

Chapitre 5. Les ouvrages de protection contre les crues

5.1. Introduction

Lorsque la prévention des inondations est la priorité d'aménagement la plus pressante, les principes du ralentissement dynamique peuvent se restreindre à :

- ralentir les eaux s'écoulant sur les versants, ce qui va retarder d'autant leur arrivée aux cours d'eau ;
- atténuer leur accélération dans les lits des cours d'eau ;
- favoriser, voire restaurer, la connexion avec les annexes fluviales et le lit majeur en général ; ceci permet la dérivation d'une partie des écoulements en crue et l'augmentation des infiltrations vers les nappes.

Dans la pratique, il apparaît nécessaire de mobiliser temporairement des espaces de stockage pour obtenir un laminage efficace des crues. On voit ainsi émerger de nombreux projets d'aménagements visant, pour prévenir les inondations, à combiner, d'une part, des ouvrages de stockage transverses au lit du cours d'eau ou en dérivation (dont toute ou partie de l'emprise est dans le lit majeur), d'autre part, les épandages par débordements en lits majeurs et, enfin, des protections rapprochées pour des enjeux spécifiques et généralement localisés.

Le présent guide s'adresse particulièrement à ces projets, pour lesquels on peut encore simplifier le concept et le restreindre aux objectifs techniques suivants :

- diminuer le débit de pointe et retarder les écoulements sur un cours d'eau,

En freinant l'eau avant son arrivée dans le lit,

En mobilisant les capacités naturelles d'amortissement en lit moyen et lit majeur,

Et en stockant temporairement une partie du volume de la crue dans des ouvrages spécifiquement prévus à cet effet ;

- s'assurer qu'à l'échelle du bassin versant, la mise en œuvre du ralentissement dynamique sur un ensemble de cours d'eau n'engendre pas localement une augmentation inattendue des risques d'inondation, notamment par recomposition de crues déphasées par les ouvrages.

5.2. Les différents types d'aménagement

Un large éventail d'aménagements, ruraux et urbains, peut a priori participer au ralentissement des écoulements, au long du cheminement des eaux, de la pluie tombée jusqu'à l'exutoire du bassin versant.

La figure 1 ci-dessous illustre comment les composantes du paysage jouent un rôle dans les écoulements, et présente quelques aménagements possibles en versants, dans les réseaux primaires, et dans le lit majeur des cours d'eau permanents.



Légende : 1 : Foret 2 : la prairie 3 : prairie 4 : parcelles agricoles 5 et 6 : réseaux artificiels
7 : zone rural 8 : pertuis ouvert 9 : milieu urbanisé

Figure 1. Schéma des cheminements possibles de l'eau en bassin versant, zones d'épandage et de stockage temporaire

Ces différents éléments sont présentés ci-dessous en les regroupant selon leur nature et leur situation (les numéros cités entre parenthèses (1), (2)... renvoient à la figure 1) :

- **l'occupation du sol** : une forêt (1) intercepte d'abord les écoulements, limitant la pluie efficace au moins en début d'événement, et son sol présente une rugosité forte- exception faite des chemins forestiers pouvant canaliser les écoulements selon leur disposition. La prairie (2) est enherbée tout au long de l'année, tandis que les champs (3) présentent une rugosité et une aptitude à concentrer ou absorber les écoulements très variables selon le type de culture et la période du cycle végétatif. De plus, certaines pratiques (sens de labour, drainage, bandes enherbées) peuvent modifier le ruissellement ;

Les éléments linéaires : disposés perpendiculairement à la pente, les haies et les talus (4), les terrasses, sont hydrauliquement efficaces pour intercepter les écoulements et limiter l'érosion des sols ;

- **les réseaux artificiels et/ou artificialisés** : fossés d'assainissement agricoles, buses sous les routes, peuvent être munis de limiteurs de débits (5), (6), à condition qu'ils soient

spécifiquement étudiés, conçus et entretenus, de façon à atténuer leur effet général de concentration et d'accélération des écoulements ;

- **le gabarit et la rugosité du lit mineur et des berges** : la forme du chenal, l'état des rives et les aménagements éventuels du lit, la présence d'un bourrelet de berge, influent sur l'évacuation de l'eau. Des ouvrages spécifiquement conçus peuvent freiner localement les écoulements : ponts et ponceaux, passages sous buses... ;

- **les aménagements hydrauliques**, en versant, comme les bassins d'orage, ou en thalweg, comme les retenues à pertuis ouvert (8) et autres types de retenues, les endiguements transversaux, peuvent participer au laminage des écoulements.

- **le milieu urbanisé (9)** : des techniques alternatives aux réseaux d'assainissement urbains, mobilisant les capacités de stockage temporaire au niveau des habitations, de la voirie et de certains espaces urbains, favorisent le laminage d'une partie des volumes apportés par les épisodes pluvieux et permettent d'atténuer la concentration des ruissellements induits.

Les actions possibles de l'aménageur, dans ce contexte, sont de plusieurs types, consistant à rechercher :

- **le ralentissement des ruissellements en versants**, essentiellement dans les zones de fort ruissellement. Dans les micros talwegs à écoulements occasionnels, le ralentissement peut être favorisé en zone rurale par embroussaillement (7), mais également par un réaménagement des parcelles agricoles (réhabilitation des haies et talus hydrauliquement efficaces) (4).

L'emploi de chaussées à structures réservoirs en milieu urbanisé (9) tempère les effets de l'imperméabilisation des sols ;

- **la limitation ponctuelle des débits** dans les réseaux primaires artificialisés (fossés d'assainissement agricole à fort potentiel de stockage (6), buses de collecte sous les routes spécifiquement conçues (5)). En milieu urbanisé (9) on peut mobiliser des capacités de stockage modestes et localisées, mais nombreuses, dans les habitations (citerne, puits) ou plus importantes et appuyées sur des structures linéaires (tranchées dédiées enterrées sous parkings, trottoirs ou jardins, noues) ;

- **l'augmentation de la rugosité**, et éventuellement la revégétalisation raisonnée des berges des lits mineurs et des lits moyens (7) ;

- **la mobilisation du lit majeur** : elle peut être mise en oeuvre, là où cela est tolérable et permet un laminage effectif, selon différentes modalités : aménagements légers (arasements localisés de bourrelets de berges, seuils noyés), ouvrages transverses comme les retenues à pertuis ouverts (8), déversoirs contrôlés sur digues ouvrant sur des casiers ou des zones d'expansion de crues, ouvrages de prise pour la dérivation vers des retenues sèches. En zone

urbanisée (9), des espaces hors d'eau ou déjà en eau (places publiques, terrains de sports, espaces de loisirs) peuvent être utilisés comme bassins de stockage temporaire et contribuer au laminage des écoulements.

Pour tous ces cas, il est absolument nécessaire de prévoir les dispositions adéquates de mise en sécurité des zones exposées en cas de crue.

La figure 2 présente une illustration de deux stratégies de protection. La première solution consiste à traiter localement les problèmes d'inondation du village situé en amont, en élargissant la section d'écoulement du pont et en implantant une série d'endiguements. Ce type d'aménagement conduit malheureusement à reporter le problème en aval, en inondant un second village. Une analyse plus approfondie du risque d'inondation (aléa versus vulnérabilité) montre qu'il est plus avantageux de conserver un champ d'inondation en amont, tout en réalisant une protection localisée du premier village en rive gauche. Cet exemple est bien entendu schématique, mais il montre l'intérêt de diversifier les aménagements de protection en fonction du niveau de vulnérabilité et de raisonner à l'échelle globale du bassin versant pour analyser les effets induits des différents aménagements envisagés. La stratégie consistant à réduire au maximum les débordements de la rivière ne peut être développée à l'échelle globale du bassin versant, car elle conduit à accélérer les écoulements et à augmenter le débit de pointe en aval. Il faut donc s'efforcer, à partir de l'analyse au cas par cas des situations de débordement, de préserver les zones d'expansion dans les secteurs peu vulnérables, qui contribuent ainsi à soulager des secteurs sensibles, et de ne protéger que localement les zones à fort potentiel humain ou économique.

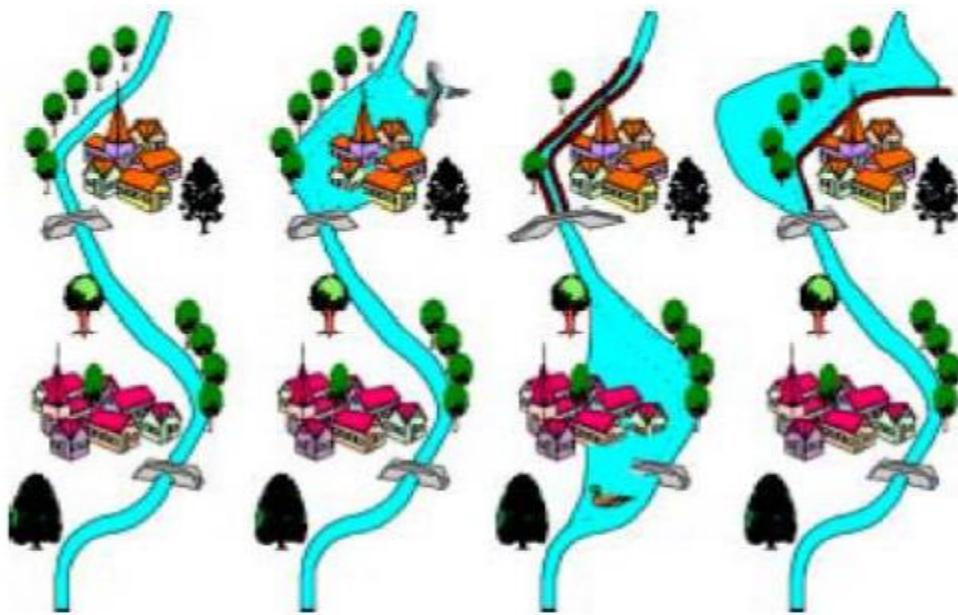


Figure 2. Comparaison de deux stratégies de protection contre les effets des inondations

Il est particulièrement recommandé de mener ce type de réflexion à l'occasion de projets d'infrastructures de transport qui traversent ou empruntent une vallée. L'objectif ordinaire est bien souvent la « transparence hydraulique », c'est à dire un impact minimum de l'infrastructure sur les lignes d'eau en crue. Or, il peut être intéressant de faire jouer, dans certains cas, un rôle de protection contre les inondations aux remblais longitudinaux ou transversaux, à la condition expresse qu'ils soient techniquement conçus pour cela.

En définitive, la stratégie de prévention des inondations doit s'intéresser à l'ensemble des enjeux concernés par les inondations sur le bassin versant, en considérant des niveaux de protection adaptés à chaque type d'occupation du sol. Il est par ailleurs important d'analyser le fonctionnement global du bassin versant, pour toute la gamme d'événements hydrologiques possibles, des crues fréquentes aux crues exceptionnelles. Ainsi, on ne se limitera pas à la crue de référence servant à définir un aménagement de protection ou de laminage ; il est important d'envisager les conséquences d'une crue supérieure, pour mettre en place, le cas échéant, d'autres stratégies de prévention (prévision des crues, plan d'évacuation d'urgence, restrictions sur l'usage du sol, réduction de la vulnérabilité des biens privés et des réseaux, neutralisation des ouvrages, .).

Des ouvrages peuvent être plus spécifiquement adaptés pour retenir temporairement les écoulements de crue ou pour éviter une concentration trop rapide des ruissellements. Des exemples de conception adaptée de remblais routiers et de chemins forestiers sont détaillés ci-dessous.

Les ouvrages de rétablissement sous chaussée des écoulements de petits bassins versants (Exemple : passages busés) peuvent être spécifiquement conçus et dimensionnés pour stocker temporairement de l'eau en amont du remblai routier et restituer un débit de pointe acceptable pour l'aval.

« La section de l'émissaire est volontairement réduite pour mobiliser le volume de retenue disponible en amont. L'entrée de l'émissaire doit être munie d'un dispositif de protection (grille), contre l'obturation par des corps flottants et autres résidus ».

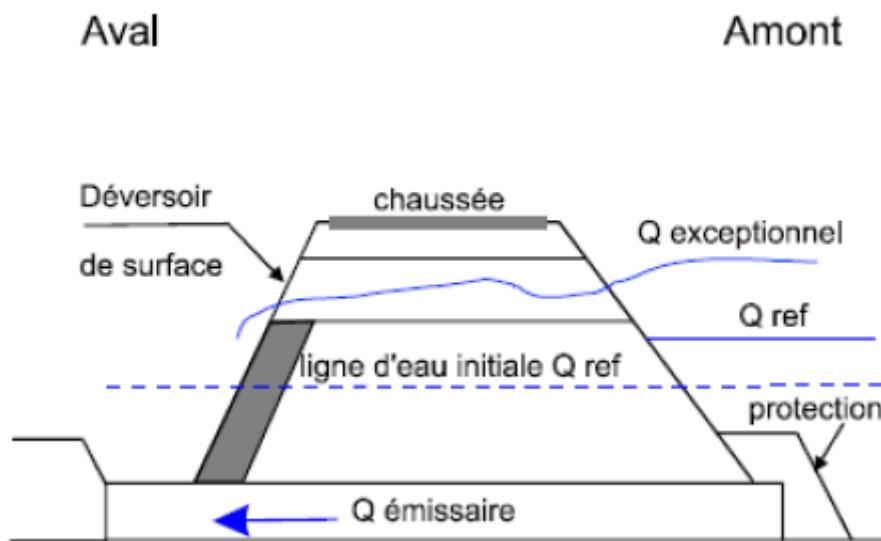


Figure 3. Coupe-type d'un remblai routier conçu comme ouvrage de retenue

Le fonctionnement de l'ouvrage au delà de la plage de dimensionnement doit être anticipé et les mesures de protection adéquates doivent être prises :

« Au delà de la crue de référence, un organe de surverse permet d'évacuer le volume excédentaire. Il peut être constitué par la chaussée elle-même, si son profil en long s'y prête (le remblai doit alors être aménagé pour résister à l'érosion liée aux écoulements), ou bien par un ouvrage spécifique (déversoir de surface implanté en amont de l'émissaire ou sous la chaussée) ».

5.3. Description des aménagements en lit majeur

Toute une gamme d'ouvrages est envisageable dans le lit du cours d'eau :

- barrages écrêteurs de crue, interceptant le cours d'eau ;
- remblais transversaux en lit majeur, conçus pour accompagner une contraction du lit mineur et permettant une mobilisation de champs d'expansion de crue;

- ouvrages de stockage implantés en lit majeur en dérivation du cours d'eau ;
- enfin, défenses passives sous forme d'endiguements protégeant des enjeux spécifiques.

Nous allons décrire successivement ces ouvrages, leur principe de fonctionnement et leur impact, sachant qu'un même aménagement de protection contre les inondations pourra, si nécessaire, combiner plusieurs d'entre eux.

5.3.1 Barrages en lit mineur

La solution de base consiste à construire un ouvrage dont la seule vocation est l'écrêtement des crues. Cet ouvrage est donc toujours vide sauf pendant les crues que l'on souhaite voir diminuées.

5.3.1.1 Principes de fonctionnement

Les barrages écrêteurs sont implantés en travers du thalweg et ont pour objet de stocker temporairement un certain volume dans le lit du cours d'eau, de façon à diminuer le débit de pointe de la crue en aval.

Le principe général de fonctionnement, dans le cas d'un barrage écrêteur sans vannes, est le suivant (Figure 4):

- Un pertuis de fond correctement dimensionné et protégé de l'obstruction par les flottants, permet de limiter le débit en aval, à une valeur compatible avec les enjeux à protéger contre l'inondation ; l'ouvrage est donc transparent pour les débits courants et pour les crues fréquentes ;
- Lorsque la capacité du pertuis est saturée, la retenue se remplit progressivement, ce qui permet de stocker temporairement une partie du volume de la crue ; le débit en aval augmente peu en fonction de la montée du niveau dans le réservoir (écoulement en charge) ; en fin de crue, le volume temporairement stocké dans la retenue se vide naturellement par le pertuis ; l'ouvrage écrête fortement les crues moyennes à rares ;
- En cas de très forte crue, lorsque la retenue est pleine, le déversoir de sécurité entre en fonction pour évacuer la différence entre le débit entrant dans la retenue et le débit transitant dans le pertuis (avec un effet complémentaire de laminage dans la tranche supérieure de la retenue) ; l'ouvrage perd de son efficacité pour les crues rares à exceptionnelles.

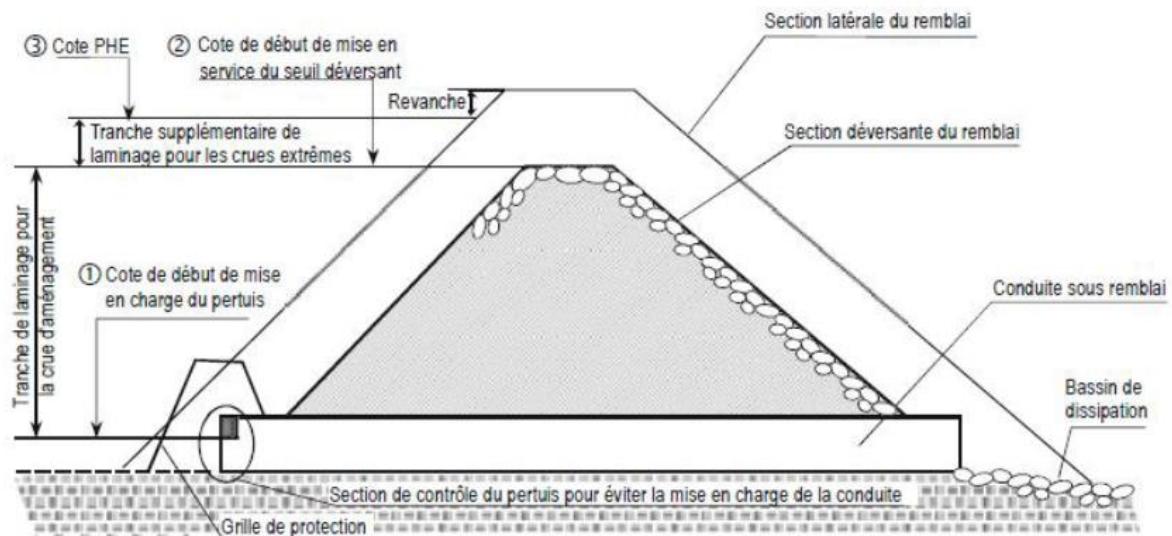


Figure 4. Schéma de fonctionnement d'un barrage écrêteur de crues

Un barrage écrêteur de crues a pour objectif de diminuer la valeur des débits de pointe en aval. Cet effet est très net pour les crues moyennes qui sont en général les plus morphogènes. Cela peut donc avoir des conséquences préjudiciables sur la géomorphologie du lit en aval : la stabilisation des chenaux d'écoulement en lit mineur, le développement de végétation et la fixation des sédiments, ce qui conduit à une diminution du transit de sédiments par charriage et à une diminution de la débitance du lit pour les crues rares (diminution du Strickler du fait de la végétation).

Un barrage écrêteur de crues a pour effet de diminuer les vitesses d'écoulement au passage dans la retenue, ce qui conduira à retenir une partie des sédiments transportés par charriage et des sédiments transportés en suspension. Cet effet est faible, car le fil d'eau du pertuis est au niveau du fil d'eau de la rivière (pas de plan d'eau permanent).

Les matériaux les plus fins provenant du transport en suspension seront rapidement remis en suspension à l'occasion des crues suivantes, même faibles. Les matériaux plus grossiers provenant du transport par charriage peuvent provoquer des petites accumulations durables. Un entretien périodique de la végétation susceptible de se développer sur ces atterrissements sera nécessaire pour que le contrôle hydraulique reste bien au niveau du pertuis. Cet entretien peut consister en une simple scarification de surface.

La conséquence de ce dépôt est un déficit de matériaux solides à l'aval de l'ouvrage qui va déclencher un mécanisme classique d'érosion progressive. Sous réserve de quelques précautions assez simples, un barrage à vocation unique d'écrêtage des crues et non vanné ne constitue pas une barrière à la mobilité des populations piscicoles.

Enfin, il convient d'envisager les conséquences d'une rupture éventuelle de ce type d'ouvrages, ce qui pourra conduire à son classement au titre de la sécurité publique.

5.3.1.2. Cas d'un barrage à vocation multiple

Il s'agit par exemple d'un ouvrage ayant également une vocation touristique, paysagère, écologique ou de soutien des étiages. Cependant, sauf pour les retenues de très grand volume qui ne sont pas l'objet de ce chapitre, la vocation principale d'écrêtement des crues est en général assez peu compatible avec d'autres usages du barrage.

Pour arriver à cette fin, le pertuis peut être placé au point bas de la retenue et équipé d'une vanne, ou bien il peut être calé à une cote plus haute. Le principe général de fonctionnement évoqué plus haut est plus sophistiqué lorsque le pertuis est équipé de vannes, et cela exige alors une présence humaine pendant la crue, même en cas de dispositifs automatiques. La gestion est très délicate en cas de crue survenant alors que la retenue est partiellement pleine, ou en cas de crue à double pointe.

Si le barrage écrêteur de crues est situé sur un cours d'eau à fort transport sédimentaire, le plan d'eau permanent en fond de retenue va rapidement se combler par piégeage du transport solide de charriage et d'une partie du transport de suspension. Le stockage des matériaux charriés entraîne un déficit en matériaux solides dans le cours d'eau aval et génère donc une érosion progressive dont les conséquences peuvent être dommageables en particulier sur le niveau de la nappe.

Les effets d'une retenue à niveau constant sur la qualité de l'eau seront liés essentiellement à l'eutrophisation. Si l'eau alimentant la retenue est riche en nitrates et/ou phosphates, le plan d'eau devient alors un milieu propice à l'accélération du processus d'eutrophisation, qui se manifeste par le développement estival d'algues, avec un impact visuel et, le cas échéant, olfactif. Ce développement est d'autant plus fort que la retenue à niveau constant est en général de faible profondeur, ce qui favorise l'élévation de température.

Un plan d'eau à niveau constant, de faible profondeur et à très faible marnage, est très propice au développement des plantes aquatiques. Ce développement se produit quelques années après la mise en service, par apport de graines par voie naturelle ou anthropique. Le principal facteur de répartition des espèces est la profondeur de l'eau. La composition physicochimique de l'eau et des sédiments influencent également les espèces, qui sont donc un indicateur du niveau trophique de l'écosystème aquatique.

Toujours dans le cas d'un plan d'eau à niveau constant en fond de retenue, l'élévation de température et l'eutrophisation vont entraîner une diminution de la teneur en oxygène avec un

risque de mortalité piscicole. Ces phénomènes seront d'autant plus marqués que le débit naturel du cours d'eau est faible en été et, donc, que l'eau se renouvelle peu dans la retenue. Enfin, un barrage à vocation multiple comportant un plan d'eau à niveau constant en fond de retenue constitue une barrière à la mobilité des populations piscicoles.

5.3.2. Ouvrages de mobilisation des champs d'expansion des crues

Sans modifier le profil en long et le fond du lit mineur, on aménage un rétrécissement de section pour augmenter la ligne d'eau en crue. Parallèlement, des remblais barrant le lit majeur sont construits de part et d'autre du lit mineur, pour mobiliser des champs d'expansion de crue. Le principe de fonctionnement de ces ouvrages est donc assez semblable à celui décrit pour les barrages écrêteurs. Il s'en distingue par un fonctionnement beaucoup plus continu et plus proche du fonctionnement naturel avant aménagement. Les impacts sont également plus limités.

Un franchissement routier ou ferroviaire, avec le pont et ses remblais d'accès, peut jouer ce rôle, à condition expresse qu'il ait été prévu et conçu à cet effet, tant dans ses dispositions constructives que dans ses modalités de gestion (nécessité d'une convention entre le maître d'ouvrage de la voie et le gestionnaire de la rivière).

Pour les débits courants et les crues fréquentes restant contenues dans le lit mineur, l'aménagement ne provoque aucune modification par rapport au fonctionnement naturel du cours d'eau.

Pour les crues plus importantes, le rétrécissement du lit créé par l'ouvrage provoque un rehaussement de la ligne d'eau et accroît l'importance de l'inondation du lit majeur. Les remblais latéraux barrent les écoulements en lit majeur et permettent le stockage temporaire d'un volume d'autant plus important que la surface inondée est étendue.

Le volume temporairement stocké est restitué progressivement à la décrue.

Ce type d'ouvrage fonctionne de façon totalement passive sans intervention humaine.

Le fond et les flancs de la section de rétrécissement du lit mineur doivent être protégés du risque d'érosion lié à la vitesse du courant à cet endroit. Les remblais latéraux doivent être équipés de dispositifs de surverse en cas de crue rare ou exceptionnelle dépassant les capacités de stockage des champs d'expansion ainsi délimités.

Le principal impact de ce type d'aménagement est d'entraîner des sur-hauteurs d'inondation dans les champs d'expansion des crues, ce qui se traite habituellement par une indemnisation des exploitants agricoles des zones concernées.

Le fonctionnement très progressif de ce type d'aménagement, pratiquement inefficace pour les crues fréquentes permet aux riverains en aval de ne pas perdre la mémoire des crues.

De même, pour les fortes crues, il n'y a pas de discontinuité dans le fonctionnement, tel qu'on peut l'observer sur un barrage écrêteur lorsque l'évacuateur de surface entre en service.

Dans la zone de resserrement du lit, l'augmentation locale de la vitesse pourra causer des érosions du lit, et il convient de s'en prémunir par des protections appropriées. Ces dispositions étant prises, le lit mineur est peu (voire pas du tout) modifié et il n'y a pas non plus de modification du transport de sédiments par charriage ; l'impact sur la géomorphologie est donc très réduit. Seuls les transports par suspension sont modifiés, les faibles vitesses dans les champs d'expansion favorisant le dépôt de ces sédiments. L'effet peut être négatif à court terme (herbages et cultures « salies »), mais bénéfique à long terme (limons fertiles).

Ce type d'aménagement n'a, a priori, que peu d'impact sur la vie aquatique de la rivière et sur son fonctionnement biologique.

5.3.3. Ouvrages de stockage en dérivation

Contrairement aux barrages écrêteurs, ces bassins de stockage sont implantés en lit majeur, voire dans la plaine au delà du lit majeur. Ils sont alimentés en dérivation du cours d'eau, par un ouvrage de prise et par un chenal d'amenée. L'ouvrage de prise est en général constitué :

- d'une section rétrécie de la rivière, jouant le rôle de section de contrôle ;
- d'un seuil latéral calé à une cote judicieusement choisie et permettant l'alimentation du chenal d'amenée aux bassins ;
- d'un dispositif de limitation du débit dérivé vers les bassins, à une valeur au plus égale à la capacité des ouvrages de trop plein de ces bassins.

Les bassins sont aménagés par creusement du terrain naturel, par construction de digues ou par une solution mixte entre les deux précédentes. On peut également profiter d'anciennes gravières, réaménagées en plan d'eau et dont on va chercher à mobiliser une tranche supérieure pour l'écrêtement des crues. Les bassins sont le plus souvent implantés en cascade, le remplissage se faisant successivement de l'amont vers l'aval par déversement sur un seuil aménagé à cet effet. Le seuil déversant du bassin situé le plus en aval de la série renvoie les eaux excédentaires vers le lit mineur, le cas échéant via un chenal. Chacun des bassins est équipé d'une conduite de vidange par laquelle le volume temporairement stocké pendant la crue est ensuite restitué à la rivière.

Le principe général de fonctionnement est le suivant (figure 5.5 ci-dessous) :

- Les débits courants et les crues fréquentes, non préjudiciables pour les enjeux situés en aval, transitent dans le lit mineur du cours d'eau sans surverse sur le seuil de dérivation ;
- Lorsque le niveau de la rivière au droit de l'ouvrage de dérivation dépasse la cote du seuil, une partie du débit est dérivée vers les bassins qui se remplissent successivement selon le volume total dérivé. En fin de crue, le volume temporairement stocké dans les bassins se vide par les vidanges ;
- En cas de très forte crue, le dispositif de limitation des débits dérivés entre en jeu pour protéger les bassins d'une surverse généralisée. La plus grande partie du débit reste alors dans le lit principal et l'aménagement perd de son efficacité pour ces très fortes crues. Ce dispositif, qui assure la sécurité des bassins de stockage, doit être conçu pour rester totalement fonctionnel en cas de crues exceptionnelles.

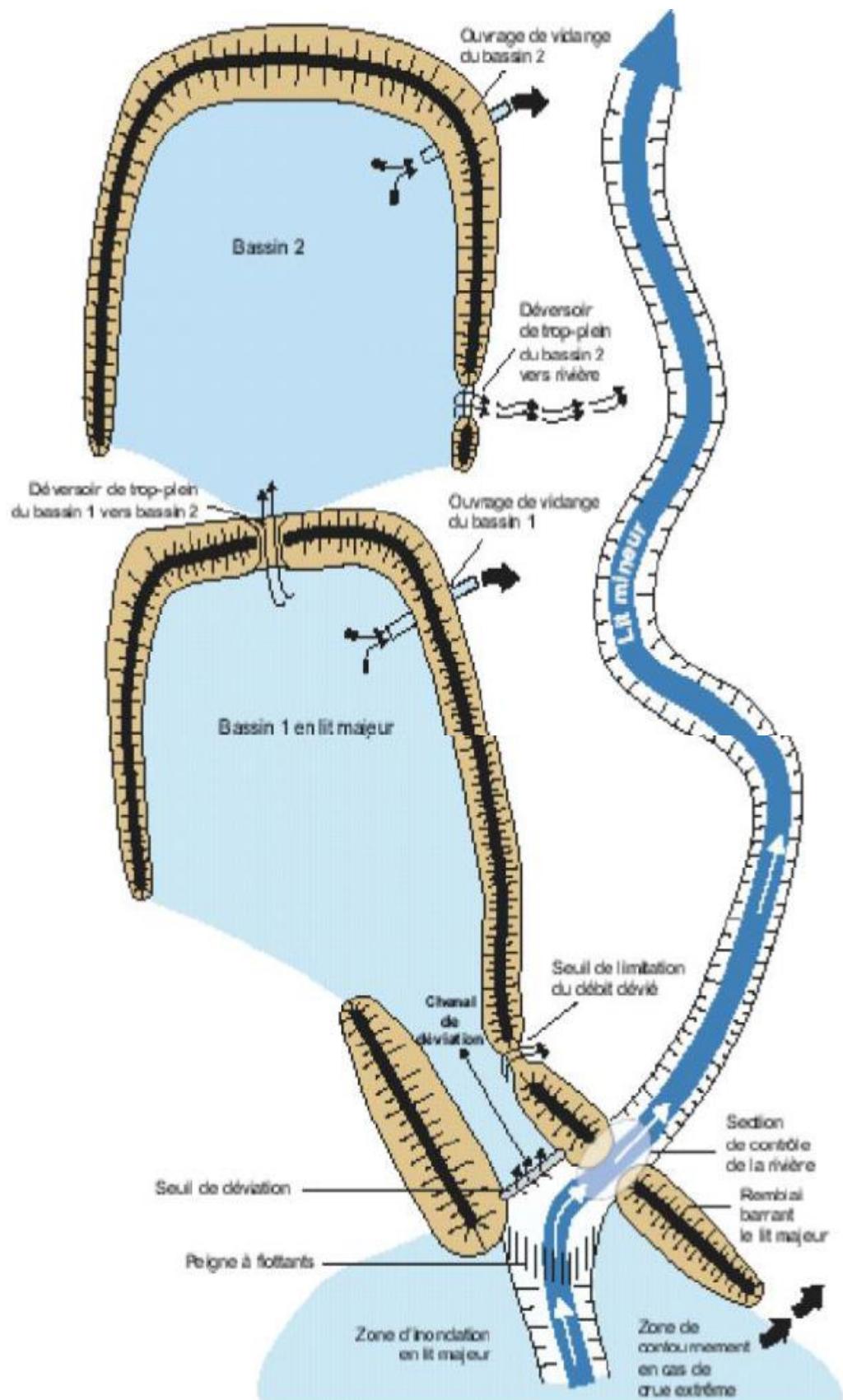


Figure 5. Fonctionnement hydraulique d'ouvrages de stockage en dérivation

Dans le cas d'ouvrages non creusés, mais constitués à l'aide d'endiguements de ceinture, il est tout à fait possible de conserver la vocation agricole ou forestière des terrains. Le Maître d'ouvrage a alors le choix entre acheter les terrains et concéder leur exploitation, ou convenir avec les propriétaires d'un mécanisme d'indemnisation en cas de remplissage des bassins.

5.3.4. Ouvrages de protection rapprochée

Il s'agit de digues destinées à protéger de l'inondation des zones où sont présents des enjeux importants tels qu'habitations, zones commerciales et industrielles, infrastructures.

Contrairement aux ouvrages décrits plus haut, les digues ont pour effet de soustraire une partie du lit majeur à l'expansion de la crue. En conséquence, on aura un rehaussement local de la ligne d'eau, d'autant plus important que la surface endiguée est étendue.

La hauteur de la digue est déterminée à partir de la ligne d'eau pour l'événement hydrologique de référence pris en compte dans l'aménagement, à laquelle on rajoute une revanche pour de prémunir de l'effet des vagues.

L'hypothèse d'une crue dépassant l'événement de référence doit absolument être pris en compte. Cela se traduit par l'aménagement d'un déversoir sur une partie de la digue, dans une zone minimisant le préjudice possible aux enjeux protégés.

En cas de survenance d'une crue rare à exceptionnelle, la zone endiguée sera alors noyée par une inondation assez rapide, mais cependant moins brutale que celle qui produirait une rupture de la digue liée à une surverse dans une zone non prévue à cet effet. Dans le cas de mise en service du déversoir, la population doit pouvoir évacuer rapidement la zone qui va être inondée, ce qui nécessite des itinéraires de repli, calés à une cote supérieure aux crues, et une préparation dans le cadre d'un plan de secours périodiquement actualisé et testé.

5.4. Dimensionnement hydraulique d'un barrage écrêteur de crues

5.4.1. Le pertuis de fond

En pied amont du barrage, on réalise un pertuis dont la section est déterminée de façon à laisser passer les débits courants et les crues fréquentes, non dommageables pour l'aval. Au delà de ce débit, le pertuis commence à se mettre en charge, et la retenue commence à se remplir. L'efficacité optimale de ce type de barrage est obtenue en calculant la dimension du pertuis de telle sorte que le débit à retenue pleine (juste avant déversement sur le seuil de surface) soit voisin du débit de plein bord dans les zones aval où le débordement est dommageable. La section du pertuis peut être déterminée par la relation :

$$Q = c \cdot S \cdot \sqrt{2gH}$$

Avec :

Q [m³/s] : débit de plein bord en aval dans les zones à enjeux significatifs ;

c : coefficient de débit du pertuis (de 0,6 pour un entonnoir non profilé à 0,85 pour un entonnoir très bien profilé) ;

S [m²] : section du pertuis ;

H [m] : charge hydraulique définie comme la différence de cote entre le niveau amont juste avant déversement et l'axe du pertuis, si le débouché aval n'est pas en charge ; sinon, c'est la différence charge amont, Charge aval ;

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

On est souvent tenté de limiter plus radicalement le débit en aval, en réduisant la section du pertuis. C'est une erreur grave. En effet, si l'on est alors très efficace pour les petites crues, c'est au détriment d'une moindre efficacité pour les fortes crues ; la limitation du débit relâché à l'aval lors de la montée de la crue va conduire à un remplissage plus rapide de la retenue qui ne disposera plus de capacité pour écrêter la pointe.

Enfin, il faut vérifier si le pertuis ne risque pas d'être obstrué par l'amoncellement de corps flottants. Ce risque sera plus fort pour les rivières étroites. Les recommandations du Comité français des grands barrages sont les suivantes :

- passage libre d'au moins 10 à 15 m ;
- garde d'air sous une passerelle d'au moins 1,5 à 2 m.

Pour des dimensions inférieures, il est essentiel d'installer, légèrement en amont du pertuis, un dispositif de piégeage des corps flottants ou charriés par le courant. Ce dispositif doit être positionné légèrement en amont du pertuis, avoir une section libre plusieurs fois supérieure à la section du pertuis et l'espacement optimal entre barreaux est de l'ordre de 30 à 40% du diamètre du pertuis, sous réserve d'autres considérations liées par exemple à la sécurité du public. Le dispositif recommandé est une cage autour du pertuis, plutôt qu'une simple grille.

5.4.2 La conduite

Dans le cas d'un barrage en remblai, le pertuis se prolonge par une conduite sous remblai.

Sauf si la longueur de la conduite est très faible, il est recommandé de dimensionner la conduite (diamètre et pente) pour que l'écoulement s'y fasse à surface libre. Pour des conduites de grande longueur, on prévoira un dispositif d'aération (reniflard) débouchant à l'aval immédiat du pertuis et avec prise d'air au niveau de la crête du barrage dans sa partie non déversante.

Si l'on opte pour un écoulement en charge dans la conduite (ce qui se traduit par un diamètre moins important), le calcul de la capacité du pertuis doit prendre en compte les pertes de charge dans la conduite. La conduite doit alors être parfaitement étanche, même en charge, ce qui implique le choix d'une conduite en acier ou en béton à âme tôle soudée.

5.4.3 Le déversoir de sécurité

Pour les crues rares et au delà, la retenue va se remplir complètement et le déversoir de sécurité va entrer en service pour le transit du débit excédentaire. Ce déversoir doit être équipé d'un seuil à surface libre. Le choix d'un ouvrage avec pertuis ou puits et galerie est à prohiber, car sa capacité est limitée à partir de sa mise en charge, contrairement à l'ouvrage à seuil libre dont la capacité est plus que proportionnelle à la charge hydraulique.

Le dimensionnement du seuil se fait au moyen de la formule suivante :

$$Q = \mu \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

Où :

Q [m³/s] : débit maximum susceptible de transiter sur le seuil ;

μ : coefficient de débit du seuil, qui varie entre 0,32 et 0,5 (voire 0,55) selon que le seuil est mal ou bien profilé et selon la charge hydraulique ;

L [m] : longueur du seuil ;

h [m] : charge hydraulique sur le seuil ;

$g = 9,81$ m/s²

Cette formule est applicable tant que l'écoulement reste dénoyé c'est à dire tant que

$h' < 2.h / 3$ car alors l'écoulement au droit du seuil n'est pas influencé par le tirant d'eau aval.

h' désigne la charge à l'aval du seuil, mesurée par rapport à la crête du seuil.

Lorsque $h' > 2.h / 3$, l'écoulement au droit du seuil est dit noyé. La loi devient :

$$Q = \mu' \cdot L \cdot h' \cdot \sqrt{2g(h - h')}$$

Avec

$$\mu' = \frac{3\sqrt{3}\mu}{2}$$

Il est important de faire ce distinguo, car pour un même débit, la charge amont est supérieure à celle qui aurait été obtenue pour un écoulement dénoyé.

Le débit maximum susceptible de transiter sur le seuil est calculé, en tenant compte du laminage, à partir d'une série d'hydrogrammes représentatifs des crues extrêmes correspondant à des périodes de retour de 1 000 à 10 000 ans, selon le type et la taille du

barrage. Le seuil libre se prolonge par un coursier sur le parement aval du barrage et par un bassin de dissipation d'énergie, jusqu'à rejoindre le terrain naturel. Ces ouvrages se dimensionnent selon les règles de l'art en vigueur.

5.5. Dimensionnement hydraulique d'un ouvrage de mobilisation du lit majeur

Dans le cas où la section de rétrécissement du lit est une section de contrôle sur le plan hydraulique, on peut alors considérer qu'il y a passage à la profondeur critique dans cette section. On conserve la charge spécifique (en fond supposé horizontal) et on s'appuie sur la profondeur critique $Y_c(Q)$ à l'aval.

La profondeur critique s'obtient en écrivant que le nombre de Froude est égal à 1 dans cette section, soit :

$$Q = S_c \cdot \sqrt{g \cdot \frac{S_c}{L}}$$

où

Q : débit en m^3/s

S_c : section mouillée en m^2

L : largeur au miroir en m

En fonction de la géométrie de la section de contrôle, on peut donc calculer la relation liant Q et Y_c .

La charge Y_A à l'amont de la section rétrécie s'exprime par :

$$Y_A = Y_c + \frac{Q^2}{2g \cdot S_c^2}$$

Ceci permet d'établir point par point la courbe liant la charge amont Y_A et le débit Q . Une vérification finale est nécessaire pour s'assurer que l'hypothèse de présence d'une section de contrôle était bien valable. Cela consiste à vérifier que $Y_c(Q) < 2/3 Y_A(Q)$.

Connaissant la topographie de la zone d'expansion de crue en amont de la section rétrécie, on calcule la relation entre la charge Y_A (transformée en cote) et le volume stocké. A partir des hydrogrammes déterminés par l'étude hydrologique, on effectue alors des simulations en régime transitoire permettant de calculer le laminage obtenu pour toute la gamme des crues passées en revue.

Cela permet de définir la cote atteinte dans le champ d'expansion de crue pour l'événement de référence. La cote de crête des remblais barrant le lit majeur s'obtient en ajoutant à la cote de l'eau une revanche pour se prémunir de l'effet des vagues (valeur courante de 0,6 à 1,0 m). Enfin, pour éviter la surverse au-dessus des remblais lors d'une crue dépassant la crue de référence, il convient d'aménager une zone de déversement ou de contournement de ces remblais. La solution la plus simple est de ménager une zone basse en extrémité de remblai au point de raccordement avec le terrain naturel en rive. La cote de déversement dans cette zone sera calée à la cote de l'eau pour l'événement de référence.

5.6. Dimensionnement hydraulique de bassins en dérivation

5.6.1. La section de contrôle du cours d'eau

La section de contrôle du cours d'eau consiste à utiliser un rétrécissement existant du lit mineur ou à le créer, de façon à disposer d'une section dont la loi hauteur débit est connue.

Compte tenu de l'accélération des vitesses au droit de la section de contrôle, il est nécessaire de protéger le fond et les berges par des enrochements maçonnés. On s'affranchit partiellement de ce type de protection si la section de contrôle correspond à un seuil rocheux dans le lit.

Il est formellement déconseillé d'aménager une section de contrôle au moyen d'un pertuis, car à partir de la mise en charge de ce dernier, le niveau amont augmentera très vite en fonction du débit de la rivière, avec un report du quasi totalité du débit excédentaire vers l'ouvrage de dérivation.

5.6.2 Le seuil de dérivation

Cet ouvrage est implanté en amont de la section de contrôle, sur une des berges du cours d'eau. Il entre en fonctionnement à partir du moment où le débit dans la rivière est proche du débit de début de débordement dans les zones aval concernées par des enjeux significatifs.

Il s'agit le plus souvent d'un seuil libre fixe, marqué par une poutre en béton ou en bois en élévation par rapport au fond du chenal de dérivation, de façon à disposer d'une section dont la loi hydraulique est connue, la formule suivante étant valable pour un seuil dénoyé :

$$Q = \mu \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}$$

Où : μ : coefficient de débit du seuil qui varie entre 0,32 et 0,50 (voire 0,55) selon que le seuil est mal ou bien profilé et selon la charge sur le seuil ;

L [m] : longueur du seuil ;

h [m] : charge hydraulique sur le seuil ;

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Le seuil peut être équipé d'un clapet, ce qui permet d'une part de retarder la mise en service de la dérivation, mais surtout d'augmenter très rapidement le débit dérivé dès lors que le clapet s'abaisse. Latéralement, le seuil est protégé par des bajoyers adaptés aux caractéristiques de vitesse de l'écoulement.

5.6.3 Le dispositif de limitation du débit dérivé

Il convient absolument d'assurer la cohérence hydraulique globale du système, c'est-à-dire d'adapter la capacité du canal d'aménée au volume du bassin, puis de dimensionner les organes de trop plein en fonction du débit entrant après laminage.

Une fois connu le volume de stockage disponible dans le bassin, il faut pouvoir limiter en conséquence le débit maximum dérivable. Cela peut s'obtenir de deux façons :

- soit l'ouvrage de dérivation est directement limitant dans son débit, ce qui peut

S'obtenir au moyen d'un ouvrage en pertuis ; dans ce cas, le débit augmente rapidement avec le niveau amont jusqu'à la mise en charge du pertuis, puis au delà le débit n'augmente plus que marginalement ;

- soit l'ouvrage de dérivation est un seuil libre, et dans ce cas il faut construire, le plus en amont possible dans le chenal de dérivation, un seuil latéral restituant directement à la rivière les débits excédentaires par rapport à la capacité des déversoirs de trop plein des bassins.

5.6.4. Le chenal de dérivation

Il est en général créé par simple terrassement du terrain naturel, soit en creusement, soit en endiguements, soit par un profil mixte qui permet d'optimiser l'équilibre déblais remblais.

Il est dimensionné pour permettre l'écoulement de toute la gamme des débits dérivés vers les bassins (formule de Manning. Strickler). On cherchera, par une faible pente, à limiter la vitesse de l'eau, ce qui permettra de s'affranchir de protéger ce chenal, si ce n'est par une simple végétalisation, dont on surveillera qu'elle n'évolue pas vers un embroussaillement qui serait alors nuisible au bon écoulement de l'eau.

5.6.5. Les ouvrage de trop plein des bassins

Pour les crues moyennes à rares, la capacité de stockage des bassins va introduire un effet important de laminage qui conduit à une marge de sécurité supplémentaire avant le

déversement. Mais il faut aussi envisager le cas d'une crue rare à exceptionnelle, dont le débit de pointe survient alors que les bassins sont déjà remplis. Le débit à évacuer sur le déversoir de trop plein sera alors peu inférieur au débit entrant. Ces déversoirs de trop plein doivent donc être dimensionnés pour un débit du même ordre de grandeur que le débit maximum susceptible d'être amené par le chenal de dérivation, compte tenue des dispositions décrites au point précédent.

Dans tous les cas, les ouvrages de trop plein seront des déversoirs à seuil libre fixe, prolongés par un coursier et, le cas échéant, par un bassin de dissipation d'énergie, jusqu'à rejoindre le terrain naturel.

A partir du débit maximum déterminé tel qu'indiqué ci-dessus, et avec la loi hauteur débit sur un seuil libre, on détermine la cote des plus hautes eaux dans les bassins. Au delà de cette cote, il convient, pour calculer la cote de crête des digues, de rajouter une revanche pour se prémunir contre l'effet des vagues et des éventuels tassements des remblais. En zone méditerranéenne, on prendra également en compte la pluie directe sur le plan d'eau. La revanche minimale est de 0,40 m.

Le fonctionnement de bassins en dérivation est plus complexe que celui d'un barrage écrêteur ou d'un ouvrage de mobilisation du lit majeur. La conception et le dimensionnement de ce type d'aménagement sont donc encore plus délicats et il est indispensable d'en examiner le fonctionnement dans toute la gamme des événements hydrométéorologiques, en envisageant aussi les dysfonctionnements possibles (obstructions par des flottants, blocage de vanne, etc.).

5.7. Digue de protection

La hauteur de la digue est déterminée à partir de la ligne d'eau pour l'événement hydrologique de référence pris en compte dans l'aménagement, à laquelle on rajoute la charge hydraulique liée au fonctionnement du déversoir en cas de crue exceptionnelle plus une revanche pour de prémunir de l'effet des vagues. L'hypothèse d'une crue dépassant l'événement de référence doit absolument être pris en compte. Cela se traduit par l'aménagement d'un déversoir sur une partie de la digue, dans une zone minimisant le préjudice possible aux enjeux protégés. Selon l'importance des enjeux protégés par la digue, on dimensionnera le déversoir pour un événement de période de retour compris entre 500 et 1000 ans, voire plus si des enjeux majeurs le justifient.