseille deux méthodes de dimensionnement en fonction de la superficie du bassin versant à l'amont du barrage. Les ouvrages situés en amont, sur un bassin de quelques hectares, sont en général conçus pour retenir une pluie de projet centennale. Les ouvrages plus à l'aval sont dimensionnés plutôt pour une pluie décennale.

La CODAH a commandé une étude diagnostic de type « Inondabilité » (Mejdi, 2006). Il était demandé de dresser des cartes d'aléa sans tenir compte des ouvrages, puis en intégrant dans un second temps l'effet de l'ensemble des ouvrages. Deux difficultés sont apparues. Premièrement, toutes les données nécessaires – localisation précise, hauteur de digue et dimensions du pertuis... – n'étaient pas forcément disponibles pour les ouvrages antérieurs à la création du syndicat intercommunal. Mais surtout, la construction de scénarios d'apport à l'échelle d'un réseau hydrographique ramifié est un exercice difficile.

En effet, pour un événement réel, les périodes de retour de crues varient sur le bassin. En conséquence, certains ouvrages fonctionnent dans leur

plage maximale d'efficacité, tandis que d'autres sont traversés par des débits trop faibles pour être laminés ou au contraire des hydrogrammes très importants entraînant saturation et surverse. La variabilité inter-événements complique la tâche de diagnostic d'efficacité à l'échelle du bassin.

Gestion des barrages et des emprises

Plusieurs solutions co-existent pour la gestion foncière des emprises. La solution la plus simple pour les syndicats est d'établir des servitudes sur ces terrains, obligeant par exemple à les maintenir en prairies pour y limiter l'érosion et l'envasement. Malheureusement, la diminution des surfaces agricoles en herbe et les pressions foncières importantes conduisent les maîtres d'ouvrages à se porter acquéreur des emprises, surtout en proche banlieue du Havre, sur le bassin de la Lézarde. En l'absence d'un PPR⁹ approuvé, la procédure habituelle de DUP¹⁰ montre ses limites, car il arrive que le terrain ciblé pour implanter un bassin soit vendu avant que l'instruction de la DUP n'aboutisse. La CODAH doit maintenant réserver une emprise prévisionnelle plus grande.

Entretien et surveillance

Sur la Lézarde, les ouvrages font l'objet d'une visite mensuelle, conformément à un arrêté préfectoral, et après chaque événement intense. Les visites mensuelles sont sous-traitées, mais l'augmentation du nombre d'ouvrages rend la tâche de plus en plus lourde. D'autres tâches d'entretien courant sont sous-traitées, comme le fauchage et le curage. En revanche, les visites après chaque événement intense sont assurées par le maître d'ouvrage (en l'occurrence la CODAH).

9. Plan de prévention des risques.

10. Déclaration d'utilité publique.

Bilan

Sur la Lézarde et l'Austreberthe, la configuration particulière des bassins, avec des enjeux dispersés et des ruissellements en microthalwegs localement très dangereux, a conduit à une multiplication des ouvrages. Le nombre d'ouvrages engendre des coûts de maintenance élevés, encore accrus par un envasement rapide. L'éparpillement des aménagements sur tout le bassin complique l'estimation de leur effet global.

Bilan général des analyses de barrages à pertuis ouverts : de l'intérêt des retours d'expérience

Les ouvrages et ensembles d'ouvrages étudiés permettent d'aborder la question de la conception de barrages écrêteurs sous plusieurs angles, selon les spécificités et les documents disponibles. Ils témoignent en tout cas de l'efficacité du principe et d'une large diversité dans les réalisations. L'étude d'exemples est tout à fait déterminante pour partager les connaissances et identifier les besoins de développements méthodologiques.

Diversité dans les réalisations

La grande diversité observée dans ces exemples reflète celle des problèmes posés et des objectifs, mais correspond aussi parfois à de simples variantes techniques.

Le passage de l'eau est en général assuré par un pertuis unique et parfois par plusieurs pertuis, situés au même niveau (cas des ouvrages de la vallée de la Miami River) ou superposés (barrage de Sobieszów). La construction de plusieurs pertuis étagés permet une augmentation par paliers du débit aval. En revanche, la solution de plusieurs pertuis au même niveau nous paraît moins efficace qu'un pertuis unique (risque d'obstruction, coût...).

L'article montre une diversité de solutions pour protéger les pertuis contre l'obstruction, sachant qu'il convient d'examiner les risques liés aux flottants, mais aussi les risques liés au charriage. La solution adoptée dans le département du Gard, sous forme d'un batardeau surmonté de larges grilles en béton répond à cette double exigence, mais en créant une barrière infranchissable pour les espèces aquatiques. Les solutions adoptées par la ville de Nîmes permettent de répondre aux exigences anti-intrusion liées au contexte urbain, mais exigent une réactivité des services chargés

de l'entretien, les grilles ayant tendance à s'obturer à la décrue par dépôt des flottants.

Les déversoirs de sécurité présentent également des variantes : crête déversante sur tout ou partie de la longueur de l'ouvrage, déversoirs latéraux. On en retiendra que, sur les exemples traités, le déversoir de sécurité en puits ne concerne qu'un seul cas et il apparaît clairement qu'il faut nettement lui préférer un seuil et un coursier totalement à ciel ouvert.

Pour un diagnostic d'effet des ouvrages en régime et à l'échelle du bassin

En première approche, une façon intéressante d'évaluer l'efficacité potentielle d'un barrage écrêteur de crues consiste à traduire le volume stocké dans la retenue en lame d'eau écoulee sur le bassin versant et à comparer cette grandeur aux quantiles régionaux de pluie. Ainsi les barrages de Silésie stockent entre 26 et 72 mm de lame d'eau, ceux de la Miami River stockent entre 81 et 228 mm de lame d'eau, ceux du département du Gard stockent entre 85 et 110 mm de lame d'eau.

Un diagnostic d'effet approfondi doit ensuite permettre de caractériser le fonctionnement des ouvrages pour les crues faibles à extrêmes, en fournissant des éléments capables de juger objectivement des bénéfices potentiels et de comparer entre elles des solutions techniques. Quelques recommandations pour le pilotage de projets ainsi qu'une liste de références méthodologiques sont données dans l'article « Prévention des inondations par ralentissement dynamique : principe et recommandations » (pages 5-24 de ce même numéro), qui développe des arguments déjà développés dans une fiche Sinfotech (Poulard *et al.*, 2008). Ces publications mettent en avant le rôle du maître d'ouvrage, à qui il appartient de rédiger le cahier des charges de manière à garantir que l'étude répondra bien aux besoins et aux contraintes, et que les éléments de réponse seront pertinents et exploitables.

TRAVAILLER SUR LE RÉGIME DES CRUES

Nous recommandons de calculer l'effet des ouvrages pour plusieurs périodes de retour. Ne représenter l'effet que sur une crue, souvent une « crue de projet » pour laquelle l'ouvrage est optimisé, est non seulement insuffisant, mais éventuellement trompeur. En effet, un barrage sec se caractérise par un seuil d'effet, puis une plage de périodes de retour où le laminage est significatif ; ensuite, son efficacité s'estompe quand

commence la surverse (comportement pour une crue : cf. figure 5, page 48 ; représentation en régime : cf. figure 8 de l'article « Prévention des inondations par ralentissement dynamique : principe et recommandations », page 8 de ce même numéro).

Pour bien replacer les résultats en régime, le recours à l'analyse statistique des chroniques est indispensable (Lang *et al.*, 2007).

TRAVAILLER À L'ÉCHELLE DU BASSIN

Le cas de la Lézarde en Seine-Maritime montre que travailler à l'échelle du bassin accroît la difficulté du diagnostic d'effets. C'est pourtant une question importante.

Des travaux de recherche sont en cours pour améliorer le dimensionnement concerté de plusieurs ouvrages répartis sur le réseau hydrographique. La difficulté est de définir un jeu de scénarios avec des apports définis sur chacun des sous-bassins, en tenant compte des liaisons. Une approche intéressante consiste à travailler à partir de champs de pluies, construits d'après les propriétés statistiques locales ; elle permet d'intégrer la variabilité des champs de pluie et donc la variabilité de l'effet des ouvrages (Poulard *et al.*, 2009).

Pour une évaluation économique objective

La rentabilité économique n'est pas le seul critère de décision, bien évidemment, mais c'est un indicateur objectif qui doit être déterminé avec rigueur. Le calcul des coûts et des bénéfices annualisés permet de comparer de manière rigoureuse les dépenses et l'espérance de gains sur la durée de vie de l'ouvrage (Erdlenbruch *et al.*, 2008). L'intérêt de cet approche et le principe de la démarche sont rappelés et détaillés dans d'autres articles de ce numéro (« Prévention des inondations par ralentissement dynamique : principe et recommandations », page 5 ; « Sensibilité d'une analyse coût bénéfice – Enseignements pour l'évaluation des projets d'atténuation des inondations », page 95 ; « Revue bibliographique – Panorama de la recherche sur la prévention des inondations », page 131), mais nous ne pouvions pas omettre ce rappel ici. Les exemples étudiés ont permis d'évoquer la nécessité d'un entretien régulier, et d'opérations de maintenance plus lourdes après chaque crue. Les exemples des barrages centenaires de Silésie et de Pologne réaffirment la nécessité de réfléchir à long terme,

en tenant compte des perspectives d'évolution future du bassin.

Prise en compte de contraintes environnementales

Ont été considérés ici des barrages à pertuis ouverts, donc sans retenue d'eau permanente. L'essentiel des ouvrages cités sont donc transparents hydrauliquement hors crues et respectent la continuité du lit mineur.

Cependant, des modifications du lit mineur sont inévitables au voisinage immédiat du barrage. Il est toutefois possible de limiter les perturbations, en impliquant dans le projet des spécialistes des écosystèmes aquatiques qui pourront effectuer les diagnostics nécessaires puis proposer des solutions pertinentes. Consulter un expert lors de la conception permet de trouver un compromis à un coût acceptable ; il est par exemple tout à fait possible de donner au pertuis une largeur et une pente aussi proches que possible des paramètres naturels. Corriger *a posteriori* un défaut, par exemple un seuil empêchant le franchissement ou une artificialisation excessive des milieux, est beaucoup plus onéreux.

Nous développons actuellement une approche de diagnostic multidisciplinaire, appliquée aux barrages de Basse-Silésie, afin de prendre en considération de manière objective les écosystèmes et les fonctions de la rivière (Poulard et Witkowska, 2005 ; travaux en cours dans le cadre d'un projet EcoNet ; Poulard *et al.*, soumis en 2009). Il est certes important de préserver le paysage et la franchissabilité des ouvrages par les poissons, mais le lit mineur n'est pas seulement une voie de communication. De plus, invertébrés et micro-organismes représentent la majorité de la biomasse et assurent l'essentiel des fonctions métaboliques (Ostroumov, 2005 ; Perrin *et al.*, 2004).

Les rôles importants des flux verticaux et de la végétation rivulaire dans le bon fonctionnement écologique nous conduisent à plutôt recommander les enrochements ou les gabions – là où ils sont suffisants – par rapport aux surfaces bétonnées, lisses et imperméables (e.g. Breil *et al.*, 2008). Ils sont tout à fait envisageables sur le tronçon amont, qui n'est pas soumis à des vitesses importantes : le renforcement des berges sert juste à diriger les écoulements vers le pertuis.

Enfin, si possible dès la conception, il faut essayer de valoriser l'emprise comme une « zone verte », notamment en zone périurbaine.

Conclusion

Au final, rappelons que travailler sur un projet de petits ouvrages ne demande pas moins de rigueur que pour des grands ouvrages, que ce soit dans la conception des structures, le dimen-

sionnement des organes hydrauliques, les impacts environnementaux et bien sûr l'évaluation économique. Il convient donc, pour cette démarche pluridisciplinaire, de faire appel à une ingénierie qualifiée. □

Remerciements

Les missions sur les sites de l'Austreberthe et de la Lézarde ont été financées dans le cadre d'une convention avec le ministère chargé de l'environnement sur le thème de la prévention des inondations. L'analyse des dossiers a été effectuée conjointement avec Éric Hérouin, alors au Cemagref de Lyon, qui fut le rédacteur principal des fiches d'analyse de retours d'expérience de 2005.

Les missions sur le haut bassin de l'Oder ont été financées par le programme EcoNet du ministère chargé des affaires étrangères, qui a également facilité la collaboration régulière entre le Cemagref et l'Université Polytechnique de Cracovie.

L'analyse du retour d'expérience des barrages du département du Gard et de la ville de Nîmes a été rendue possible par les missions confiées par ces maîtres d'ouvrages au Cemagref et par les contacts réguliers qu'elles impliquent.

Nous remercions tout particulièrement les maîtres d'ouvrages qui nous ont accueillis, accompagnés sur le terrain, et communiqué les documents qui ont permis d'établir la présente analyse de retour d'expérience : MM. Jean-Luc Nuël et André Martin de la ville de Nîmes, MM. Xavier Eudes et Francis Foussard du conseil général du Gard, ainsi que les gardiens des barrages ; les représentants du syndicat mixte de bassin versant de la Lézarde (SMBVL), M. Emmanuel Hauchard de la communauté de l'agglomération havraise (CODAH), Mme Druhen du syndicat mixte du bassin versant de l'Austreberthe et du Saffimbec (SMBVAS), M. Leffee du syndicat intercommunal des rivières Austreberthe et Saffimbec (SIRAS), ainsi que M. Ducatez de l'AREAS. M. Janusz Sadowski du RZGW de Jelenia Góra, nous a très aimablement consacré deux journées pour faire le tour des barrages secs dont il a la charge. Merci également à M. Claude Cretin, sans qui nous ignorerions tout de l'histoire d'un précurseur des barrages secs, la « digue de Pinay ».

Nous remercions enfin nos collègues qui ont relu et amélioré le texte : Gérard Degoutte, de l'unité de recherche « Ouvrages hydrauliques » du Cemagref d'Aix-en-Provence, et Michel Lafont, de l'unité de recherche « Biologie des écosystèmes aquatiques » du Cemagref de Lyon.

Résumé

L'objet de cet article est de partager le produit d'analyses de retours d'expériences de barrages à pertuis ouverts. Ces ouvrages sont efficaces pour laminar les crues et perturbent peu la continuité du lit mineur et les écoulements en dehors des épisodes de crue. Nous présentons ici cinq ensembles de barrages, sélectionnés de manière à donner un aperçu de la diversité des ouvrages construits et des problèmes rencontrés. Les ouvrages les plus anciens sont commentés en premier. Il s'agit de barrages construits au début du vingtième siècle en Pologne et aux États-Unis, et qui sont toujours opérationnels. Ensuite, nous nous intéressons à des réalisations récentes en France. Les grands barrages du département du Gard et les petits barrages de la ville de Nîmes sont présentés, avec quelques analyses de comportement lors d'événements hydrologiques intenses. Enfin, les petits barrages de Seine-Maritime permettent de poser le problème du diagnostic d'efficacité des barrages à l'échelle du bassin, quand les ouvrages et les enjeux sont disséminés. Cet article rappelle également quelques références utiles pour la conception et le dimensionnement d'ouvrages.

Abstract

This paper aims at sharing feedback about dry dams. These structures are efficient to mitigate floods, while little disruption of the continuity of the main channel and its flows outside the flood periods. Five sets of dams are presented here. They were selected so as encompass the diversity of the structures and of the problems. The oldest structures are presented first. These are dams built in the beginning of the twentieth century in Poland and in the USA, which are still in operation today. Then, recent realisations in France are presented. Large dams in Gard catchment and small dams upstream the nearby town of Nîmes are described, with analyses of behaviour during intense floods. Finally, small dams in Seine-Maritime allow to address the issue of an efficiency diagnostic at catchment's scale, when both dams and stakes are spread out. This article gives key references for further information about structures design.

Bibliographie

- BREIL, P. *et al.*, 2005, Dynamique du carbone et de l'azote en rivière dans un gradient rural-urbain (projet PNRH-65), *in* : *Actes du Colloque de Restitution Scientifique ECCO, 5-7 décembre 2005, Toulouse (France)*, p. 387-392.
- BREIL, P. *et al.*, 2008, Aquatic ecosystems, *in* : *Data Requirements for Integrated Urban Water Management*, Chapter 20, FLETCHER, T.-D., DELETIĆ, A. (Eds), Taylor and Francis group, London, p. 262-274.
- FOUCHIER, C. *et al.*, 2004, Inondations de septembre 2002 dans le Sud de la France – Analyse hydrologique et hydraulique au niveau des barrages écrêteurs du Vidourle, *Ingénieries-EAT*, n° 37, p. 23-35.
- LAFONT, M., VIVIER, A., 2006, Hyporheic zone, coarse surface sediments and oligochaete assemblages : importance for the understanding of the watercourse functioning, *Hydrobiologia*, n° 564, p. 171-181.
- LANG, M., LAVABRE, J. *et al.*, 2007, *Estimation de la crue centennale pour les plans de prévention des risques d'inondations*, Éditions QUÆ, 232 p.
- MEDAD, 2004, *Le ralentissement dynamique pour la prévention des inondations : guide des aménagements associant l'épandage des crues dans le lit majeur et leur écrêtement dans de petits ouvrages*, plusieurs contributeurs dont Cemagref, 131 p.
http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/GUIDE_RD_Web.pdf
- MEJDI, S., 2006, Flood Risk Management based on Method « Inondabilité », *in* : *7^e conférence internationale sur l'Hydroinformatique, HIC 2006, septembre 2006, Nice, France*.
- OSTROUMOV, S.-A., 2005, On the multifunctional role of the biota in the self-purification of aquatic ecosystems, *Russian Journal of Ecology*, n° 36, p. 414-420.
- PERRIN, J.-F., LAFONT, M., PÉRY, A., 2004, Outils de diagnose fonctionnelle pour l'ingénierie écologique en rivière, *Ingénieries EAT*, numéro spécial 2004, p. 57-67.
- POULARD, C. *et al.*, 2005, *fiches de Retour d'expérience RD*.
- POULARD, C. *et al.*, 2005, Dynamic Slowdown : A flood mitigation strategy complying with the Integrated Management concept - Implementation in a small mountainous catchment, *Journal of River Basin Management*, vol. 3 (2), p. 75-85.
- POULARD, C., WITKOWSKA, H., 2005, *Simulation de l'effet de barrages secs sur la régulation des crues d'un bassin versant*, projet EcoNet, rapport final 2004-2005, 64 p.
- POULARD, C. *et al.*, 2008, *Gérer un projet de ralentissement dynamique*, Fiche Sinfotech, 4 p.
<http://sinfotech.cemagref.fr/upl/map/fiches/poulard.pdf>
- POULARD, C. *et al.*, 2009, Towards objective design of dry dams at watershed scale : how to take into account the spatial structure of the rainfall and its variability ; 12th Biennial Conference of Euromediterranean Network of Experimental and Representative Basins (ERB), Hydrological Extremes in Small Basins, 18-20 septembre 2008, Cracovie (Pologne), *Technical Docs in Hydrology*, Unesco, accepté pour publication.
- POULARD, C. *et al.*, soumis en 2009, Towards flood mitigation designs respectful of river ecosystem functions ; problematic and conceptual approach, soumis à *Ecological Engineering*.
- ROYET, P. *et al.*, 2005, *Analyse de l'événement pluviométrique des 6 et 8 septembre 2005 et comportement des barrages du PPCI*, rapport pour la ville de Nîmes, 48 p.