

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**

Septembre 2004

Le ralentissement dynamique pour la prévention des inondations

Aménagements associant l'épandage des crues dans le lit
majeur et leur écrêtement dans de petits ouvrages

| | |
|---|-----------|
| PRÉAMBULE | 6 |
| AVERTISSEMENT : CIBLES ET LIMITES DU GUIDE | 7 |
| 1 LES CONCEPTS DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE | 11 |
| 1.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX | 11 |
| 1.2 APPLICATION AU DOMAINE DES INONDATIONS | 13 |
| 1.3 LES DIFFÉRENTS TYPES D'AMÉNAGEMENT | 14 |
| 1.4 DES CONDITIONS D'EMPLOI BIEN DÉFINIES..... | 16 |
| 2 INTÉGRATION DES OUTILS DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE DANS UNE STRATÉGIE DE BASSIN VERSANT..... | 17 |
| 2.1 LES DIFFERENTS VOILETS D'ACTION POUR LA REDUCTION DES EFFETS DES INONDATIONS... | 18 |
| 2.2 QUELS ENJEUX PROTÉGER ? VIS-À-VIS DE QUELS ÉVÉNEMENTS ? | 19 |
| 2.3 LES ÉTUDES DE BASE POUR LA DÉFINITION D'UNE STRATÉGIE DE PROTECTION..... | 21 |
| 2.3.1 <i>Etude hydrologique à l'échelle du bassin versant</i> | 22 |
| 2.3.2 <i>Etude topographique</i> | 24 |
| 2.3.3 <i>Etudes géomorphologique et hydrogéologique</i> | 24 |
| 2.3.3.1 Etude hydrogéomorphologique | 25 |
| 2.3.3.2 Etude morphodynamique (d'après [LINO, 2000])..... | 28 |
| 2.3.3.3 Etude hydrogéologique..... | 28 |
| 2.3.4 <i>Etude hydraulique d'ensemble.....</i> | 29 |
| 2.3.5 <i>Approche économique ; choix et mise en œuvre d'une stratégie de prévention.....</i> | 30 |
| 2.4 L'ACCEPTATION DES PROJETS ET LA CONDUITE DE LA NÉGOCIATION | 34 |
| 2.4.1 <i>Objectifs.....</i> | 34 |
| 2.4.2 <i>Démarches proposées.....</i> | 35 |
| 2.4.2.1 Préalable..... | 35 |
| 2.4.2.2 Mise en œuvre | 35 |
| 2.5 LES INTERVENANTS ET L'ORGANISATION DU PROJET | 37 |
| 2.5.1 <i>La phase de définition d'une stratégie.....</i> | 37 |
| 2.5.1.1 La maîtrise d'ouvrage..... | 37 |
| 2.5.1.2 L'assistance technique au maître d'ouvrage | 37 |
| 2.5.1.3 Les bureaux d'études | 37 |
| 2.5.2 <i>La phase de réalisation des aménagements</i> | 37 |
| 2.5.2.1 La maîtrise d'ouvrage..... | 37 |
| 2.5.2.2 L'assistance technique au maître d'ouvrage | 38 |
| 2.5.2.3 La maîtrise d'oeuvre..... | 38 |
| 2.5.3 <i>La phase d'exploitation des aménagements</i> | 38 |
| 2.6 QUELS AMÉNAGEMENTS EN VERSANT ET AVANT LE LIT DU COURS D'EAU | 38 |
| 2.6.1 <i>Occupation du sol en versant</i> | 39 |
| 2.6.2 <i>Obstacles transverses</i> | 39 |
| 2.6.2.1 Remblais routiers ou ferroviaires..... | 39 |
| 2.6.2.2 Chemins forestiers | 40 |
| 2.6.3 <i>Cas particulier : incidence des réseaux de drainage existants sur le régime des crues</i> | 41 |
| 2.6.4 <i>Dérivation des réseaux primaires vers les versants</i> | 42 |
| 2.6.5 <i>Intervenir en lit mineur ?.....</i> | 43 |
| 2.6.5.1 Ripisylves et bourrelets de berge..... | 43 |
| 2.6.5.2 Pièges à embâcles | 44 |
| 2.7 DESCRIPTION DES AMÉNAGEMENTS EN LIT MAJEUR | 44 |
| 2.7.1 <i>Barrages en lit mineur.....</i> | 45 |
| 2.7.1.1 Principes de fonctionnement..... | 45 |
| 2.7.1.2 Impacts | 46 |
| 2.7.1.3 Cas d'un barrage à vocation multiple | 47 |
| 2.7.2 <i>Ouvrages de mobilisation des champs d'expansion des crues.....</i> | 47 |
| 2.7.2.1 Principes de fonctionnement..... | 47 |
| 2.7.2.2 Impacts | 48 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.7.3 | <i>Ouvrages de stockage en dérivation</i> | 49 |
| 2.7.3.1 | Description et principes de fonctionnement..... | 49 |
| 2.7.3.2 | Impacts..... | 50 |
| 2.7.4 | <i>Ouvrages de protection rapprochée</i> | 51 |
| 2.8 | LE CHOIX DES MODALITÉS DE FONCTIONNEMENT DES OUVRAGES..... | 51 |
| 2.8.1 | <i>Gestion saisonnière</i> | 52 |
| 2.8.2 | <i>Gestion en crue</i> | 52 |
| 3 | DIMENSIONNEMENT DES AMÉNAGEMENTS DE RALENTISSEMENT DYNAMIQUE EN LIT MAJEUR | 54 |
| 3.1 | ETUDE HYDROLOGIQUE..... | 54 |
| 3.1.1 | <i>Dimensionnement direct du volume de retenue</i> | 54 |
| 3.1.2 | <i>Approche par simulation d'hydrogrammes</i> | 54 |
| 3.1.3 | <i>Analyse de l'effet des aménagements sur le phasage des crues dans le bassin versant</i> | 55 |
| 3.2 | ETUDE HYDRAULIQUE..... | 55 |
| 3.2.1 | <i>Objectifs de l'étude hydraulique</i> | 55 |
| 3.2.2 | <i>Modélisation numérique</i> | 56 |
| 3.2.2.1 | Les différents types de modélisation possibles..... | 56 |
| 3.2.2.2 | Les données nécessaires..... | 58 |
| 3.2.3 | <i>Exploitation du modèle numérique</i> | 62 |
| 3.2.3.1 | Simulation de divers scénarios d'aménagement..... | 62 |
| 3.2.3.2 | Simulation de divers scénarios hydrométéorologiques..... | 63 |
| 3.2.3.3 | Vérification du fonctionnement au delà du fonctionnement nominal..... | 63 |
| 3.3 | ETUDES DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL..... | 63 |
| 3.3.1 | <i>Dimensionnement hydraulique d'un barrage écrêteur de crues</i> | 64 |
| 3.3.1.1 | Le pertuis de fond..... | 64 |
| 3.3.1.2 | La conduite..... | 64 |
| 3.3.1.3 | Le déversoir de sécurité..... | 65 |
| 3.3.2 | <i>Dimensionnement hydraulique d'un ouvrage de mobilisation du lit majeur</i> | 66 |
| 3.3.3 | <i>Dimensionnement hydraulique de bassins en dérivation</i> | 67 |
| 3.3.3.1 | La section de contrôle du cours d'eau..... | 67 |
| 3.3.3.2 | Le seuil de dérivation..... | 67 |
| 3.3.3.3 | Le dispositif de limitation du débit dérivé..... | 68 |
| 3.3.3.4 | Le chenal de dérivation..... | 68 |
| 3.3.3.5 | Les ouvrages de trop plein des bassins..... | 68 |
| 3.3.3.6 | Conclusions sur le dimensionnement de bassins en dérivation..... | 69 |
| 3.3.4 | <i>Dimensionnement de digues de protection</i> | 69 |
| 3.3.5 | <i>Etudes géotechniques et dimensionnement géomécanique</i> | 69 |
| 3.4 | ENTRETIEN ET SURVEILLANCE DES OUVRAGES..... | 70 |
| 3.4.1 | <i>Les barrages écrêteurs et les ouvrages de mobilisation du lit majeur</i> | 71 |
| 3.4.2 | <i>Les ouvrages de stockage en dérivation et les digues</i> | 72 |
| 3.4.3 | <i>Les organes vannés</i> | 72 |
| 3.4.4 | <i>Le contrôle des ouvrages</i> | 73 |
| 3.5 | ANALYSE DES RISQUES DE DÉFAILLANCE..... | 73 |
| 3.6 | COMPARAISON ÉCONOMIQUE DE DIMENSIONNEMENTS D'OUVRAGES..... | 75 |
| 3.6.1 | <i>Horizon temporel et aversion au risque dans les calculs économiques</i> | 75 |
| 3.6.2 | <i>Evaluation des coûts des dispositifs de prévention</i> | 75 |
| 3.6.3 | <i>Evaluation des dommages des inondations</i> | 76 |
| 3.6.3.1 | Dommages directs et indirects aux propriétés urbaines..... | 76 |
| 3.6.3.2 | Dommages aux activités semi-permanentes..... | 77 |
| 3.6.3.3 | Dommages directs et indirects aux activités..... | 77 |
| 3.6.3.4 | Dommages directs et indirects aux équipements (hors réseaux) et à l'agriculture..... | 77 |
| 3.6.4 | <i>Un exemple de comparaison économique de dimensionnements d'ouvrages</i> | 78 |
| 3.6.4.1 | Situation examinée..... | 78 |
| 3.6.4.2 | Présentation des différents scénarios de protection envisagés..... | 78 |
| 3.6.4.3 | Evaluation des coûts..... | 79 |
| 4 | CONTEXTE ADMINISTRATIF ET REGLEMENTAIRE | 81 |
| 4.1 | LE PROJET D'INTÉRÊT GÉNÉRAL..... | 81 |

| | | |
|--|---|------------|
| 4.2 | LE RÉGIME D'AUTORISATION OU DE DÉCLARATION AU TITRE DE LA POLICE DE L'EAU..... | 82 |
| 4.3 | DISPOSITIONS SPÉCIFIQUES À L'INTERVENTION DES COLLECTIVITÉS LOCALES : LA D.I.G .. | 83 |
| 4.4 | ARTICULATION ENTRE LES DIVERSES PROCÉDURES AUXQUELLES LE PROJET PEUT ÊTRE SOUMIS..... | 83 |
| 4.5 | ARTICULATION ENTRE LES DIFFÉRENTS DOCUMENTS ÉVALUANT LES EFFETS DES OUVRAGES SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'EAU | 84 |
| 4.5.1 | <i>L'étude d'impact.....</i> | 84 |
| 4.5.2 | <i>Le document d'incidences</i> | 85 |
| 4.5.3 | <i>Relation entre étude d'impact et document d'incidences</i> | 87 |
| 4.6 | SCHÉMA TYPE D'UNE PROCÉDURE D'AUTORISATION..... | 88 |
| 4.7 | QUE DOIT CONTENIR L'ARRÊTÉ D'AUTORISATION ? | 89 |
| 4.8 | AUTRES RÉGLEMENTATIONS ET DOCUMENTS À PRENDRE EN COMPTE | 90 |
| 5 | GLOSSAIRE..... | 93 |
| 6 | BIBLIOGRAPHIE | 99 |
| 6.1 | RÉFÉRENCES PRINCIPALES | 99 |
| 6.2 | AUTRES RÉFÉRENCES | 102 |
| ANNEXE A LA POLITIQUE NATIONALE DE GESTION DU RISQUE INONDATION | | 105 |
| A.1 | LA CONNAISSANCE DU RISQUE | 105 |
| A.1.1 | <i>L'aléa.....</i> | 106 |
| A.1.2 | <i>Les enjeux et la vulnérabilité.....</i> | 106 |
| A.1.3 | <i>Le fonctionnement hydrologique, hydraulique et sédimentaire</i> | 107 |
| A.2 | LA PRÉVENTION DU RISQUE | 108 |
| A.2.1 | <i>La réduction de l'alea</i> | 108 |
| A.2.1.1 | La préservation et la restauration des champs d'expansion des crues | 108 |
| A.2.1.2 | La restauration des cours d'eau et le maintien du libre écoulement des eaux | 108 |
| A.2.1.3 | Les ouvrages de protection des constructions et des lieux habités..... | 109 |
| A.2.1.4 | Le contrôle de la sécurité des ouvrages | 109 |
| A.2.2 | <i>La réduction de la vulnérabilité</i> | 110 |
| A.2.2.1 | L'occupation et l'usage des sols..... | 110 |
| A.2.2.2 | Les plans de prévention des risques et les mesures constructives..... | 110 |
| A.2.2.3 | La délocalisation des constructions | 110 |
| A.2.2.4 | Mesures d'urgence..... | 110 |
| A.2.3 | <i>La planification, le financement des actions et l'indemnisation des dommages</i> | 110 |
| A.2.3.1 | Les outils de planification..... | 110 |
| A.2.3.2 | Le financement des actions..... | 111 |
| A.2.3.3 | L'indemnisation des dommages : | 111 |
| A.3 | LA CONCERTATION SUR LE RISQUE ET L'INFORMATION DU PUBLIC..... | 112 |
| A.3.1 | <i>La concertation.....</i> | 112 |
| A.3.2 | <i>L'information préalable</i> | 112 |
| A.3.3 | <i>Les atlas des zones inondables</i> | 113 |
| A.3.4 | <i>L'annonce et la prévision des crues</i> | 113 |
| ANNEXE B UN EXEMPLE D'AIDE À LA DÉFINITION DE STRATÉGIE : LA MÉTHODE INONDABILITÉ | | 114 |
| B.1 | LES PRINCIPES DE LA MÉTHODE INONDABILITÉ | 114 |
| B.2 | L'ORGANISATION DES SOLIDARITÉS AMONT - AVAL SUR UN BASSIN VERSANT | 116 |
| ANNEXE C MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT DU VOLUME DE RETENUE D'OUVRAGES DE LAMINAGE | | 117 |
| C.1 | MÉTHODE DES PLUIES MAXIMALES | 117 |
| C.2 | COURBE ENVELOPPE DES VOLUMES MAXIMAUX..... | 118 |
| C.3 | RÉGRESSION MULTIPLE POUR LE DIMENSIONNEMENT D'OUVRAGES PASSIFS D'ÉCRÈTEMENT DE CRUE | 119 |
| C.3.1 | <i>Règle de dimensionnement</i> | 119 |

| | | |
|-------|--|-----|
| C.3.2 | <i>Quantification de l'effet de laminage</i> | 120 |
|-------|--|-----|

ANNEXE D CONTENU D'UNE ÉTUDE D'ANALYSE DE RISQUES OU DE SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT D'UN AMÉNAGEMENT HYDRAULIQUE..... 121

| | | |
|-----|---|-----|
| D.1 | OBJECTIFS ET PLAN GÉNÉRAL D'UNE ÉTUDE DE SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT | 122 |
| D.2 | ANALYSE DES SITUATIONS DE DANGER (<i>ÉTAPES 1 ET 2</i>) | 123 |
| D.3 | EVALUATION DE LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT (<i>ÉTAPE 3</i>)..... | 126 |
| D.4 | SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS (<i>ÉTAPE 4</i>) | 128 |

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL..... 129

PREAMBULE

Le risque inondation représente le premier risque naturel en France : plus de 8000 communes et de deux millions de personnes y sont potentiellement vulnérables. Les événements tragiques du delta du Rhône en 2003, du Gard en 2002 ou de l'Aude en 1999 ont souligné les enjeux de sécurité publique associés à ce risque.

Si les dommages directement liés aux inondations se traduisent par des coûts considérables, les effets indirects, quant à eux, affectent durablement l'économie locale voire nationale pour les plus grands fleuves. A titre d'exemple, une crue identique à celle de 1910 sur la Seine, aujourd'hui, coûterait à la collectivité nationale de l'ordre de 10 milliards d'euros de dommages directs.

Les protections rapprochées ont démontré leurs limites. La restauration des champs d'expansion des crues, la prise en compte du risque dans l'urbanisme, la réduction de la vulnérabilité et le renforcement de la conscience du risque apparaissent ainsi désormais comme les actions de prévention des inondations les plus efficaces pour limiter durablement les dommages aux personnes et aux biens.

La circulaire du 1^{er} octobre 2002 a lancé un appel à projet pour des plans de prévention des inondations qui promouvait cette approche du risque inondation. Quarante-deux projets de programme d'actions ont été retenus. Pour les meilleurs d'entre eux, la stratégie de prévention des inondations proposée reposait sur une connaissance fine du bassin versant, l'analyse des enjeux à protéger, la prise en compte du risque dans l'urbanisme et une maîtrise d'ouvrage solide à l'échelle du bassin versant et se traduisait par des actions de ralentissement des eaux à l'amont du bassin.

Pour recueillir et diffuser les meilleures pratiques en matière de ralentissement des eaux, j'ai demandé à Jean Dunglas de constituer et de présider un groupe de travail composé de représentants des maîtres d'ouvrages et des services de l'État. Son expérience de ce domaine, notamment dans la gestion des crues du Bassin Oise-Aisne, a permis de constituer le présent guide qui livre des informations techniques et réglementaires utiles pour la conduite de projet.



Pascal Berteaud
Directeur de l'eau

AVERTISSEMENT : CIBLES ET LIMITES DU GUIDE

Ce guide est rédigé à l'attention des services techniques de l'Etat, des collectivités territoriales et des bureaux d'ingénierie. Il s'adresse plus particulièrement aux services susceptibles d'apporter une assistance aux maîtres d'ouvrages pour la définition d'une stratégie de prévention des inondations à l'échelle du bassin versant et pour la réalisation des projets d'aménagements visant à la mettre en œuvre concrètement, **à l'aide de petits ouvrages**, suivant les concepts du ralentissement dynamique. Il est également destiné aux services ayant en charge le contrôle de conformité et de fonctionnalité de ces projets.

Le ralentissement dynamique, dont les bases conceptuelles sont détaillées au chapitre 1, reprend l'idée, historiquement ancienne, qu'on peut atténuer les crues d'un cours d'eau, c'est à dire en diminuer et en étaler la pointe, en cherchant à freiner les écoulements avant leur arrivée dans le lit du cours d'eau, à mobiliser les capacités d'amortissement offertes par les débordements des crues dans le lit majeur et à stocker temporairement une partie des volumes de crue dans des ouvrages spécifiques.

Le présent guide aborde la conception et la réalisation des projets qui mettent en œuvre concrètement cette idée, en insistant sur **les contraintes techniques et les exigences de mise en sécurité des personnes et des biens** auxquels ils doivent répondre. Il met en avant la nécessité de définir, à l'échelle du bassin versant, une stratégie globale de prévention des inondations (chapitre 2), préalablement au dimensionnement proprement dit des aménagements. Le chapitre 3 est consacré au dimensionnement des petits ouvrages de ralentissement dynamique en lit majeur, qui est la cible technique centrale du guide. Le contexte administratif et réglementaire qui régit le développement de ces projets est détaillé au chapitre 4. La politique nationale de gestion du risque inondation, dans laquelle s'insère le ralentissement dynamique comme un des outils disponibles pour mieux gérer l'aléa, est détaillée en Annexe A . Un exemple de méthode globale permettant un diagnostic du risque d'inondation est présenté en Annexe B . Des méthodes sommaires d'estimation du volume des retenues sont exposées en Annexe C . Enfin l'Annexe D présente le contenu d'une étude d'analyse de risques ou de sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique.

Un glossaire (chapitre 5) récapitule et définit les principaux termes employés. La typologie des crues, omniprésente dans ce guide, est celle adoptée par le MEDD. On appelle :

Crue fréquente : une crue de période de retour inférieure à 2 ans

Crue moyenne : une crue de période de retour de 2 à 10 ans

Crue rare : une crue de période de retour de 10 à 100 ans

Crue exceptionnelle : au delà

La bibliographie fournie au chapitre 6, sans viser à l'exhaustivité, permet d'approfondir les notions et questions principales abordées dans ce guide.

Il est indispensable que le lecteur soit conscient des conditions et limites d'application du ralentissement dynamique, sur un plan général, et de celles du présent document, qui cible particulièrement une gamme déterminée d'aménagements, où le laminage des crues résulte de l'action combinée de petits ouvrages de stockage temporaire et d'épandages et stockages temporaires en lit majeur. Trois points essentiels sont rappelés ci-dessous à cette fin.

1) La notion de « **petits ouvrages** », utilisée dans le titre du guide, doit être explicitée. Elle désigne ici des volumes de retenues allant de quelques dizaines de milliers de m³ à un ou deux millions de m³ (pour simplifier de 0,01 à 1 hm³). Elle signifie également que le ralentissement dynamique peut être obtenu par l'effet de retenues dont la capacité se situe dans cette plage. Cela sous-entend que le cours d'eau et son bassin versant **au droit de chaque ouvrage** ont une taille modérée, en rapport avec cette plage de capacité. Avec toutes les précautions qu'imposent les variabilités hydrologiques, **l'ordre de grandeur du volume minimal de retenue à mobiliser varie dans la fourchette de 1/20^{ème} à 1/5^{ème} du volume de la crue considérée, selon l'efficacité recherchée** (cf les règles de dimensionnement présentées en Annexe C). Dans le cas des grands bassins versants aux crues lentes, les principes du ralentissement dynamique peuvent s'appliquer, mais l'importance des volumes et des flux mis en jeu a des conséquences spécifiques en termes techniques (contraintes de l'ingénierie des grands ouvrages, prise en compte de la dynamique des aquifères compte tenu des durées des crues,...) et en termes de modalités de fonctionnement (possibilité, voire nécessité, de gestion plus active des ouvrages). Celles-ci ne sont pas détaillées dans le présent document. C'est le cas, par exemple, du projet d'aménagement de la Bassée sur la Seine (gérant les eaux de la Seine, bassin versant de 10000 km², en tenant compte de la confluence avec l'Yonne, bassin versant de 10000 km²).

2) Le ralentissement dynamique peut être adapté à des contextes hydrométéorologiques et géographiques variés. Cependant, le présent guide est ciblé sur les bassins et cours d'eau dont le lit majeur est assez développé pour présenter des capacités et des opportunités d'épandage significatives devant les caractéristiques des crues (durée, volume). En simplifiant, **il s'applique bien davantage aux bassins versants de plaine alluviale qu'aux bassins versants en contexte de forte pente soumis à des crues très rapides.**

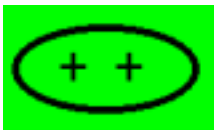
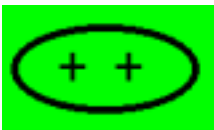
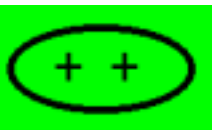

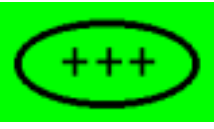
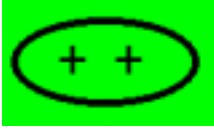
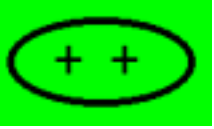

| | | EFFICACITE GLOBALE DES MESURES DE | | | |
|-----------------------|----------------------|---|---|--|---|
| | | information préventive et alerte | non-création de vulnérabilité nouvelle | réduction de la vulnérabilité existante | contrôle de l'aléa dont ralentissement dynamique |
| vis-à-vis des bassins | de plaine |  |  |  |  |
| |   crues très rapides |  |  |  |  |

tableau 1. L'efficacité globale des outils de prévention selon le régime hydrométéorologique et les caractéristiques géographiques du bassin versant (voir légende page suivante)

Plus le bassin est « rapide » (pente, sans lit majeur), plus la gestion dynamique du lit devient inefficace, et plus la place relative à accorder aux mesures d'information préventive et d'alerte devient prépondérante. Cela n'interdit pas de rechercher, dans la mesure du possible, à retarder la formation et la concentration des ruissellements avant leur arrivée dans le lit, c'est à dire dans les versants proprement dits.

3) L'efficacité globale du ralentissement dynamique et son positionnement dans l'ensemble des instruments techniques complémentaires, agissant sur l'aléa ou sur la vulnérabilité, et disponibles pour la prévention des inondations, peuvent être appréciés, en terme de réduction des dommages, à l'aide du tableau 2 indicatif suivant.

| | | EFFICACITE GLOBALE DES MESURES DE | | | | plage des crues d'aménagement |
|---------------------|--------------------------------|-----------------------------------|---|---|---|-------------------------------|
| | | information préventive et alerte | non-crédation de vulnérabilité nouvelle | réduction de la vulnérabilité existante | contrôle de l'aléa dont ralentissement dynamique | |
| VIS A VIS DES CRUES | fréquentes T < 2 ans | | | | sans effet ou éventuellement faible effet négatif | 5 ans ↑ ↓ 100 ans |
| | moyennes 2 < T < 10 ans | | | | | |
| | rare 10 < T < 100 ans | | | | | |
| | exceptionnelles T > 100 ans | | | | impératif de transparence ou faible effet négatif | |

tableau 2. L'efficacité globale des outils de prévention en fonction de l'importance des crues (qualifiée par la période de retour T)

légende : efficacité globale d'une mesure vis-à-vis de la réduction des dommages

| | | |
|----------------------|-----------------|---|
| mesure très efficace | mesure efficace | mesure à efficacité moindre, ou non garantie, ou assurée en partie et sous conditions |
| | | |

Plusieurs commentaires peuvent en être extraits :

- Quels que soient les mérites et parfois l'immédiate nécessité des actions visant à réduire les aléas, **la maîtrise de la vulnérabilité est**, dans la généralité des cas et à moyen et long terme, **l'outil le plus efficace pour réduire les dommages dus aux inondations**.

- Un aménagement visant à réduire l'aléa est dimensionné pour faire face à des crues ayant une certaine période de retour. Son efficacité est généralement optimale pour les événements dont la période de retour ne dépasse pas cette valeur cible. Pour les aménagements de ralentissement dynamique, **la période de retour cible, située nécessairement dans la plage des crues moyennes à rares, est comprise entre 5 et 100 ans. Le choix de cette valeur par l'aménageur est un choix stratégique**, prenant en compte les différentes options techniques disponibles, les gains économiques que l'on peut attendre de chacune d'elles et les contraintes locales pour les mettre en œuvre. **Pour des crues dépassant cette valeur cible, retenue pour le dimensionnement, l'efficacité de l'aménagement diminue ; son fonctionnement, même dégradé, dans cette plage, doit être prévu et sa sécurité doit être garantie par des dispositions adaptées**. De même, lorsqu'on va vers les crues plus fréquentes, d'intensité plus faible, l'efficacité de l'aménagement diminue. Les couleurs de la cellule centrale de la colonne 4 du tableau 2 traduisent l'efficacité optimale de l'aménagement au voisinage de la valeur cible (en vert), et son efficacité décroissante quand on s'en éloigne (proportion croissante de jaune).

- La borne inférieure de la plage des périodes de retour cibles est de 5 ans ; cette valeur est au delà de la valeur séparant ($T=2$ ans) les crues fréquentes des crues moyennes. Il est en effet recommandé de faire en sorte que les aménagements de ralentissement dynamique n'aient une influence sensible qu'au delà des « petites » crues. Cette disposition, qui étend la plage de neutralité d'un aménagement de ralentissement dynamique un peu au delà des crues fréquentes, assure un meilleur rapport coût/efficacité, tout à la fois en limitant les indemnités dues sur les zones sur-inondées et en augmentant les dommages évités dans les sites vulnérables à protéger. Elle a aussi l'intérêt, en ne filtrant pas ces « petites » crues, de maintenir active, à moindres dommages, la mémoire du risque.

- L'effet de laminage par des ouvrages, pour une crue dépassant les valeurs de dimensionnement, est d'autant plus faible que la crue est forte. En conséquence **pour les crues exceptionnelles, il est illusoire de compter sur l'efficacité des mesures de réduction de l'aléa** en général, et du ralentissement dynamique en particulier. La cellule correspondante du tableau 2 apparaît en rouge surtout pour stigmatiser et prévenir cette illusion. En outre, l'efficacité des aménagements vis-à-vis des crues peut émousser la conscience de la persistance d'un risque élevé pour les crues exceptionnelles.

1 LES CONCEPTS DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE

1.1 PRINCIPES GÉNÉRAUX

La gestion intégrée des territoires et équilibrée des eaux, nécessité reconnue dans les textes réglementaires nationaux et européens, s'inscrit dans l'ensemble des réflexions et préoccupations relatives au développement durable, où les questions d'environnement tiennent une place importante. Dans le domaine de l'aménagement des eaux, se pose de manière similaire la question d'une gestion plus durable des crues. Elle amène à s'interroger sur les moyens de réduire les inondations dommageables, en évitant de générer des effets pervers, tout en répondant aux besoins en eau des milieux aquatiques.

Il apparaît ainsi nécessaire de compléter et de nuancer une vision de l'aménagement, souvent sectorielle, qui ne serait marquée que par les seuls besoins d'évacuation accélérée des eaux. Celle-ci, d'application quasi universelle, connaît les succès que l'on sait et constitue un des axes possibles pour répondre notamment aux besoins croissants de protection qui accompagnent le développement des activités humaines dans les vallées alluviales. Elle peut cependant conduire à des difficultés qui amènent également à réfléchir aux équilibres entre dynamiques naturelles et développement de l'activité anthropique : des travaux d'aménagement dont l'objectif positif est d'améliorer la protection contre les crues, ont un effet bénéfique local en même temps qu'ils peuvent transférer vers d'autres zones un risque accru de dommages. Il apparaît aussi que les ouvrages procurent un faux sentiment de sécurité, la spirale de l'aménagement en étant une fâcheuse conséquence : **un ouvrage de protection dimensionné pour résister à une crue de référence sera dépassé un jour ou l'autre par une crue supérieure** ; un barrage ou un ouvrage de rétention déjà pleins pourront de même s'avérer inefficaces en cas de survenue rapprochée d'une nouvelle crue ; lors de tels événements, les dommages seront d'autant plus brutaux et inattendus que les urbanisations, par exemple, auront pu se développer dans la fausse certitude de la protection définitive apportée par l'ouvrage et dans l'oubli progressif du risque, en fait irréductible, qui lui reste attaché ; dans un contexte d'artificialisation du cours d'eau, la vigilance des riverains aura en effet tendance à s'estomper, puisqu'ils ne « voient » pratiquement plus les petites crues, limitées ou éventuellement supprimées par les ouvrages. Par ailleurs, la nécessité écologique des débordements est reconnue vis-à-vis des équilibres sédimentaires et biologiques des cours d'eau et des milieux riverains. Enfin, très généralement, les accélérations et concentrations d'écoulement par des réseaux peuvent contribuer à rendre les crues plus rapides et plus intenses.

Le tableau 3 ci-dessous met en parallèle les objectifs positifs et les effets perturbateurs possibles sur l'aval ou sur l'hydrosystème de quelques aménagements courants.

| Aménagement | Objectifs positifs et effets bénéfiques | Conséquences et effets perturbateurs possibles |
|--|---|--|
| Changement de l'usage et de l'occupation du sol (labour au lieu de prairies, urbanisation) | Valorisation économique de l'espace | Imperméabilisation des sols : le ruissellement se produit plus tôt et plus rapidement ; érosions locales ; concentration des écoulements par les réseaux artificiels ; Aggravation possible des pics de crue ; Aggravation des dommages (augmentation de vulnérabilité) ; Pression pour la protection. |
| Calibrage | Protection contre les inondations : maîtrise de l'emprise du cours d'eau, augmentation de la débitance diminuant les débordements en crue | Aggravation des inondations au débouché dans un tronçon aval non recalibré ; Evacuation accélérée : moindre recharge des nappes en crue ; Pour les habitats aquatiques, fort remaniement de la géométrie et du substrat, perte des abris en berge; en étiage, faible tirant d'eau si la géométrie des sections est trop régulière : températures trop fortes, oxygénation en baisse ; Déconnexion des annexes fluviales, perturbation du cycle de reproduction de certaines espèces ; Perturbation du transport solide : érosions et/ou dépôts ; |
| Endiguement | Protection contre les inondations des territoires situés en lit majeur au droit de l'endiguement, sur la même rive | Aggravation possible des inondations à l'aval et sur la rive opposée le cas échéant, par réduction de l'épandage des volumes de crue sur une partie du lit majeur ; Diminution de la mémoire du risque d'inondation, moindre vigilance vis-à-vis d'un risque modifié (rupture ou submersion de digue) ; Risque d'inondation localement aggravé en cas de rupture ; Augmentation des vitesses pendant les crues dans le chenal principal; Surcreusement du lit ; déconnexion entre le cours d'eau et ses annexes fluviales ; Obligation pour le maître d'ouvrage d'assurer la surveillance et l'entretien des endiguements. nota : les actions en cours pilotées par le MEDD (recensement des digues et mise en place d'un système de contrôle de sécurité) apportent des réponses sur certains points. |
| Barrage écrêteur de crues | Protection contre les inondations des territoires situés en lit majeur en aval du barrage | Relative inefficacité si une crue survient alors que le barrage est plein ; Risques spécifiques éventuels (rupture de barrage) ; Lissage du régime aval (disparition des crues fréquentes à moyennes) et interruption totale ou partielle du transport de sédiment (érosion en aval et dépôts dans la cuvette) ; Perturbation de dynamiques biologiques (circulation des animaux et propagules végétales). |

tableau 3. Effets bénéfiques attendus et effets perturbateurs possibles de quelques aménagements

Le concept de ralentissement dynamique prend sa place dans l'éventail des outils susceptibles de contribuer à la prévention des inondations dommageables qui est la finalité du présent document. Il cherche à promouvoir la gestion des eaux à l'échelle du bassin versant, en prenant en compte l'ensemble des intérêts concernés, et en raisonnant à long terme. Guidé par la préservation des dynamiques naturelles des cours d'eau, il donnera la priorité à des règles d'aménagement respectant les différents équilibres dynamiques de l'hydrosystème, qui concernent le fonctionnement sédimentologique, la qualité des habitats biologiques ou encore la recharge des nappes. Des effets collatéraux bénéfiques dans différents domaines sont ainsi attendus de sa mise en place (lutte contre l'érosion en versant, restauration des habitats aquatiques et des annexes fluviales, gestion du transport solide, protection des ressources en eau).

1.2 APPLICATION AU DOMAINE DES INONDATIONS

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 recombinaison de crues déphasées par les ouvrages.

Dans ce sens, le concept de ralentissement dynamique trouve son efficacité dans la mesure où des potentialités d'inondation sont acceptées et effectivement mobilisées dans les zones adéquates du bassin versant, et lorsque **le maître d'ouvrage assure de manière pérenne l'entretien et la surveillance des aménagements et ouvrages**. La phase de définition

préalable des niveaux de risques acceptables peut être l'objet de réflexions et de négociations entre tous les acteurs concernés à l'échelle du bassin versant.

1.3 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.

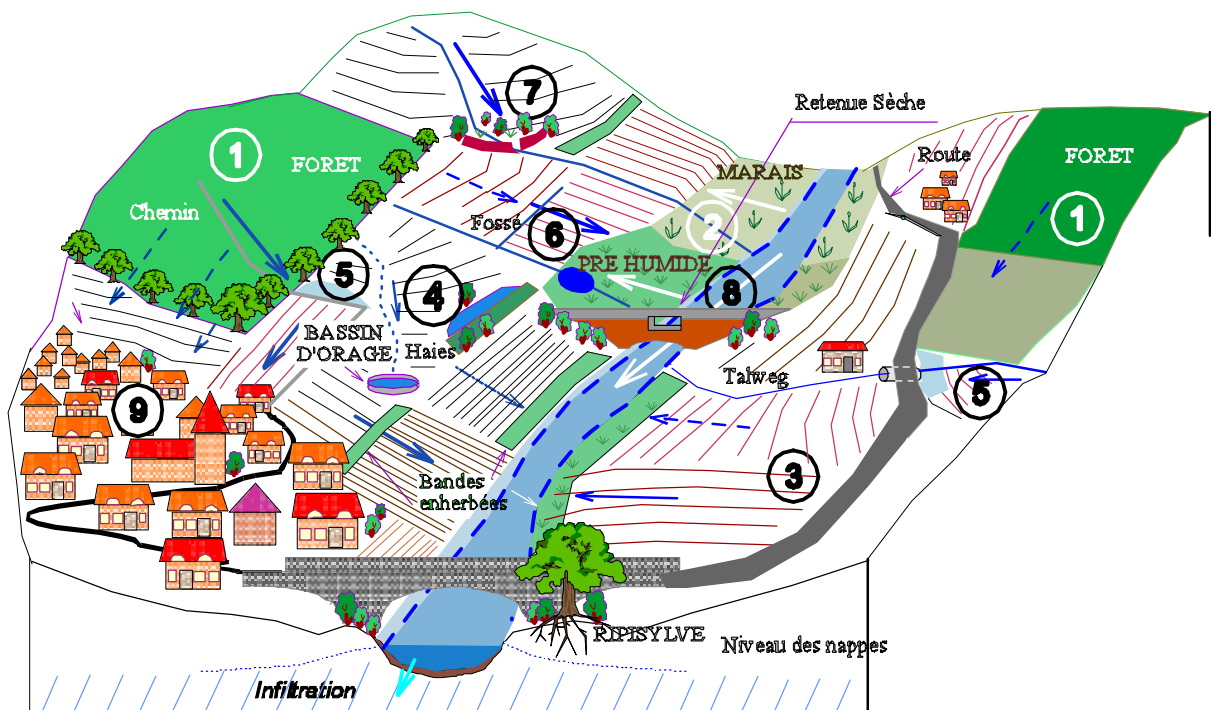


figure 1. Schéma des cheminements possibles de l'eau en bassin versant, zones d'épandage et de stockage temporaire

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 microtalwegs à écoulements occasionnels, le ralentissement peut être favorisé en zone rurale par embroussaillage (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 (citernes, 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 œuvre, 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.

Le tableau 4 ci-dessous résume, dans une autre grille de lecture, cette typologie des procédés permettant le ralentissement dynamique des écoulements :

| | RALENTIR | STOCKER |
|--------------------|---|--|
| Sur les versants | Augmenter les temps de trajets sur l'ensemble du bassin ; entraver la formation du ruissellement et diminuer l'érosion ; embroussailler les zones de fort ruissellement | Favoriser l'infiltration ; créer des microretenues, voire des petits ouvrages (bassins d'orage) |
| En réseau primaire | | Mobiliser les volumes ou créer des microretenues par limitation du débit |
| En cours d'eau | Effectuer une revégétalisation raisonnée des berges, créer des rugosités en champ d'épandage | Mobiliser le lit majeur : favoriser les débordements vers le lit majeur, créer des capacités de stockage en travers du mineur ou en dérivation vers des retenues sèches hors du mineur |

tableau 4. Typologie des procédés permettant le ralentissement dynamique des écoulements

Le sous-chapitre 2.5.3 présente quelques techniques d'aménagement utilisables en versant et avant le lit des cours d'eau, adaptées au ralentissement des eaux. **Le présent guide est cependant principalement orienté vers la définition des aménagements en lits majeurs**, à laquelle est consacrée le chapitre 3.

1.4 DES CONDITIONS D'EMPLOI BIEN DÉFINIES

Le concept de ralentissement dynamique est très attractif. Il faut cependant souligner que sa mise en œuvre exige une volonté et un effort réels de quantification précise de son effet sur les crues à l'échelle d'un bassin versant et d'évaluation objective des coûts et bénéfices attendus, dans un contexte où de nombreuses variables ne sont pas dotées de valeur monétaire.

En outre, **le ralentissement dynamique est le plus souvent attaché à la recherche d'une certaine modestie des aménagements. Celle-ci est déjà la source d'une tendance à la moindre exigence technique dans la conception et la réalisation des projets, qui doit être vigoureusement dénoncée et combattue.** Plusieurs points, relatifs notamment aux questions de danger et de sécurité, doivent être rappelés pour le ralentissement dynamique comme pour toute méthode de mise en œuvre d'aménagements :

- **Les aménagements de ralentissement dynamique ont une plage d'efficacité optimale pour les crues de dimensionnement, qui se situent dans la plage des crues moyennes à rares. Ils sont moins, voire plus du tout, efficaces au delà, c'est à dire en allant vers les crues exceptionnelles, ou en deçà, pour les crues fréquentes pour lesquels ils sont hydrauliquement transparents.** Il convient donc

d'analyser au préalable le fonctionnement des aménagements, de garantir que leur fonctionnement, même dégradé, n'engendrera pas de sur-accident, et de prévoir les mises en sécurité nécessaires dans les situations exceptionnelles.

- Les ouvrages hydrauliques (digues, retenues) génèrent des risques qui doivent être anticipés, aussi bien par la mise en œuvre de règles conformes à l'état de l'art, notamment sur le plan géotechnique, que par la mise en place des mesures d'information des populations.
- Les ouvrages peuvent modifier la perception du risque de la part des riverains. On rappelle, c'est un exemple classique, que la disparition des crues fréquentes par suite d'aménagements émousse la vigilance des riverains et provoque à terme, en cas de survenue d'événements rares, des dommages d'autant plus forts que les riverains ont perdu la mesure du danger.
- Sur le plan technique, la combinaison de nombreux aménagements spatialement répartis, et ayant tous un effet local de laminage des écoulements, doit être analysée sur l'ensemble du bassin versant. Il convient en effet de s'assurer que la diminution bénéfique des crues obtenue en un lieu ne va pas entraîner ailleurs une synchronisation néfaste.
- Enfin, il faut tenir compte, s'il y a lieu, de la mise en place progressive d'ouvrages au cours des différentes phases de réalisation du projet. Il se peut que la répartition des risques s'écarte significativement, au cours de ces différentes phases, de celle attendue pour l'aménagement complet (par exemple : réalisation de plusieurs ouvrages en cascade sur un cours d'eau). Il convient alors d'étudier avec autant de soin les situations intermédiaires et, en conséquence, d'adapter dans le temps le fonctionnement des ouvrages pour garantir constamment la sécurité de l'aménagement.

Ainsi les exigences de compétences hydrologiques, hydrauliques, géotechniques et socio-économiques pour mener à bien des projets de ralentissement dynamique sont tout aussi fortes que celles admises pour d'autres méthodologies ; elles peuvent être d'ailleurs considérées comme plus élevées dans la mesure où le ralentissement dynamique s'efforce de prendre en compte les effets locaux et les effets globaux, dont l'évaluation conjointe est techniquement difficile, par des ouvrages qui, au total, ne fonctionnent pas souvent et que l'on peut même oublier.

2 INTÉGRATION DES OUTILS DU RALENTISSEMENT DYNAMIQUE DANS UNE STRATÉGIE DE BASSIN VERSANT

Après avoir décrit les différents volets d'une stratégie de réduction des effets des inondations (2.1), ce chapitre indique les étapes de la mise en œuvre d'un tel projet à l'échelle d'un bassin versant. La question posée aux acteurs du projet porte sur les enjeux à protéger et sur les événements vis-à-vis desquels on souhaite se protéger (2.2). On passe en revue l'ensemble des études de base (2.3) devant apporter les éléments techniques et économiques, nécessaires au choix final. La réussite d'un tel projet et son acceptation la plus large possible reposent en particulier sur la conduite de la négociation, dont les termes et les modalités sont abordés en (2.4). L'organisation des intervenants dans la conduite du projet est aussi un des gages de réussite (2.5).

On décrit ensuite la palette des aménagements possibles, depuis les versants (2.5.3) jusqu'au lit majeur (2.7), avec leurs principes de fonctionnement, leurs impacts et leurs

modes de gestion (2.8). Les aménagements concernant le lit majeur sont présentés de manière plus approfondie au chapitre 3.

2.1 LES DIFFERENTS VOILETS D'ACTION POUR LA REDUCTION DES EFFETS DES INONDATIONS

La gestion du risque d'inondation suit le plus souvent un cycle à moyen terme, rythmé par les catastrophes successives (figure 2 ci-dessous) : inondation catastrophique / mesures de réparation et travaux de protection / perte progressive de mémoire de l'événement et de vigilance pour la gestion et l'entretien des ouvrages de protection ; développement de l'urbanisme en zone inondable / nouvelle catastrophe. Le comportement de la population varie au cours de ce cycle. Dans la phase d'oubli, chacun est prêt à accepter la prise en compte d'un risque résiduel. Après une catastrophe, la crue en cause est aussitôt qualifiée d'exceptionnelle – crue du siècle, jamais vue de mémoire d'homme. L'unanimité se prononce pour ne plus jamais revoir de telles conséquences et exiger que cette catastrophe devienne la référence pour les aménagements de protection.

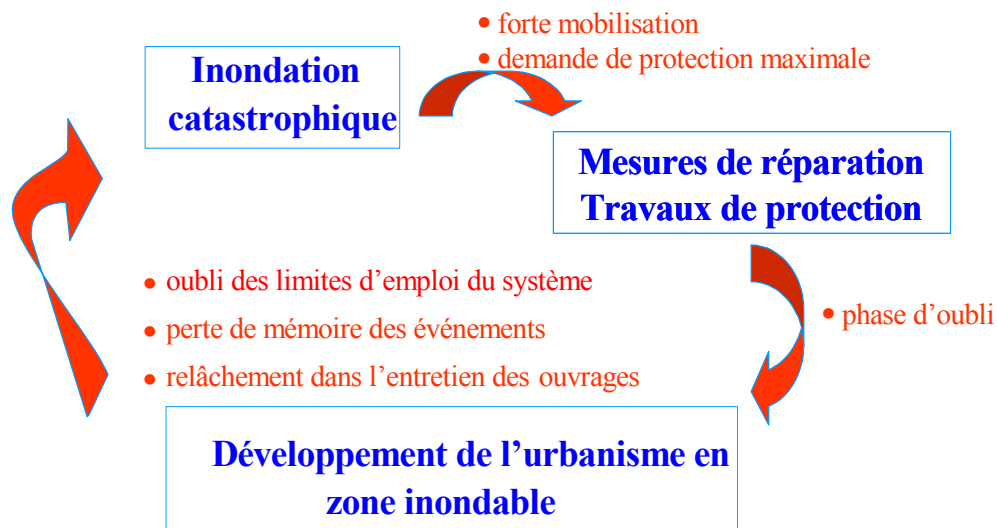


figure 2. Gestion à moyen terme du risque d'inondation

La succession à intervalles rapprochés ces dernières années de catastrophes liées aux inondations a conduit à s'interroger sur les raisons de l'aggravation des dommages et les remèdes possibles. Les différents rapports d'évaluation, [Mathot, 1994], [Bourrelier, 1997], [Dauge, 1999], les analyses et leçons tirées des désordres survenus sur certains aménagements, comme ceux du bassin versant de la Savoureuse [IGE, 2002] et l'avis conjoint des diverses inspections générales [IGA, 2002], ont mis en évidence l'insuffisance de la prévention du risque d'inondation, avec en parallèle une augmentation régulière en zone inondable de la vulnérabilité de l'activité économique aux débordements des rivières. De nouveaux outils juridiques ont été mis en place à partir des années 1980 pour inverser la tendance, notamment en favorisant le développement de plans de zonage du risque d'inondation (Plans de Prévention des Risques, PPR, institués par la loi n°95-101 du 2 février 1995). Un nouveau système général d'indemnisation est en vigueur en cas de catastrophe naturelle (cf. loi n° 82-600 du 13 juillet 1982), et un programme décennal de prévention des risques naturels a été lancé en 1994, prolongé en 2002 par le « plan Bachelot » (circ. MEDD du 1^{er} octobre 1982). La loi relative à la prévention des risques

technologiques et naturels et à la réparation des dommages (loi n°2003-699 du 30 juillet 2003) a pour triple objectif de : 1/ travailler sur les terrains qui engendrent le risque ou participent à son aggravation, 2/ développer une conscience et une culture du risque dans la population, 3/ donner aux pouvoirs publics des instruments de prévention efficaces.

La figure 3 ci-dessous récapitule les trois grands volets d'action permettant une réduction des effets des inondations [Lang, 2003] : le développement d'une meilleure culture du risque (information sur l'existence d'un risque et sur le comportement à adopter en période de crue), des actions en période de crise (alerte et secours des populations, gestion d'ouvrages de rétention), et des actions en temps différé (prévention, et indemnisation-réparation).

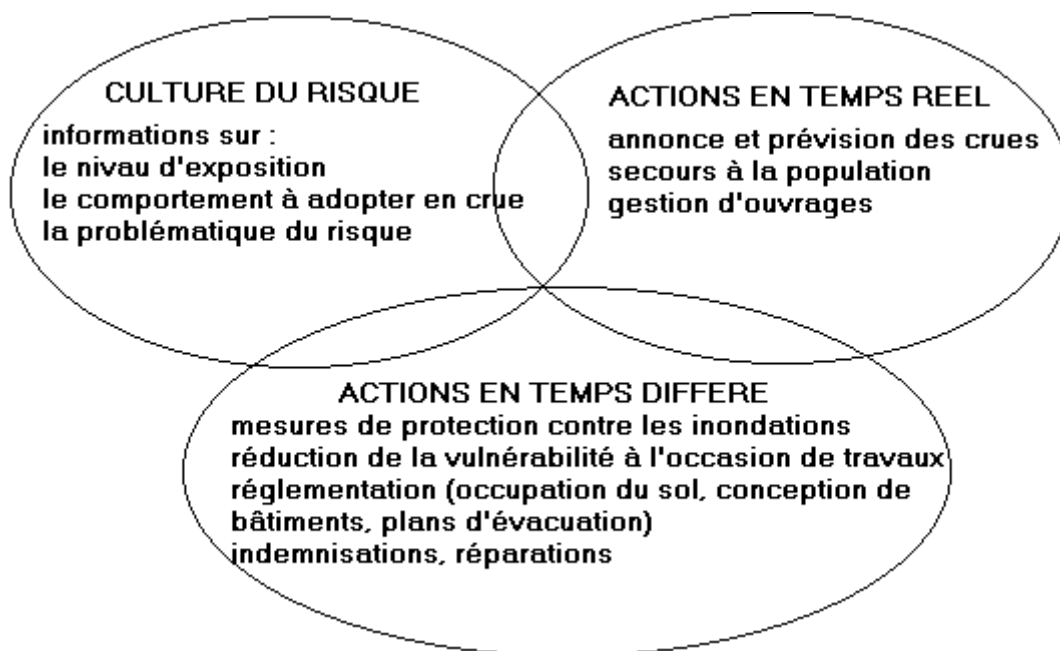


figure 3. Les différents volets d'action pour la réduction des effets des inondations

Le présent guide méthodologique s'inscrit dans le dernier volet d'intervention en décrivant les stratégies possibles de prévention des inondations par ralentissement de la dynamique des crues. Les autres volets sont complémentaires et c'est bien l'ensemble de ces dispositifs d'information, d'aménagements techniques et réglementaires qui permet de progresser de façon significative dans la réduction des effets des inondations.

2.2 QUELS ENJEUX PROTÉGER ? VIS-À-VIS DE QUELS ÉVÉNEMENTS ?

Un préalable en matière de risque d'inondation consiste à éviter la confusion, souvent faite, entre le phénomène physique responsable des inondations et ses conséquences en terme de dégâts. La terminologie officielle du MEDD, distingue l'aléa, que l'on peut caractériser par le degré d'exposition d'une zone aux inondations (fréquence, hauteur et durée de submersion, vitesse d'écoulement, rapidité de montée des eaux, période préférentielle d'occurrence dans l'année), et la vulnérabilité, qui traduit les enjeux liés à une activité humaine (degré potentiel d'endommagement ou de perturbation en cas d'inondation). Le risque, issu du croisement de l'aléa et de la vulnérabilité, donne une vision des conséquences des inondations sur une zone quelconque du territoire.

En annexe (Annexe B) est détaillée la **méthode inondabilité**, à titre d'exemple de cadre méthodologique disponible pour réaliser un diagnostic sur les zones à risque et définir les

actions permettant de réduire les effets des inondations. Cette méthode, proposée par le Cemagref, repose sur un croisement de la demande sociale de protection contre les inondations et de la connaissance que l'on peut avoir du fonctionnement hydrologique des bassins versants et de l'hydraulique des cours d'eau. Une carte de synthèse du risque, issue d'analyses de l'aléa et de la vulnérabilité, permet de mettre en évidence les zones à problème. Cette méthode peut servir de base à la recherche de scénarios d'aménagement ou d'occupation du sol qui rendent compatibles l'activité sociale et économique le long de la rivière et les débordements occasionnels du cours d'eau en crue. Dans son principe, la méthode est applicable quelle que soit la taille du bassin versant considéré. En pratique, dans l'état actuel des moyens opérationnels d'acquisition des données (concernant en particulier, la cartographie de l'occupation du sol), elle est bien adaptée aux bassins versants dont la superficie vaut de quelques dizaines à quelques centaines de km² (plage de 10 à 1000 km²). La généralisation des sources de données satellitaires disposant de la précision adéquate, et l'automatisation de leurs traitements pourra progressivement en étendre le champ d'application.

La figure 4 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'endigements. 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.

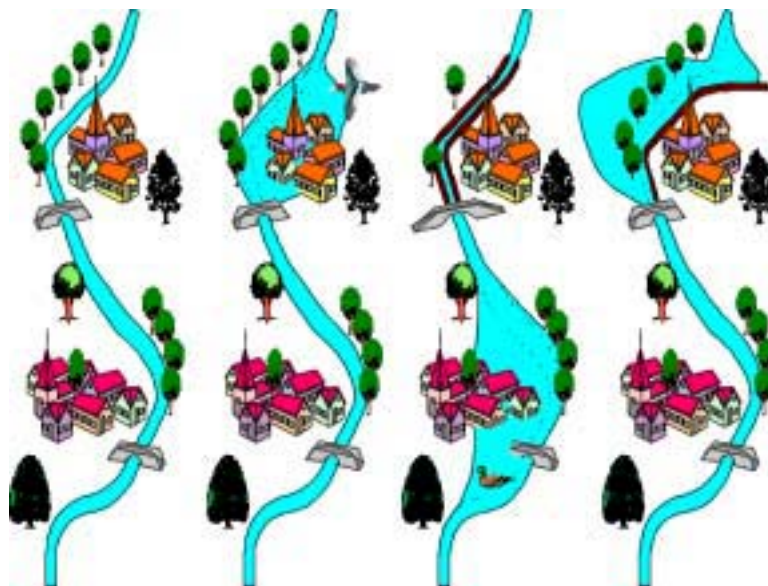


figure 4. Comparaison de deux stratégies de protection contre les effets des inondations

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, ...).

2.3 LES ÉTUDES DE BASE POUR LA DÉFINITION D'UNE STRATÉGIE DE PROTECTION

L'analyse du fonctionnement physique et socio-économique du bassin versant doit permettre de repérer et de choisir progressivement les secteurs sur lesquels il est souhaitable et possible de réaliser des actions de prévention et de protection contre les inondations. La définition d'aménagements de ralentissement dynamique dans un bassin versant suppose également la réalisation d'études permettant de quantifier leur effet sur les crues et d'en apprécier les limites et les coûts. Ces études sont complémentaires et interdépendantes, les résultats des unes permettant de mieux définir le cahier des charges des autres, au moins de mieux en interpréter les résultats. L'ensemble permet de dégager une vision pertinente et cohérente du fonctionnement du bassin versant et des problématiques d'aménagement.

- L'étude **hydrologique** (2.3.1), effectuée à partir des observations hydro-météorologiques disponibles, vise à résumer l'ensemble des réalisations possibles d'événements de crue en une série limitée d'événements de référence, des crues fréquentes aux crues exceptionnelles, en retenant éventuellement plusieurs typologies suivant la genèse (ex : crue pluviale ou nivale), et l'origine météorologique (ex : crue océanique ou méditerranéenne) des épisodes de crues.
- L'étude **topographique** (2.3.2) a pour but de décrire la géométrie du terrain et celle des ouvrages et aménagements présents et projetés, sous une forme et avec une précision adaptées aux besoins des autres études techniques, tout particulièrement l'étude hydraulique. Par ailleurs, le récolement topographique des aménagements réalisés est indispensable et doit être également prévu.
- L'étude **géomorphologique et hydrogéologique** (2.3.3) permet, à partir de l'interprétation des formes du lit du cours d'eau (profil en long et en travers), la définition des limites du champ d'inondation (lit mineur-moyen-majeur), une meilleure compréhension des processus de transport solide et d'évolution des formes de la rivière et une appréciation des influences mutuelles entre les cours d'eau et les aquifères présents.
- L'étude **hydraulique** (2.3.4) permet la détermination de limites du champ d'inondation de crues de référence et une meilleure appréciation de la dynamique des crues (estimation

des vitesses d'écoulement, des temps de transfert dans le réseau hydrographique et appréciation de l'effet de laminage induit par les ouvrages de ralentissement).

- L'étude **économique** (2.3.5) vise à donner une estimation des coûts relatifs à chaque stratégie de protection (investissement / fonctionnement) et à apprécier la réduction du coût moyen annuel des dégâts. Elle fournit un certain nombre d'éléments objectifs pour le choix des aménagements à réaliser.

2.3.1 Etude hydrologique à l'échelle du bassin versant

Dans le cadre de la mise au point de scénarios de protection, le volet hydrologique a pour objectif la définition d'événements de référence, y compris les événements extrêmes, qui sont intégrés dans l'analyse hydraulique sous forme d'hydrogrammes de référence. **Cette définition doit s'appuyer sur deux types d'informations et d'analyses conjointes** : d'une part, sur la **connaissance événementielle des scénarios hydrométéorologiques caractéristiques du bassin** concerné; tirée de l'étude climatologique des précipitations, d'autre part, sur la connaissance statistique du régime des crues, fondée sur **l'analyse de longues chroniques de mesures des débits**.

La pertinence des valeurs fournies (les débits tout particulièrement) est fondamentale, car ces valeurs sont la base des dimensionnements adoptés pour les aménagements ; en conséquence, l'étude hydrologique ne doit pas être conduite au rabais, ni techniquement, ni budgétairement. Par ailleurs, l'étude hydrologique doit présenter les valeurs des intervalles de confiance ou des incertitudes associées aux résultats fournis ; on n'oubliera pas qu'une chronique de mesures sur N années, ne peut être raisonnablement extrapolée au delà d'une durée de $2N$ à $3N$ années. Cela signifie par exemple que 30 années d'observations ne suffisent pas, a priori à elles seules, à établir la valeur d'un débit centennal.

La connaissance des événements hydrométéorologiques caractéristiques du bassin versant est utilisée pour apprécier les effets des aménagements projetés sur le phasage des crues (3.1.3). La connaissance statistique du régime des crues peut être obtenue et approfondie en suivant les analyses précisées ci-dessous.

Une première analyse consiste à définir des zones hydrologiquement homogènes, en fonction des caractéristiques climatologiques (pluie, neige) et morphométriques du bassin versant (relief, pentes, forme) et de son aptitude au ruissellement (géologie, pédologie, occupation du sol). En fonction des données hydrométriques disponibles, ce découpage qualitatif est affiné à partir de la connaissance de quantiles de crue de référence au droit de stations de mesure (cf. synthèses régionales disponibles auprès des DIREN).

Une seconde analyse porte sur le traitement détaillé de chroniques de mesure de débit et vise à apprécier le régime des crues du bassin versant. Celui-ci peut être caractérisé sous la forme de courbes débit durée-fréquence, dites courbes QdF , de façon analogue à ce qui est pratiqué pour caractériser l'aléa pluviométrique (courbes intensité-durée-fréquence). Un point quelconque $Q_d(T)$ des courbes QdF correspond à un quantile de débit maximal, calculé sur la durée d (volume de crue) et de période de retour T (voir la figure 5 ci-dessous). La courbe associée à la durée $d = 0$ correspond à la distribution du débit de pointe. Un hydrogramme de référence peut être construit pour chaque période de retour T , en fonction des courbes QdF et d'une analyse des formes de crue [Garçon, 2002]. Il reste homogène en probabilité suivant les différentes variables utilisées pour le caractériser : débit de pointe, volume de crue sur différentes durées d , gradient de montée, débit de base.

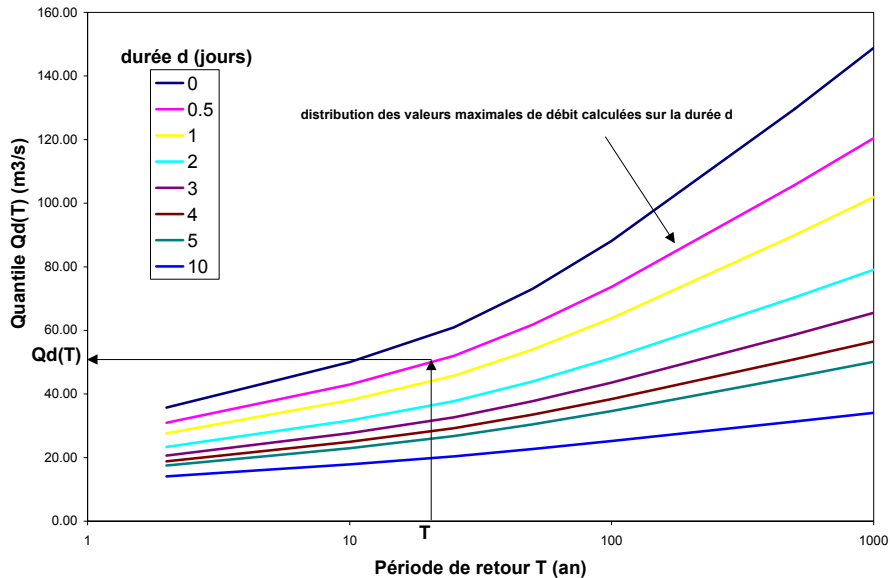


figure 5. Exemple de courbes QdF, famille de distributions de crues multidurées

La dernière étape consiste à décrire le régime des crues en un point quelconque du bassin versant constituant le site cible sur lequel on cherche à déterminer le risque de crue. Lorsqu'on ne dispose pas en ce point des informations hydrométriques suffisantes pour l'analyse précédente, on peut mettre en œuvre différentes procédures de transfert spatial, afin de constituer en ce point les quantiles de référence, par interpolation des quantiles connus seulement au droit de chacune des stations de mesure. Une méthode sommaire consiste à évaluer empiriquement lequel des bassins jaugés situés à proximité du site cible semble avoir le comportement hydrologique le plus voisin et à transférer l'information à l'aide du débit spécifique. D'autres méthodes ont été élaborées et font intervenir les variables explicatives du processus du transfert spatial (propriétés physiographiques et physiques des bassins versants) et du régime climatique. La méthode Crupedix [CTGREF, 1982] propose ainsi d'estimer le débit décennal de pointe $QIXA10$ (m^3/s) à partir d'une régression multiple sur la pluie journalière décennale $PJXA10$ (mm), la superficie S (km^2) et la cartographie d'un coefficient régional R :

$$QIXA10 = R [PJXA10/80]^2 S^{0.8}$$

Des méthodes plus complexes reposent sur la définition d'un voisinage hydrologique au point d'étude considéré et d'une distribution régionale supposée rester valide dans ce périmètre (notion de distance hydrologique). Le principe de la méthode de l'indice de crue [Dalrymple, 1960] a par exemple été appliqué pour régionaliser les courbes débit-durée-fréquence en crue [Javelle, 2002] et estimer un quantile de crue $Q(d,T)$ en un point quelconque.

La question de **l'estimation des crues rares à exceptionnelles** doit faire l'objet d'un volet d'étude spécifique. Par nature, ces événements sont rarement observés localement et l'hydrologue a peu de chances de disposer d'une collection suffisante de catastrophes. Or le principe de l'analyse probabiliste consiste à analyser une série de réalisations événementielles, à en déduire un comportement probabiliste et à l'extrapoler ensuite à l'ensemble de la population des crues. **Les séries à la disposition de l'hydrologue couvrent en général une période de quelques dizaines d'années. Ceci est insuffisant pour extrapoler de façon fiable l'analyse probabiliste des observations aux événements extrêmes.** La première raison de cette difficulté vient du comportement différencié du régime des crues : les événements courants sont fortement influencés par le

filtre du bassin versant, alors que les événements extrêmes sont conditionnés principalement par les précipitations. Des séries d'observations de quelques dizaines d'années ne permettent pas d'observer avec précision ce changement, et il est difficile de départager les lois de probabilités candidates, car elles donnent des résultats voisins sur le corps de la distribution expérimentale et divergent seulement pour les événements forts à extrêmes. La deuxième difficulté vient des données elles-mêmes, qui ne présentent pas le même degré de précision suivant la gamme de débit considérée. **La courbe de tarage reliant la hauteur mesurée et le débit reconstitué est établie à partir des jaugeages disponibles. Elle est extrapolée au-delà du plus fort débit mesuré, en général bien inférieur à la crue décennale, sauf pour de grands bassins versants aux crues lentes, avec une marge d'erreur beaucoup plus forte que sur les débits courants.**

Ces difficultés d'extrapolation ont conduit les hydrologues à rechercher des informations complémentaires, en élargissant l'échelle spatiale d'investigation (approche régionale), le cadre chronologique (approche historique), et les paramètres explicatifs (approche par les processus d'écoulement). On retiendra qu'en France l'analyse fréquentielle des crues rares à exceptionnelles est fortement liée à la **méthode du Gradex** [CFG, 1994]. Cette méthode, qui exploite la forte liaison pluie-débit pour les fortes crues, sert de base au dimensionnement des évacuateurs de crue des grands barrages (crue de projet de période de retour supérieure à 1000 ans). Le Cemagref a proposé des variantes à la méthode du Gradex qui ont abouti au modèle Agregee [Margoum, 1994], qui permet d'obtenir des estimations plus réalistes des crues rares (centennale en particulier) tout en bénéficiant de l'apport de l'information pluviométrique pour l'estimation des crues exceptionnelles. Le couplage d'un modèle stochastique de génération de hiétoigrammes horaires (cf. modèle Shypre, [AZIBI, 1997]) avec un modèle pluie-débit permet par ailleurs de simuler le fonctionnement hydrologique du bassin versant [Arnaud, 1997].

Un guide méthodologique du MEDD, à paraître [MEDD, 2004], présente une série de recommandations pour le calcul des aléas hydrologiques dans le cadre des plans de prévention du risque d'inondation.

2.3.2 Etude topographique

Les études techniques, tout particulièrement l'étude hydraulique, nécessitent la connaissance de **données topographiques** spécifiques. L'ensemble des besoins en données topographiques doit être défini au préalable et pris en compte dans l'étude topographique dont le but est de décrire, de manière adaptée, la géométrie du terrain et celle des ouvrages et aménagements présents et projetés. Les différentes techniques topographiques disponibles et les éléments de coût sont synthétisés au paragraphe 3.2.2.2.

Par ailleurs, le **récolement topographique** des aménagements réalisés est indispensable, et doit être également prévu.

2.3.3 Etudes géomorphologique et hydrogéologique

Nous regroupons dans ce même paragraphe des études de nature assez diverses dans leurs objectifs et donc dans leur contenu. Selon les situations, il sera nécessaire d'aborder l'un ou l'autre de ces différents volets, assez rarement l'ensemble.

Le premier volet est l'étude hydrogéomorphologique, qui s'intéresse à décrire l'ensemble du lit du cours d'eau (lit mineur, moyen et majeur) et de son encaissant (les terrasses et

versants). A l'échelle d'un grand tronçon de rivière, ce volet nous fournira des informations sur :

- le fonctionnement général et la dynamique du cours d'eau, tant du point de vue historique que de son comportement actuel ;
- les limites géographiques des champs d'inondation.

Le second volet est l'étude morphodynamique qui est nécessaire lorsque l'on est en présence d'un cours d'eau à lit mineur mobile. Ce volet est particulièrement utile pour l'implantation et la conception des protections rapprochées (digues, protections de berges) et des ouvrages à construire dans le lit (ouvrage de dérivation, barrage). L'échelle spatiale pertinente d'analyse est ici le secteur fluvial de quelques kilomètres encadrant les ouvrages mentionnés ci-dessus.

Le troisième volet est l'étude hydrogéologique, qui s'intéresse aux relations entre la nappe et la rivière. Ce volet se justifie si la nappe est susceptible d'influer sur le régime des crues ou de produire des inondations par remontée de nappe dans les secteurs protégés.

2.3.3.1 Etude hydrogéomorphologique

La méthode hydrogéomorphologique est une première phase d'analyse des milieux naturels et anthropisés des vallées. Elle se base sur une approche naturaliste qui permet de mettre en évidence les différents lits des cours d'eau et leurs variations historiques, ainsi que les diverses implantations susceptibles de perturber les écoulements, en les accélérant ou en les ralentissant. De là, elle permet de déduire les zones inondables par les crues rares à exceptionnelles ainsi que les valeurs approchées des paramètres physiques des inondations. Cette méthode s'appuie sur la photo-interprétation et sur une étude de terrain qui permettent de mettre en évidence les différentes unités géomorphologiques. On distingue alors celles qui appartiennent à la partie active, donc inondable du cours d'eau (lits mineur, moyen et majeur) et celles qui sont hors de la zone active et donc hors zone inondable (les terrasses, les versants... qui forment l'encaissant). Ces unités sont séparées par des discontinuités matérialisées par des talus plus ou moins marqués qui permettent de les délimiter dans l'espace.

Le bloc diagramme figure 6 ci-dessous propose une visualisation de la disposition spatiale des différents lits d'un cours d'eau et de leur contexte. Dans ce cas, la plaine alluviale moderne est encadrée, d'un côté par un versant à pente raide, et de l'autre par une terrasse. Cette représentation schématique nécessite cependant une analyse plus détaillée, portant sur les unités géomorphologiques et leurs talus de séparation.

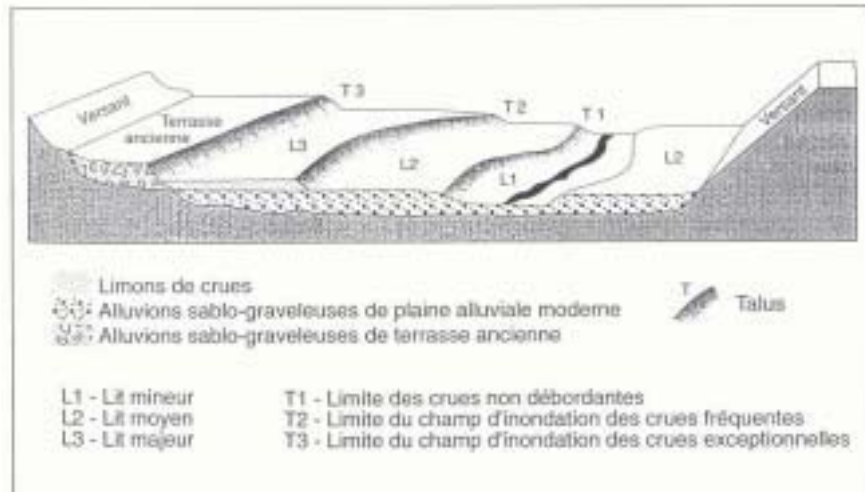


figure 6. Relations topographiques entre les différents lits (d'après [Masson, 1996])

a- les unités géomorphologiques de la partie active :

Ces unités sont délimitées par des structures morphologiques (talus). Elles jouent un rôle direct dans le fonctionnement actuel du cours d'eau et correspondent chacune à une gamme de crue.

- le lit mineur :

Incluant le lit d'étiage, il est le lit des crues fréquentes. Il correspond au lit à plein bord, intra-berges et aux secteurs d'alluvionnement immédiat (plages). Ce lit est emprunté par la crue annuelle, dite crue de plein-bord, n'inondant que les secteurs les plus bas et les plus proches du lit. Ce lit est facilement repérable puisqu'il se délimite par des berges abruptes plus ou moins continues. Sauf sur des îlots ou bancs latéraux qui se sont progressivement stabilisés, le lit mineur est relativement dépourvu de végétation aérienne du fait de la fréquence de l'écoulement des eaux. En résumé, il montre des formes actives de la dynamique fluviale (style en méandres ou en tresses, érosion et dépôt de sédiments), en évolution permanente, caractérisées par la continuité amont - aval, la répétitivité morphologique du système seuil - mouille, et l'irrégularité du profil longitudinal.

- le lit moyen :

Il est le lit des crues moyennes. Il assure la transition entre le lit majeur et le lit mineur. Il est souvent séparé du lit mineur par un bourrelet de berge. Il est recouvert d'une ripisylve constituée d'espèces plus ou moins hygrophiles (aulnes, saules, peupliers). La granulométrie est plus fine, même si, par endroits, elle correspond à celle d'un lit mineur, du fait des chenaux de crues et des bancs d'alluvionnement grossiers.

- le lit majeur :

C'est le lit le plus large, qui correspond à la plaine alluviale et qui fonctionne pour les crues rares et exceptionnelles. Il recouvre d'anciens lits moyens et mineurs et offre des caractéristiques morphologiques beaucoup plus simples. Il présente un modelé plus plat, et est situé en contrebas de l'encaissant. Il est souvent colonisé par une formation végétale moins hygrophile et est très souvent mis en culture. La dynamique des inondations privilégie la sédimentation, car il est submergé par des lames d'eau moins épaisses que dans les lits mineurs et moyens. Il est donc couvert d'alluvions fines (limons et argiles) en plaine ou dans

les larges vallées, et les vitesses sont donc moindres sauf s'il existe des chenaux de crue correspondant à des chenaux d'anciens lits mineurs non entièrement comblés par les dépôts sédimentaires.

b- les unités géomorphologiques hors de la zone active (l'encaissant) :

Elles comprennent les terrasses alluviales, les dépôts de colluvions et les versants encadrant directement la plaine alluviale.

- les terrasses :

Elles sont plus ou moins anciennes, témoins de l'hydrodynamisme passé. Plusieurs niveaux de terrasses plus ou moins bien conservés se distinguent, surplombant le plancher alluvial actuel.

- les versants :

Il sont plus ou moins raides, taillés dans le substratum dans lequel la vallée est inscrite.

- les colluvions :

Ce sont des dépôts de pentes constitués d'éléments fins et de petits éboulis situés en pied de versant, et qui parfois viennent recouvrir les terrasses ou le talus du lit majeur.

L'étude hydrogéomorphologique repose essentiellement sur une analyse des cartes au 1/25 000^{ème}, des stéréophotographies aériennes et sur des reconnaissances de terrain par un géomorphologue. Un exemple de résultat cartographique est donné ci-après figure 7.

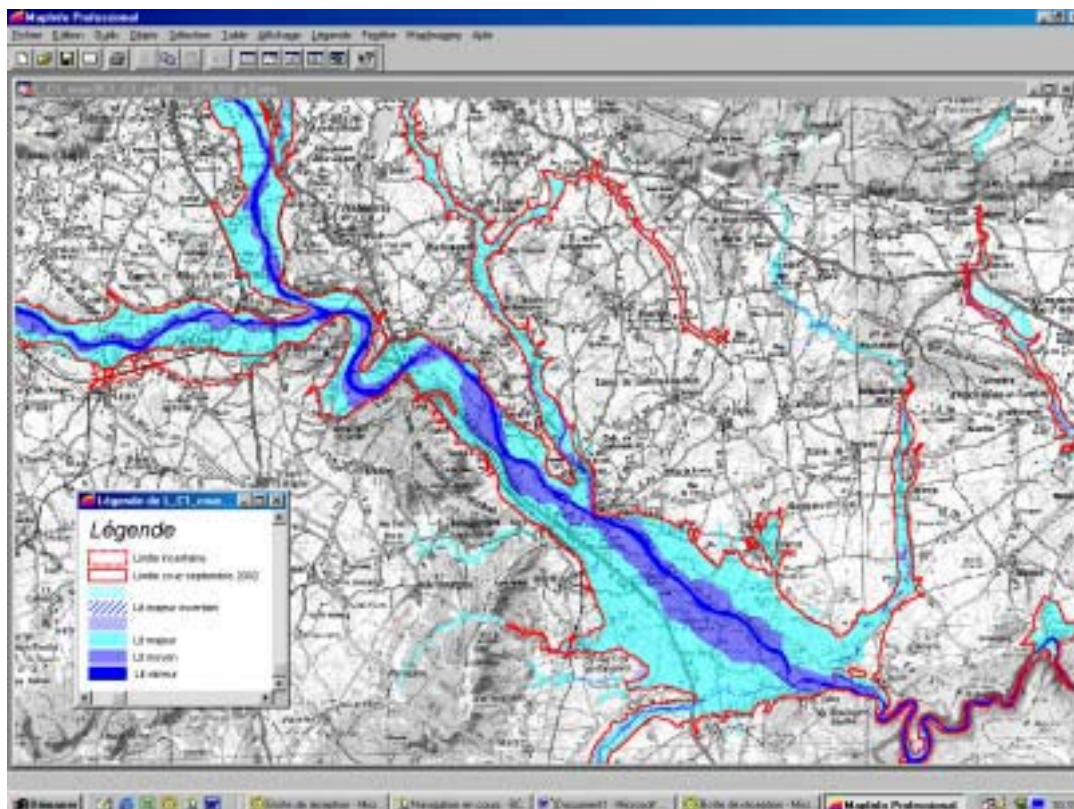


figure 7. Cartographie hydrogéomorphologique du bassin versant des Gardons

2.3.3.2 Etude morphodynamique (d'après [LINO, 2000])

Ce volet s'attache à étudier l'évolution fine du lit du cours d'eau, aussi bien en plan qu'en profil : glissement de méandres, progression d'îlots, enfoncement ou exhaussement du lit, points durs, érosion progressive ou régressive... Une telle étude sera donc nécessaire lorsque l'on est en présence d'un cours d'eau au lit mobile. Elle est particulièrement utile pour l'implantation et la conception des protections rapprochées et des ouvrages à construire dans le lit.

L'échelle spatiale pertinente d'analyse est ici le secteur fluvial de quelques kilomètres encadrant les ouvrages mentionnés ci-dessus. La connaissance des anciens bras ou chenaux d'expansion des crues renseigne sur les secteurs les plus sollicités.

L'analyse théorique de la morphodynamique de la rivière repose sur les connaissances de l'hydrologie, de la sédimentologie et des caractéristiques morphométriques du fleuve. Un découpage est réalisé à partir de la connaissance des pentes longitudinales, du tracé, des actions anthropiques (en particulier les extractions dans le lit mineur et le lit majeur) ; les caractéristiques géologiques sont supposées invariables compte tenu de l'échelle spatiale ; les singularités géologiques seront éventuellement recherchées.

L'étude comparative des profils en long et en travers du cours d'eau est réalisée à différentes échelles de temps sur les documents existants. Les modifications du tracé seront évaluées en termes de coefficient de sinuosité des méandres et de rayon de courbure et en termes de densité de réseau hydrographique. On notera l'évolution dans le temps de l'importance et de la végétalisation des îles.

On recherchera toutes les sources anciennes et plus récentes :

- cartes,
- profils,
- photographies aériennes.

L'analyse du terrain permet d'affiner et nuancer les résultats de l'analyse théorique. La reconnaissance du réseau sera effectuée par tronçon préalablement défini. Cette visite permet d'appréhender la composante sédimentologique et renseigne sur les processus d'évolution. On définit les types d'érosions (par pans, par effritement, par encoches) et de dépôts (convexités, élargissements-perdes de charges, raisons exogènes, embâcles). On repérera les profils apparemment stables ou instables et on analysera les évolutions possibles : avancée de train de méandres (érosion vive à l'extrados, banc de convexité en cours de végétalisation), enfoncement du lit (ripisylve perchée, traces évidentes aux ouvrages, ruptures de pente). L'évolution longitudinale de la granulométrie est en rapport avec les pentes et tracés.

2.3.3.3 Etude hydrogéologique

Dans notre contexte, elle a pour objet l'étude des relations entre la nappe et la rivière. L'influence de ces relations est en général forte pour les régimes d'étiage, ce qui n'est pas l'objet des aménagements décrits dans ce guide. Parfois, le régime des crues de la rivière est aussi susceptible d'être significativement influencé par le niveau de la nappe environnante (exemples des crues de la Somme en 2001 [IGE,2001]). Une étude hydrogéologique est alors nécessaire et sera en général lourde. Une telle étude a pour objet

d'identifier le comportement de la nappe et sa contribution à l'alimentation de la rivière lors des crues.

Notons que lorsque la crue est essentiellement due au ressuyage de la nappe (cas de la Somme), la mise en œuvre de moyens de lutte se heurte à deux obstacles majeurs :

- l'absence de réseau majeur de drainage, avec l'existence de résurgences diffuses tout au long du linéaire du cours d'eau et un remplissage latéral du lit majeur ;
- les durées très longues des mécanismes d'inondation, avec absence de « pics de crue » bien marqués.

La conduite d'une étude hydrogéologique approfondie (avec une étude géotechnique appropriée) est également nécessaire quand le projet porte sur l'utilisation de zones décaissées (comme la réutilisation de gravières), afin de définir le régime des écoulements souterrains contribuant au remplissage de ces zones.

2.3.4 Etude hydraulique d'ensemble

L'objectif de l'étude hydraulique d'ensemble est d'estimer la répartition spatiale et temporelle de l'aléa d'inondation sur l'ensemble du bassin versant, dans son fonctionnement initial, préalablement aux aménagements envisagés, puis dans son fonctionnement modifié par ces aménagements.

Elle donne accès, directement ou indirectement, aux variables caractérisant la répartition des écoulements dans le bassin versant : hauteurs d'eau, vitesses, débits, durées de submersion. Très souvent, l'étude hydraulique est l'occasion de développer des outils d'estimation de ces grandeurs, qui constituent de fait une plate-forme d'aide à la définition de scénarios d'aménagement, au dimensionnement des ouvrages proprement dits et au test de leur efficacité hydraulique. Celle-ci peut être notamment utilisée pour étudier des variantes non initialement prévues ainsi que pour préciser la confiance que l'on peut accorder aux résultats obtenus.

En outre, pour le ralentissement dynamique, l'étude hydraulique en liaison avec l'étude hydrologique revêt une importance particulière dans la mesure où elle aide à quantifier les déphasages et recombinaisons de crues possibles par le jeu des différents aménagements. Elle permet par ailleurs de préciser les secteurs dans lesquels, le cas échéant, une étude locale plus approfondie sera nécessaire.

Le chapitre 3.2 détaille les modalités de l'étude hydraulique, qui s'effectue aujourd'hui, à l'échelle du bassin versant complet, quasi systématiquement à l'aide de modèles numériques de simulation des écoulements. On en resitue ci-après les jalons indispensables :

- L'étude doit combiner expertise hydraulique et connaissance du terrain. L'appréciation qualitative du fonctionnement du bassin étudié est un gage de pertinence finale de l'étude. Ceci concerne plusieurs points fondamentaux :
 - le découpage du bassin en secteurs au fonctionnement hydraulique différencié.
 - la détermination des singularités (ouvrages, réseaux linéaires), des contrôles topographiques (tracés en plan et longitudinaux), des limites (et des conditions

qu'elles imposent) qui déterminent l'organisation et la répartition des écoulements au sein des secteurs déterminés ainsi que entre secteurs.

- la liaison entre la nature des outils de calcul, les données disponibles ou à acquérir, et la précision souhaitée : choix d'une approche mono ou bidimensionnelle, en régime permanent ou transitoire ; adaptation de la topographie (exemple : en basse plaine la topographie des réseaux existants - voies routières, endiguements-, joue un rôle fondamental),....
- La reconstitution du fonctionnement hydraulique du bassin préalablement aux aménagements prévus s'appuie sur la connaissance d'un ensemble de données, qu'on peut regrouper en quatre grands types. Aucun ne peut être négligé :
- données topographiques (dont il faut être conscient des coûts)
 - paramètres hydrauliques : coefficients de frottement, en liaison avec l'occupation du sol ; coefficients de fonctionnement de tous les ouvrages à prendre en compte.
 - limites et condition aux limites : en particulier éventail des hydrogrammes de projet issus de l'étude hydrologique.
 - relevés de laisses de crue
- Pour les trois premiers types de données, les choix effectués doivent être justifiés et une évaluation des incertitudes est indispensable, par exemple, avec l'étude de sensibilité aux variations des différentes grandeurs. Pour le dernier, la fiabilité des informations doit être garantie, au besoin par une réanalyse précise des informations disponibles et de la qualité de leurs sources.
- Pour ce qui concerne enfin le fonctionnement du bassin après aménagement, deux points essentiels doivent être abordés :
- **le fonctionnement nominal (c'est à dire pour l'éventail des crues de projet)** de l'ensemble doit être étudié. Comme signalé plus haut, c'est à ce moment qu'on peut mesurer les modifications éventuelles de l'horloge des crues et apprécier l'émergence de situations à risques éventuellement non prévues.
 - **le fonctionnement non nominal (c'est à dire pour des crues supérieures aux crues de projet)** ayant servi au dimensionnement des aménagements) doit être apprécié aussi bien localement que pour l'ensemble du bassin versant. Cette étape doit permettre de définir, le cas échéant, des mesures adaptées de sécurisation des populations et des aménagements.

2.3.5 Approche économique ; choix et mise en œuvre d'une stratégie de prévention.

En France, l'analyse économique ex-ante en matière de prévention des inondations s'est essentiellement faite au travers de la valorisation des enjeux et des dommages. De fait, l'application d'une démarche de comparaison des coûts et des avantages de plusieurs scénarios en vue de retenir celui qui offre la plus grande différence entre les coûts et les bénéfices a été plus rarement menée à son terme. La démarche la plus aboutie dans cette voie a été expérimentée par l'EPAMA (voir [BCEOM, 2001]). Pourtant, l'idée souvent sous-tendue par la valorisation économique des dommages est l'application au domaine des

inondations d'une analyse économique de type coûts-avantages. Cet outil économique de décision s'est diffusé tant du fait des pratiques étrangères, que du développement de ces méthodes pour l'évaluation de la rentabilité des projets dans d'autres secteurs et a inspiré la production d'ouvrages économiques de références sur les inondations en France. L'application au domaine des inondations d'autres formes classiques d'analyses utiles au choix de projet, comme l'analyse multi-critères¹ est une idée en cours d'étude. Analyses coûts-avantages et multi-critères sont différentes et complémentaires. La première vise à quantifier par des valeurs monétaires tous les impacts sur la société (positifs et négatifs) des mesures et, via cette unité de mesure unique, les gère tous sur un même plan. Cette monétisation a l'avantage de répercuter directement les préférences des populations concernées. En pratique, une des limites réside dans la monétisation de tous les impacts. L'analyse multi-critères peut impliquer largement le projeteur local dans l'évaluation en lui confiant la pondération des différents impacts des mesures, ceux-ci pouvant être exprimés dans différentes unités (qualitatif, quantitatif ou monétaire). Le choix de projets s'opère alors généralement après une procédure de notation et de classement de chacun d'eux. Cette méthode doit traiter la question du poids accordé à chaque critère et du choix de la typologie des critères, qui peut parfois induire des doubles comptes.

Il a été choisi d'explicitier dans ce guide en quoi consiste l'approche économique des inondations et, comme il existe à ce jour peu d'application d'analyses multi-critères dans le domaine des inondations (se reporter à l'étude de l'Entente Oise Aisne sur la définition d'actions d'aménagement du bassin de l'Oise [ISL, 2001] et aux travaux du LAMSADE pour l'Equipe pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature [AZIBI,1997]), de présenter les principes qui gouvernent l'analyse coûts-bénéfices appliqués à la prévention des inondations.

Approche économique des inondations

Le risque d'inondation doit en premier lieu être décrit de manière aussi précise que possible. En général, ceci se fait au moyen de modélisation des différents types d'aléas susceptibles d'être rencontrés, afin d'identifier les activités et enjeux concernés par ces phénomènes hydrauliques et la façon dont ils sont affectés (en fonction par exemple de la hauteur d'eau, de la durée moyenne de submersion, de la vitesse d'écoulement,...).

Après la première étape d'évaluation des enjeux et de qualification sommaire de leur vulnérabilité, l'approche économique permet une monétarisation des dommages attendus. On distingue généralement :

- les dommages directs, produits par le contact direct avec l'inondation (pertes en vies humaines et dégâts matériels provoqués aux biens des particuliers ou des industriels, aux équipements publics ou à l'agriculture, destruction directe des réseaux) ;
- les dommages indirects immédiats ou étalés dans le temps : conséquences de l'inondation sur les activités et échanges à l'intérieur ou à l'extérieur de la zone sinistrée (coûts des secours, des coupures de voies de communication ou de perturbation des réseaux, pertes d'exploitation des activités, chômage partiel, coûts de nettoyage, coût de relogement, impacts sur la santé,...).

Il est possible d'évaluer les dommages soit en s'appuyant partiellement sur des informations recueillies sur le terrain et en conduisant sa propre estimation, soit en reprenant des courbes d'endommagement établies hors du contexte local ([TORTEROTOT,1993]). Ces courbes ont

¹ voir les travaux sur ce thème de l'Equipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature.

en général été proposées à l'occasion d'études menées sur de grands bassins versants ([Lang, 2003]). Elles permettent d'obtenir, le cas échéant, un coût surfacique de dommages associé à une hauteur d'eau pour différentes classes d'occupation du sol. A titre d'exemple pour les biens d'habitation, on pourra se référer à des approches simplifiées [SOGREAH,1994] qui proposent un coût moyen de dommage par logement en fonction d'une crue de période de retour donnée. L'estimation des dommages indirects peut localement s'avérer nécessaire, en fonction des enjeux concernés par l'inondation. Là aussi, le calcul de ces valeurs peut être conduit exclusivement à partir d'une analyse locale. Sinon, il est possible de recourir à des courbes d'endommagement préétablies. Toutefois, à l'heure actuelle, la précision obtenue sur les valeurs de dommages indirects reste inférieure à celle associée aux dommages directs et peut être critiquée. Des approches globales simplifiées existent qui évaluent les dommages dans leur ensemble (directs et indirects partiels) à partir de courbes d'endommagement [BCEOM, 2001], [Hydratec, 1998], [Devaux-Ros, 1998].

Au bout du compte, l'analyse conduite permet d'approcher la partie économique de la vulnérabilité des enjeux. Rappelons que dans le cas des stratégies de ralentissement dynamique, le secteur agricole peut être inondé lors du fonctionnement de l'ouvrage de protection. A ce titre, une étude récente [ASCA, 2002] de la vulnérabilité des exploitations agricoles aux inondations peut constituer un support intéressant pour comprendre le point de vue du secteur agricole.

A ce jour, tous les impacts d'une inondation ne peuvent être monétarisés de façon pleinement satisfaisante pour rendre compte de tous les aspects de la vulnérabilité.

Choix d'une stratégie de prévention

Après avoir cerné l'importance relative des enjeux et l'appréciation économique des dommages qui leur sont associés, le passage à une véritable analyse coûts-bénéfices, lorsqu'il a été tenté, s'est fait sur la base d'hypothèses, dont la principale est que les dommages qui ont pu être monétarisés reflètent l'ensemble des impacts des inondations. En fonction du biais que peut introduire une telle hypothèse, il peut être envisagé de trancher la question du choix entre différentes stratégies possibles pour se protéger du risque d'inondation par une analyse coûts-avantages. De telles analyses permettent une comparaison de chiffres, même si ceux-ci ne sont pas fabriqués de manière uniforme. Le calcul économique ne prétend pas résumer la totalité des considérations nécessaires à la décision, mais indique ce qui, d'un strict point de vue économique, devrait être fait. Il évalue l'efficacité économique d'une action en évaluant les avantages et les inconvénients économiques qui en résultent et recommande simplement toute action dont les avantages l'emportent sur les inconvénients. Dans la pratique économique, les avantages se mesurent par les bénéfices associés à la stratégie de protection et les inconvénients par les coûts. Compte tenu que ceux-ci surviennent à des périodes différentes tout au long de la vie de(s) l'ouvrage(s), ces valeurs devront être actualisées pour tenir compte de leur date d'apparition.

- Parmi les coûts, doivent figurer les coûts d'investissement mais aussi et surtout **les coûts de maintenance actualisés**. En outre, dans le cas particulier des ralentisseurs dynamiques, il conviendra également de prendre en compte le coût des dommages susceptibles d'être occasionnés par la submersion de certaines parcelles situées en amont des ouvrages.

- Les bénéfices sont estimés en terme de dommages évités grâce à l'ouvrage de protection. On raisonne donc ici en valeur marginale : le bénéfice est représenté par la différence entre les dommages qui surviendraient dans un scénario de référence - celui où rien n'est fait – et ceux qui apparaissent de façon résiduelle après mise en place de la stratégie de protection. La description du scénario de référence ne doit donc pas être négligée, afin d'identifier clairement les mesures de protection déjà existantes, leur effet sur les crues et, ainsi,

d'estimer convenablement le montant des dommages occasionnés, sans la stratégie de protection à évaluer. Dans le cas particulier des inondations, l'évaluation du dommage moyen annuel doit tenir compte du fait que celui-ci dépend de chaque crue. Par exemple, dans un scénario de référence sans stratégie de protection, le dommage sera ainsi régulièrement croissant avec la période de retour de la crue. Ainsi, le coût moyen annuel des dommages évités grâce à l'ouvrage de protection s'obtient en pondérant les dommages de chaque crue, par sa fréquence de retour. La méthode d'obtention du coût moyen annuel est représentée graphiquement sur la figure 8 ci après, pour un cas particulier.

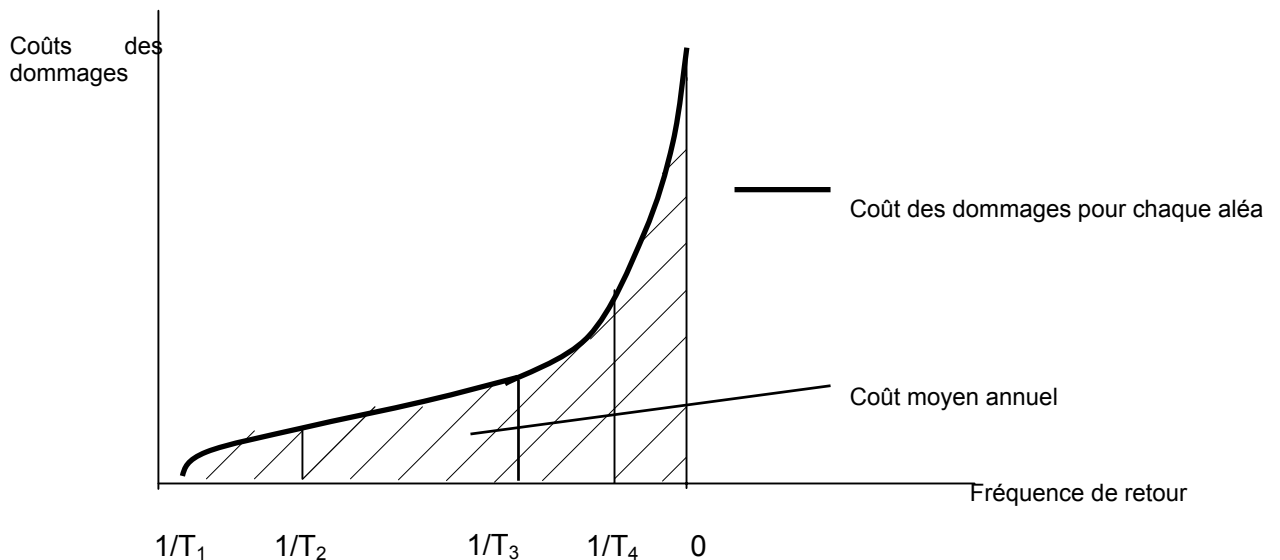


figure 8. Coût moyen annuel des dommages. Cas particulier sans ouvrage de protection (en valeurs courantes)

D'un point de vue économique, la stratégie à privilégier est celle qui génère les plus grands bénéfices par rapport aux coûts supportés. Cette notion s'appréhende par le calcul de la valeur actualisée nette du projet sur sa durée de vie : somme actualisée des bénéfices moyens courants annuels – somme actualisée des coûts courants annuels¹.

L'approche coûts-avantages permet ainsi de sélectionner la stratégie la plus efficace d'un point de vue économique. Si la fréquence de l'événement contre lequel on cherche à se protéger est un des critères distinguant les différentes stratégies de protection testées, il est alors possible de connaître quelle fréquence de crue est à préconiser plutôt qu'une autre d'un point de vue économique pour le dimensionnement des ouvrages à construire.

¹
$$VAN = \sum_{t=1}^T \frac{1}{(1+a)^t} (\text{Bénéfice moyen courant annuel} - \text{Coût courant annuel})$$
 où T représente la

durée de vie de l'ouvrage de protection et a le taux d'actualisation.

2.4 L'ACCEPTATION DES PROJETS ET LA CONDUITE DE LA NÉGOCIATION

2.4.1 Objectifs

Le ralentissement dynamique vise à laminer l'onde des crues moyennes à rares dommageables, sans aller jusqu'à la résorption des phénomènes extrêmes, en limitant les débits de pointe par des ouvrages capables de provoquer une rétention temporaire des eaux excédentaires.

Une variété d'ouvrages et d'aménagements du lit majeur des rivières permettent d'atteindre cet objectif : casiers de stockage d'eau, aires de surstockage, etc.

« Certains champs d'expansion peuvent recevoir sans dommages excessifs des épaisseurs d'eau sensiblement plus grandes pendant des temps plus longs que ceux auxquels ils ont été soumis lors des grandes inondations naturelles. On peut donc y stocker des volumes d'eau plus importants » [DUNGLAS, 1996].

Un ouvrage de surstockage est destiné à provoquer localement une sur-inondation temporaire en cas de crue rare, tout en étant transparent pour les crues fréquentes.

Les terrains inondables inhabités situés dans une aire de surstockage sont donc appelés à recevoir, occasionnellement, des quantités d'eau plus importantes (augmentation de la hauteur et de la durée de submersion) afin de réduire le risque inondation auquel sont exposées des zones habitées, beaucoup plus vulnérables, situées à l'aval. L'acceptabilité d'une telle démarche peut s'avérer difficile d'autant plus qu'elle fait suite à une gestion antérieure inconséquente des zones inondables de l'aval.

L'indemnisation de la servitude, notamment agricole, de sur-inondation, possible de par la loi, est nécessaire mais insuffisante.

Le ou les maîtres d'ouvrages, au-delà de l'ensemble des procédures réglementaires, se doivent de conduire des actions de concertation-négociation à plusieurs niveaux, pour que le projet soit accepté par l'opinion publique, par les responsables locaux, et bien entendu par les personnes directement concernées par les impacts contraignants du projet.

Il s'agit à la fois :

- de réduire les oppositions au projet suscitées, le plus souvent, par une mauvaise compréhension du principe de fonctionnement des ouvrages conçus pour ralentir les crues rares (intérêt du maître d'ouvrage),
- de définir les compensations que doit contenir le projet vis-à-vis des contraintes qu'il génère localement, sans négliger les opportunités d'améliorer les situations locales préexistantes à travers les actions d'accompagnement : protections locales, remise en état du réseau hydraulique secondaire, etc. (intérêt des personnes directement touchées et des populations des communes d'accueil du projet),
- et enfin de mettre en place les conditions d'une utilisation pérenne des zones touchées par le projet (intérêt général), préservant les objectifs de réduction du risque et permettant une certaine valorisation de ces zones.

Rappelons qu'au-delà de certains seuils, un débat public doit être organisé dans les formes prescrites par la Commission nationale du débat public dont le rôle est défini aux articles L-

121-1 à L-121-15 du code de l'environnement, ainsi que par le décret n°2002-1275 du 22 octobre 2002 relatif à l'organisation du débat public et à la Commission nationale du débat public.

Les rubriques et seuils de la nomenclature annexée au décret et susceptibles de concerner les ouvrages de ralentissement dynamique sont :

- la création de barrages hydroélectriques ou de barrages réservoirs :
 - V > 20 hm³ : saisine de la commission par le maître d'ouvrage de l'aménagement (MOA).
 - V > 10 hm³ : publicité et information de la Commission par le MOA.
 - Possible saisine de la commission par diverses personnes.
- le transfert d'eau de bassin fluvial (hors voies navigables) :
 - Q > 1 m³/s : saisine de la commission par le MOA.
 - Q > 0,5 m³/s : publicité et information de la Commission par le MOA.
 - Possible saisine de la commission par diverses personnes.

2.4.2 Démarches proposées

2.4.2.1 Préalable

Un ou des maîtres d'ouvrages ont élaboré un projet de réduction du risque inondation sur un bassin, après études et diverses concertations.

Ce projet comporte un certain nombre d'actions, justifiées par l'efficacité attendue et par les moyens et compétences des intervenants. Il indique d'autre part les raisons pour lesquelles les autres types d'actions de la panoplie des outils de réduction du risque ne sont pas retenus : coût, impact, manque d'efficacité, champ de compétence extérieur à celui du maître d'ouvrage, réglementation.

Le coût d'investissement et de fonctionnement des actions à conduire, leurs effets physiques et économiques sur la réduction du risque ainsi que leurs impacts ont été évalués.

2.4.2.2 Mise en œuvre

Il est proposé au maître d'ouvrage de conduire deux démarches :

La première consiste à associer de manière étroite les acteurs locaux à une réflexion sur le devenir et la gestion des zones concernées, dans une perspective de maintien d'activités, dans lesquelles ils auront un rôle à jouer.

La seconde a pour objet de démontrer que les actions envisagées s'insèrent dans une politique globale de gestion du risque à l'échelle du bassin versant : approfondissement de la connaissance du risque, information du public pour développer la conscience du risque, prévision et alerte, prévention par responsabilisation des acteurs (particuliers, entreprises, collectivités, administrations), comportant, d'une part, une stratégie d'aménagement hydraulique cohérente pour réduire l'aléa (entretien-restauration des rivières, protections locales, résorption des bouchons hydrauliques, ralentissement dynamique des crues,

mesures agri-environnementales sur les hauts bassins ; haies, talus, etc.) et, d'autre part, des éléments de contrainte forte pour ne pas accroître la vulnérabilité des zones exposées par l'arrêt de l'implantation des biens et activités dans les zones de l'aval, voire leur réduction.

2.4.2.2.1 Réflexion sur le devenir et la gestion des zones de surstockage ou des zones rendues à l'expansion des crues :

Il ne peut être envisagé de maintenir des constructions dans ces zones. En revanche, il est souhaitable, sous réserve que l'inondation ne soit pas trop fréquente, ni trop importante en hauteur, que des activités soient maintenues, en compatibilité avec le caractère inondable de ces zones, de préférence par les exploitants actuels des terres concernées. Cela implique, outre les dispositifs d'indemnisation à mettre en place et l'instauration de servitudes pour préserver les effets de laminage créés par les aménagements, qu'un soin particulier soit apporté à la définition, à la mise en place et à l'organisation de ces activités, en tenant compte des équipements publics et privés à recréer dans la nouvelle configuration.

Un travail préalable de concertation doit donc être conduit entre le maître d'ouvrage et les exploitants de ces terres avec la participation des Collectivités concernées et des Services de l'Etat. Il est proposé au maître d'ouvrage de créer un comité regroupant ces différents partenaires, d'une part pour expliquer et préciser le projet et ses effets, et d'autre part pour créer des conditions pérennes de gestion des zones concernées.

Une convention entre le maître d'ouvrage, les exploitants, les collectivités locales et l'Etat devrait conclure cette concertation.

2.4.2.2.2 Intégration du projet dans une politique globale de réduction du risque et engagements des acteurs de l'aval :

Au-delà de la présentation du projet lui-même, de ses effets, de ses limites, de ses impacts, le maître d'ouvrage devra faire état des engagements qu'il prend, en ce qui le concerne, pour réduire le risque d'inondation dans les zones inondables de l'aval, et des démarches qu'il entend conduire auprès des autres acteurs pour les inciter à prendre les décisions de leur ressort, afin notamment que la réduction d'aléa attendue du projet ne serve pas de prétexte à de nouvelles implantations en zones inondables. Bien entendu, un engagement formel des acteurs aval à adopter une conduite vertueuse vis-à-vis de ces questions peut aussi être recherché.

Il rappellera les actions réalisées, en cours ou prévues dans ce domaine (affichage du risque, alerte, contrôle de l'occupation des sols, réduction de la vulnérabilité, ouvrages de protection).

Il est essentiel de prévoir un large plan de communication pour appuyer ces démarches.

2.5 LES INTERVENANTS ET L'ORGANISATION DU PROJET

2.5.1 La phase de définition d'une stratégie

2.5.1.1 La maîtrise d'ouvrage

La nécessité de mener les premières étapes de la réflexion à l'échelle du bassin versant milite pour une maîtrise d'ouvrage qui soit positionnée à cette même échelle. S'il existe, un Etablissement Public Territorial de Bassin (EPTB) sera le partenaire légitime pour assumer cette responsabilité, de même que tout organisme jouant déjà un rôle reconnu dans l'animation d'une Commission Locale de l'Eau (CLE).

Dans le cas contraire, il sera bien souvent nécessaire de créer une telle structure, regroupant l'ensemble des collectivités territoriales concernées par le projet.

2.5.1.2 L'assistance technique au maître d'ouvrage

Si le Maître d'Ouvrage ne dispose pas en son sein de compétences fortes pour assurer le pilotage d'un tel projet, il lui est fortement recommandé de faire appel à un bureau d'études. **Dans tous les cas, le maître d'ouvrage devra s'assurer de disposer en permanence, tout au long de la conception du projet et de la réalisation des travaux, d'une personne ayant une approche globale du projet et une bonne connaissance des techniques à mettre en œuvre. La continuité de cette fonction est un point essentiel de la conduite du projet.**

Cette contribution extérieure pourra prendre la forme d'une assistance technique à maîtrise d'ouvrage (ATMO) comme d'une conduite d'opération qui pourra comprendre un volet communication (information du public, communication, etc.).

Le pilotage général des études, la rédaction des cahiers des charges de ces études, le suivi des prestations des différents bureaux d'études doivent être assurés sous une responsabilité unique.

2.5.1.3 Les bureaux d'études

Sous réserve que la mission d'ATMO intègre bien la coordination des différentes études, il n'y a alors pas d'inconvénient à scinder les études en plusieurs grands lots, faisant chacun appel à un domaine spécifique de compétences (hydrologie, hydraulique, géologie et géomorphologie, avant-projet des aménagements, approche économique). L'objectif est ici de rassembler toutes les connaissances de base sur le bassin versant puis de comparer, au niveau avant-projet, différentes solutions d'aménagement.

2.5.2 La phase de réalisation des aménagements

2.5.2.1 La maîtrise d'ouvrage

A ce stade, les critères de choix de la structure assurant la maîtrise d'ouvrage des travaux sont surtout dictés par des considérations de gestion ultérieure des aménagements. Il convient de privilégier une structure disposant des moyens techniques et financiers adaptés aux nécessités de gestion sur le long terme d'aménagements qui, par nature, auront tendance à se faire oublier entre les épisodes de crues rares.

Sur de grands bassins versants, cet objectif de gestion rationnelle pourra conduire à avoir plusieurs Maîtres d'ouvrage, avec chacun leur zone géographique.

2.5.2.2 L'assistance technique au maître d'ouvrage

Comme pour la phase des études préalables, le(s) Maître(s) d'ouvrage n'hésitera(ont) pas, s'il(s) l'estime(nt) nécessaire, à s'entourer d'une assistance technique pour la phase des travaux (rédaction des cahiers des charges, aide au choix du Maître d'œuvre, suivi des prestations).

2.5.2.3 La maîtrise d'oeuvre

Sur la base des grands choix d'aménagements faits à l'issue de la première phase, le Maître d'ouvrage fera appel à un Maître d'œuvre qui sera chargé de l'ensemble des études aboutissant à établir le projet détaillé des ouvrages. Le Maître d'œuvre sera chargé de préparer les dossiers de consultation des entreprises (DCE), assurera le suivi et le contrôle du chantier, préparera la réception des ouvrages et les dossiers des ouvrages exécutés (DOE), établira les procédures détaillées de gestion, d'entretien et de surveillance. **Cette mission de maîtrise d'œuvre doit être confiée à un seul et même bureau d'études disposant de solides compétences et références.** Il pourra, si nécessaire sous-traiter certaines tâches bien identifiées et limitées, avec l'accord préalable du maître d'ouvrage.

2.5.3 La phase d'exploitation des aménagements

Le Maître d'ouvrage rassemblera les moyens techniques (cf. paragraphe précédent) et financiers pour assurer l'exploitation des aménagements, qui comprend la surveillance, l'entretien et les réparations. Il pourra sous-traiter certaines tâches, mais tout en gardant la maîtrise.

Un aspect particulier déjà souligné par ailleurs concerne la gestion de l'aménagement en situation de crise, avec la capacité de mobiliser des moyens rapidement, le cas échéant dans le cadre d'une organisation d'astreintes.

Enfin, il est recommandé que le Maître d'ouvrage s'entoure des compétences d'un bureau spécialisé pour réaliser périodiquement des inspections techniques détaillées. Cette recommandation devient une obligation si les ouvrages sont classés comme "intéressant la sécurité publique". En tout état de cause, il conviendra d'appliquer les dispositions de la circulaire MEDD du 6 août 2003 relative à l'organisation du contrôle des digues de protection contre les inondations fluviales intéressant la sécurité publique.

2.6 QUELS AMÉNAGEMENTS EN VERSANT ET AVANT LE LIT DU COURS D'EAU

Les aménagements réalisés dès les versants peuvent avoir de nombreux avantages, par exemple sur les ruissellements de crue, sur l'érosion ou sur le temps de transfert des pollutions. En zone rurale, leur implantation peut être raisonnée dans un premier temps en fonction de la topographie seule, en repérant sur une carte les cheminements observés de l'eau (zones de ruissellement important, talwegs secs) et les possibilités d'implanter des ouvrages. En zone urbanisée, des techniques adaptées ont été développées pour mobiliser les capacités de stockage temporaire au niveau des habitations, de la voirie, et de certains espaces urbains. De nombreux petits ouvrages et des recommandations simples peuvent être mises en œuvre. On en donne ci-dessous quelques exemples. Une panoplie plus détaillée peut être trouvée dans [CERTU, 1998] et [CPER-MP, 2000].

Dans tous les cas, la mise en œuvre concrète de ces techniques se fera dans un double souci :

- développer une réflexion spécifique d'adaptation au bassin versant traité,
- prendre en compte systématiquement les mises en danger éventuelles que ces aménagements peuvent eux-mêmes provoquer.

2.6.1 Occupation du sol en versant

Dans certaines circonstances, il peut être indispensable que certaines zones du bassin versant évoluent vers une occupation du sol plus favorable au ralentissement et moins exigeante en terme de protection contre les crues. Cette évolution qui peut apparaître acceptable lorsqu'elle vise à maintenir une activité agricole en modifiant les pratiques (prairie au lieu de champs) pourra être plus difficilement obtenue s'il s'agit par exemple de rendre inconstructibles des territoires partiellement occupés. Elle peut être appuyée notamment sur les outils incitatifs et réglementaires existants (documents d'urbanisme, procédures agricoles contractuelles, servitudes instaurées par la loi). Sur les surfaces peu valorisées, l'intervention est plus facile. Citons des embroussailllements pour casser la vitesse des eaux de ruissellement pendant les averses intenses, dans les talwegs à écoulements occasionnels.

2.6.2 Obstacles transverses

Des petits aménagements, souvent inscrits dans les pratiques locales, constituent des obstacles linéaires interceptant les lignes de ruissellement. Ces dispositifs, par exemple fossés, haies, talus, ou murs soutenant les terrasses, permettent de retarder l'arrivée d'eau dans les thalwegs. Leur effet varie avec leur densité et également en fonction de l'intensité de la pluie. Ces dispositifs limitent également l'érosion en versant, et ont d'autres effets positifs : citons ici par exemple l'effet brise-vent et la dénitrification associés aux haies ; la rétention des pesticides favorisant leur dégradation naturelle dans le cas des banquettes enherbées.

Des ouvrages peuvent être plus spécifiquement adaptés pour retenir temporairement les écoulement 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.

2.6.2.1 Remblais routiers ou ferroviaires

On notera bien que **le présent chapitre s'applique a priori à la conception d'un ouvrage de rétablissement à créer. Aucun remblai routier déjà existant ne peut être considéré a priori comme un ouvrage de ralentissement dynamique** ; son adaptation éventuelle dans ce sens exige une étude spécifique permettant de garantir sa stabilité hydraulique et mécanique (dimensionnement, tenue à la surverse, effets des écoulements internes, ...) dans toutes ses nouvelles configurations de fonctionnement, nominales et hors plage de dimensionnement.

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. Le commentaire et la figure 9 ci-dessous sont tirés de [SETRA, 1997].

« 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 ».

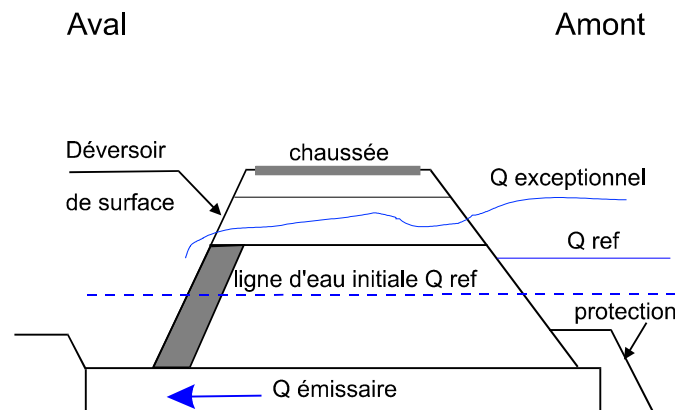


figure 9. Coupe-type d'un remblai routier conçu comme ouvrage de retenue

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

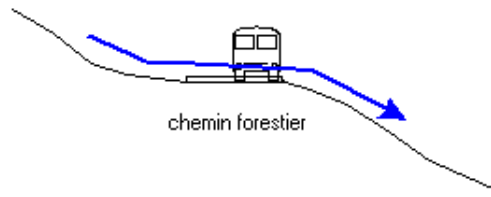
« Au delà de la crue de référence, un organe de surverse permet d'évacuer le volume excédentaire. Il peut être constitué par la chaussée elle-même, si son profil en long s'y prête (le remblai doit alors être aménagé pour résister à l'érosion liée aux écoulements), ou bien par un ouvrage spécifique (déversoir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

2.6.2.2 Chemins forestiers

Des recommandations peuvent être proposées pour enrayer l'accroissement et la concentration des ruissellements dus à l'ouverture des chemins forestiers. D'une part, il faut éviter que les nouveaux chemins suivent les plus grandes pentes. D'autre part, des dispositions d'aménagement des chemins existants ou futurs peuvent être mises en œuvre pour ralentir et disperser les écoulements (cf figure 10 ci-après).

profil en travers :

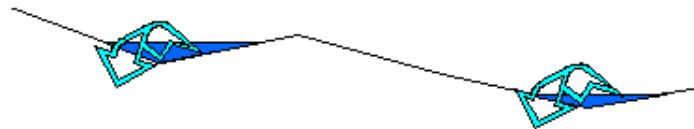
laisse circuler le ruissellement



profil en long :

concentre les écoulements

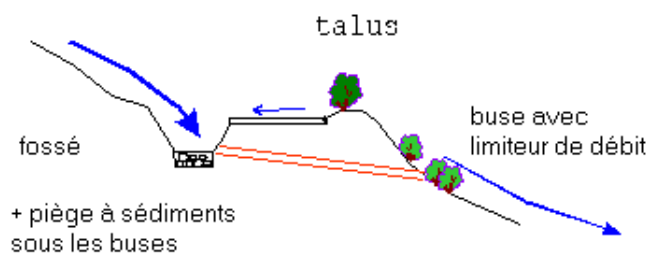
en pied des pentes fortes



a) sans disposition adaptée, le chemin peut concentrer les écoulements

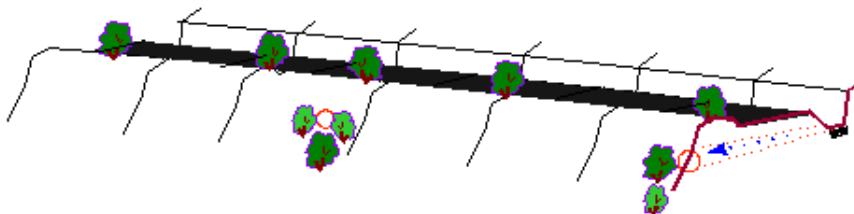
profil en travers :

le ruissellement est intercepté



profil en long :

le trop-plein est évacué par les buses sur une surface empierrée-embroussaillée



b) modifications proposées pour ralentir et disperser les écoulements

figure 10. Aménagements proposés pour les routes et chemins forestiers

2.6.3 Cas particulier : incidence des réseaux de drainage existants sur le régime des crues

Ce paragraphe ne concerne que les réseaux de drainage existants et ne vise pas l'aménagement des zones humides de vallée dont le concept de ralentissement dynamique intègre la préservation.

L'effet des réseaux de drainage agricole sur les crues varie avec l'intensité de la pluie. Le fonctionnement des bassins drainés sous précipitations exceptionnelles est très peu modifié par le drainage. Par contre, les réseaux de drainage rabattant la nappe, le sol sus-jacent est disponible pour absorber l'eau de pluie, ce qui va dans le sens d'une atténuation de certaines pointes de débit en sortie de parcelle lors des précipitations. Cela concerne les

sols à excès d'eau temporaire sur lesquels le ruissellement naturel est intense, et les événements de pluies d'intensité moyenne (pluies journalières de période de retour de 2 à 10 ans).

Le gabarit des fossés d'assainissement agricole, dont la profondeur est imposée par les débouchés des collecteurs de drainage, est souvent assez important pour qu'ils fassent rapidement transiter les écoulements ; par conséquent, au delà d'une période de retour donnée des épisodes pluvieux incidents, ces fossés peuvent accentuer les pointes de débit et menacer la sécurité de zones plus sensibles à l'aval (secteurs urbains, ouvrages d'art, secteurs agricoles vulnérables...). Il est possible de réduire localement leur débitance, par des passages sous buse ou des dallots-meurtrières, afin de laminer les écoulements de crue. Ceci permet de tirer parti du volume disponible dans les fossés, utilisés alors comme une petite capacité de stockage. Les dallots-meurtrières sont des dispositifs plus coûteux que les buses, mais qui se bouchent moins facilement (cf figure 11).

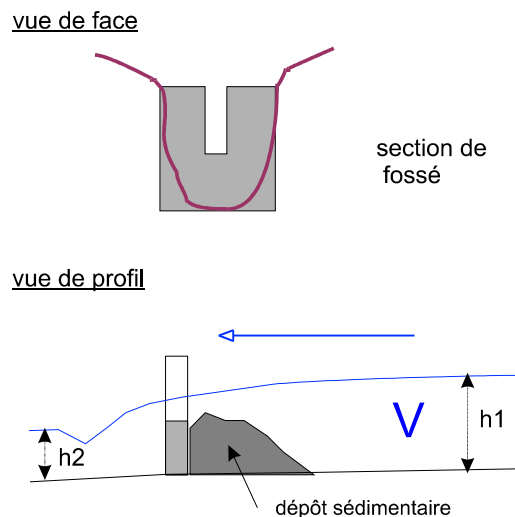


figure 11. Schéma de dallot-meurtrière et action sur la ligne d'eau pendant une crue

2.6.4 Dérivation des réseaux primaires vers les versants

Dans le cas de petits rus naturels, permanents ou temporaires, il peut être efficace de favoriser les débordements, à partir d'un certain débit, vers une dépression située sur le cours même, ou plus loin, avec alors un fossé pour l'alimenter.



figure 12. dérivations d'eau en versant (proposition de tracé sur carte topographique)

Sur la figure 12 ci-dessus, tirée des propositions en cours sur le bassin de l'Isepnica (Pologne) [Poulard, 2002], chaque dépression est alimentée par deux fossés issus de cours d'eau différents. Selon la capacité de la dépression, on pourra être amené à envisager plutôt la construction d'un fossé d'alimentation et un autre chargé de l'évacuation.

2.6.5 Intervenir en lit mineur ?

Certaines techniques, orientées vers l'aménagement des bourrelets de berge ou de la ripisylve, sont réputées avoir un effet modéré sur les écoulements « ordinaires » et par conséquent respecter la dynamique morphologique du cours d'eau.

2.6.5.1 Ripisylves et bourrelets de berge

La ripisylve, végétation arborée ou arbustive des bords de cours d'eau, joue un rôle essentiel dans la fixation des berges (figure 13), dans l'apport de nutriments au milieu aquatique et dans la constitution, par le développement du réseau racinaire en limite de berge, des habitats aquatiques. Conserver – ou recréer si elle a disparu – une végétation rivulaire en bordure de cours d'eau peut contribuer à freiner les écoulements de crue et participer au ralentissement dynamique, quand elle est suffisamment dense pour que les broussailles et les branches basses soient présentes sur une partie significative de la section mouillée. En retenant les berges et en capturant les fines apportées par les crues ou le vent, la ripisylve favorise souvent l'apparition de diguettes naturelles, les bourrelets de berge. Quand on souhaite favoriser les débordements en crue vers des parcelles qui le tolèrent pour en protéger d'autres plus vulnérables, il peut être intéressant d'arser le bourrelet de berge.



figure 13. Ripisylve de l'Ardour (Creuse)

2.6.5.2 Pièges à embâcles

La ripisylve est aussi une source de bois mort, susceptible de tomber dans la rivière et de contribuer à créer des embâcles. Emportés lors des crues, ces embâcles peuvent s'accumuler en aval sur des obstacles (ponts en particulier) et y engendrer des risques d'inondation accrus, voire des risques de déstabilisation et de rupture des ouvrages. suppression de la figure 14 Des aménagements visant à les intercepter et les retenir avant qu'ils n'atteignent des zones vulnérables, peuvent être envisagés en complément d'un entretien du lit.

Les pièges à embâcles sont des obstacles placés dans – ou au-dessus- du lit mineur pour intercepter les flottants. Ils peuvent être constitués par des pieux battus dans le lit mineur, des chaînes tendues en travers du cours, ou des grilles à l'entrée d'ouvrages (cages à 6 faces pour éviter le bouchage complet). Leur positionnement doit être soigneusement étudié, afin que la rétention qu'ils réalisent ne soit pas elle-même source de problème. **Leur entretien régulier est lui-même impératif.**

2.7 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 (2.7.1) ;

- remblais transversaux en lit majeur, conçus pour accompagner une contraction du lit mineur et permettant une mobilisation de champs d'expansion de crue (2.7.2).;
- ouvrages de stockage implantés en lit majeur en dérivation du cours d'eau (2.7.3) ;
- enfin, défenses passives sous forme d'endigements protégeant des enjeux spécifiques (2.7.4).

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.

2.7.1 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. On verra cependant en fin de paragraphe (§ 2.7.1.3) le cas, non recommandé pour le ralentissement dynamique, d'un ouvrage à vocation multiple.

2.7.1.1 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 (cf figure 14):

- 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.

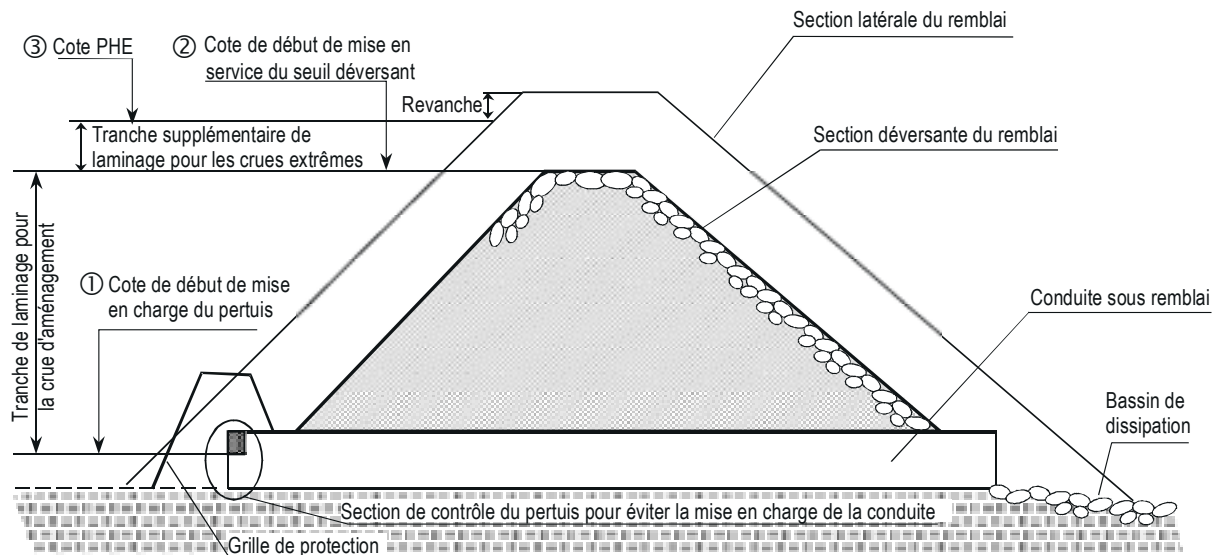


figure 14. Schéma de fonctionnement d'un barrage écrêteur de crues

2.7.1.2 Impacts

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. Dans le cas des barrages libres objets de ce paragraphe, cet effet sera modéré.

Sous réserve de quelques précautions assez simples, un barrage à vocation unique d'écrêtement 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.

2.7.1.3 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 manuel, 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 physico-chimique 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.

2.7.2 *Ouvrages de mobilisation des champs d'expansion des crues*

2.7.2.1 Principes de fonctionnement

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 (voir chapitre 3) 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.

2.7.2.2 Impacts

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.

2.7.3 Ouvrages de stockage en dérivation

2.7.3.1 Description et principes de fonctionnement

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 (cf figure 15 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.

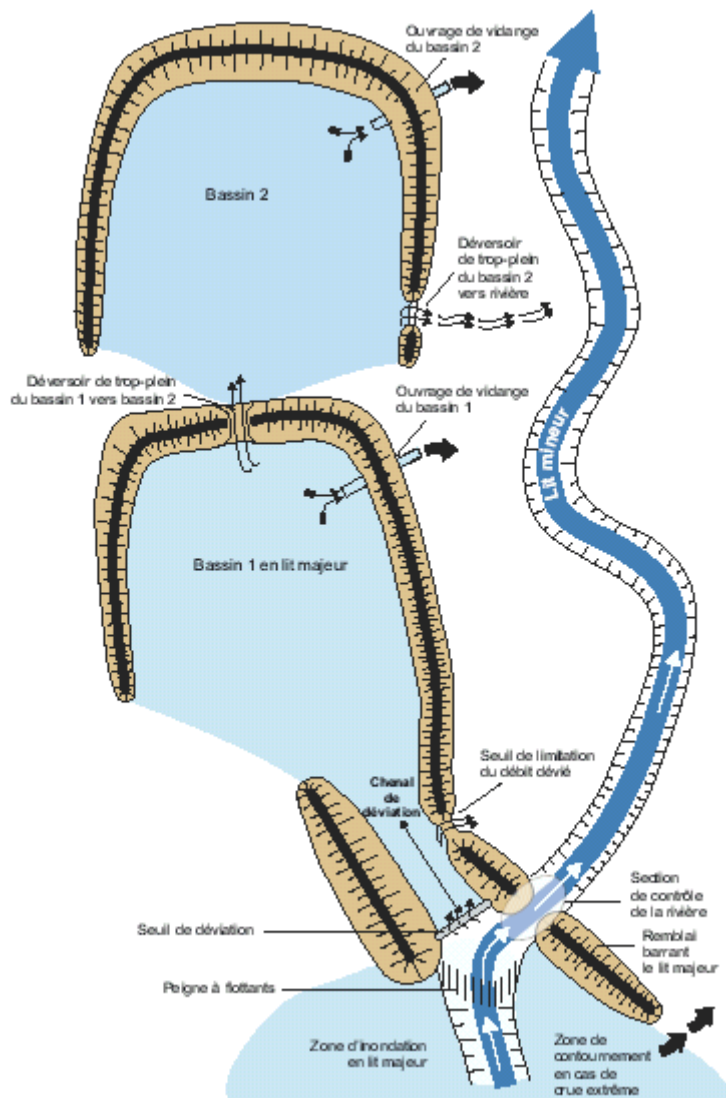


figure 15. Fonctionnement hydraulique d'ouvrages de stockage en dérivation

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.

2.7.3.2 Impacts

Des bassins en dérivation tels que décrits ci-dessus modifient relativement peu le régime naturel du cours d'eau, seulement à partir de leur mise en eau et en période de crue. Ils peuvent par ailleurs avoir un léger effet négatif avant leur amorçage, c'est à dire pour les crues fréquentes, si leur emprise dans le lit majeur intercepte la zone d'épandage des crues. Leur impact sur la géomorphologie de la rivière est comparable à celui des ouvrages de mobilisation du lit majeur. Tout au plus, les épisodes de crues vont se traduire par des apports de matériaux en suspension qui vont se déposer en fond de bassins à la vidange. Il convient d'être attentif à la qualité des sédiments ainsi accumulés.

Certes, la diminution locale et momentanée des vitesses d'écoulement en amont immédiat de l'ouvrage de dérivation pourra conduire à un dépôt partiel des sédiments transportés par

charriage, mais une partie sera reprise à la décrue, dans la mesure où le fil d'eau de la rivière n'est pas modifié au droit de la section de contrôle.

De la même façon, ce type d'aménagement ne constitue pas une barrière à la mobilité des populations piscicoles et ne modifie pas le fonctionnement biologique de la rivière.

Si un plan d'eau à niveau constant est aménagé en fond des bassins, comme c'est le cas quand on profite d'anciennes gravières, les effets spécifiques de leur fonctionnement en crue sur le plan de la qualité de l'eau seront a priori faibles. En effet, l'apport d'eaux extérieures ne se produit qu'en crues, donc rarement et avec des dilutions relativement importantes pour les produits indésirables (fertilisants et phytosanitaires). Les débits courants de la rivière ne transitant pas par les bassins, la qualité de l'eau de tels bassins restera donc à peu près celle qu'elle était dans leur mode de fonctionnement antérieur.

Enfin, il convient également, pour ce type d'ouvrages, d'envisager l'étude des conséquences d'une rupture éventuelle, qui conduira, dans la majorité des cas, au classement au titre de la sécurité publique.

2.7.4 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 prise 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 que 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.

2.8 LE CHOIX DES MODALITÉS DE FONCTIONNEMENT DES OUVRAGES

Dans les paragraphes précédents, consacrés à la description des ouvrages, nous avons vu que certains d'entre eux pouvaient être équipés de vannes. L'avantage de tels équipements est qu'ils permettent une meilleure optimisation de l'efficacité hydraulique des aménagements. De tels équipements ajoutent toutefois un risque de dysfonctionnement ou d'erreur de manœuvre ; ils réclament en conséquence une certaine technicité du gestionnaire et un entretien spécifique régulier. Vis-à-vis du fonctionnement des ouvrages,

nous distinguerons deux aspects, qui correspondent à des pas de temps totalement différents :

- la gestion saisonnière des aménagements ;
- la gestion en crue.

2.8.1 Gestion saisonnière

Dans le cas, non recommandé pour le ralentissement dynamique, d'un aménagement à vocation multiple, l'optimisation des diverses fonctions, parfois antagonistes, passe le plus souvent par une gestion saisonnalisée des cotes des plans d'eau et des positions des vannes (plan d'eau abaissé aux périodes de risques d'inondation).

En amont d'un tel choix de gestion, il convient d'avoir réalisé une étude saisonnalisée de l'aléa de crue et de modélisation du fonctionnement hydraulique. La consigne de gestion, qui doit expressément figurer dans le règlement d'eau de l'arrêté d'autorisation, fixe précisément les cotes des plans d'eau et positions des vannes en fonction des dates dans l'année. Cette consigne devra rester simple (si possible deux périodes seulement, quatre au maximum) et son application devra être facilement vérifiable (échelles limnimétriques).

2.8.2 Gestion en crue

On se place alors à l'échelle de temps journalière, voire horaire sur certains bassins versants. La présence de vannes permet, dans certaines situations, une meilleure efficacité hydraulique. **Elle exige une présence humaine pour leur manœuvre ou leur contrôle, avec tous les risques d'erreur humaine liés à une mauvaise appréciation de la situation.**

Cela amène, sauf cas particuliers, à recommander de choisir des ouvrages à fonctionnement passif en crue, qui ne dispensent en aucun cas d'une surveillance régulière, notamment en période de crue.

L'option pour des ouvrages vannés n'est envisageable que dans des situations de crues lentes et prévisibles et à condition que le gestionnaire des aménagements dispose de personnels techniques compétents, habitués à fonctionner sous régime d'astreintes. Cela vaut y compris en cas de vannes à fonctionnement automatique, car ces dispositifs sont susceptibles d'être pris en défaut (évidemment au plus mauvais moment) et une surveillance avec possibilité de reprise en commande manuelle est donc indispensable pendant toute la durée de fonctionnement. Des consignes de gestion très précises doivent être établies, anticipant toute la gamme des scénarios possibles. Comme dans le domaine des barrages, on établira deux documents :

- La consigne de crue, document public, constituant par exemple un article de l'arrêté d'autorisation ou de règlement d'eau. Elle définit les contraintes et classe les objectifs à respecter vis-à-vis de la sécurité propre des ouvrages et vis-à-vis de son environnement aval et amont. Elle décrit le principe général de fonctionnement de l'aménagement et les cotes de manœuvre des vannes. Elle indique les circuits et le contenu des informations que le gestionnaire doit fournir aux autorités pendant un événement.

- La consigne d'exploitation en crue, document interne au gestionnaire de l'aménagement, mais soumis à l'approbation du service de contrôle. Elle définit les conditions de mobilisation des moyens du gestionnaire, avec le cas échéant plusieurs niveaux en fonction de l'importance de la crue. Elle décrit très précisément les tâches à accomplir par les agents, présentées sous forme claire.

Pour plus de détails techniques sur ces aspects, on se reportera à [Degoutte, 2003].

Enfin, dans le cas d'ouvrages vannés, il ne faut pas sous-estimer le risque de détournement temporaire des objectifs, sous la pression de certaines parties de la population qui pourraient avoir un intérêt à retarder le plus possible l'abaissement de vannes, espérant ainsi échapper localement à l'inondation, mais au détriment du fonctionnement optimal du système, voire même de la sécurité des ouvrages. Ce risque est bien réel, car des faits de ce type se sont produits, y compris en France.

3 DIMENSIONNEMENT DES AMÉNAGEMENTS DE RALENTISSEMENT DYNAMIQUE EN LIT MAJEUR

En prolongement des études de base nécessaires à la définition d'une stratégie, des études techniques détaillées, concernant l'hydrologie (3.1), l'hydraulique (3.2) et le génie civil (3.3) sont nécessaires pour dimensionner les aménagements conformément aux règles de l'art et quantifier leur impact local et à distance. L'évaluation économique détaillée des aménagements projetés et de leurs variantes éventuelles (3.6) participe de façon également déterminante à la clarification des choix de solutions. La sécurité des aménagements est une préoccupation essentielle. Elle se traduit notamment par l'exigence d'entretien et de surveillance des ouvrages réalisés (3.4) et par la nécessité d'évaluer, préalablement à leur réalisation, les risques de défaillance locale et globale (3.5) des aménagements prévus. Le contexte administratif et réglementaire dans lequel peut se construire un aménagement de ralentissement dynamique est présenté au paragraphe (4).

3.1 ETUDE HYDROLOGIQUE

3.1.1 Dimensionnement direct du volume de retenue

Dans le cas d'ouvrages de laminage dont le dispositif d'évacuation n'est pas manoeuvrable (pertuis ouvert), il est possible de raisonner sur une entrée hydrologique définie de façon purement probabiliste, sans rentrer dans le détail de la succession temporelle de l'événement de crue. Sous réserve de disposer d'une information homogène en fréquence quelle que soit la durée considérée, le diagnostic sur la sécurité de l'ouvrage pourra être correctement appréhendé à partir d'une approche simplifiée. On trouvera en Annexe B la présentation de trois méthodes permettant le dimensionnement du volume de retenue d'ouvrages de laminage : à l'aide d'une régression multiple calée sur une soixantaine de bassins versants (approche simplifiée), à partir de la courbe enveloppe des pluies maximales (cf. dimensionnement des bassins d'orages) ou à partir de la courbe enveloppe des volumes maximaux (cf. courbes QdF).

3.1.2 Approche par simulation d'hydrogrammes

Les méthodes de dimensionnement précédentes ne peuvent être appliquées lorsque le dispositif d'évacuation fait l'objet de règles de fonctionnement qui prennent en compte le débit entrant de l'ouvrage. Il faut alors analyser le fonctionnement de la retenue en modélisant finement les écoulements pendant la phase de crue et de décrue. Une première approche consiste à faire une hypothèse sur l'état initial de remplissage de la retenue et à faire un calcul hydraulique à partir d'un **hydrogramme de projet** [Le Clerc, 2004], tel que défini par une approche hydrologique (§ 2.3.1).

Si l'on désire s'affranchir de ce type d'hypothèse, il faut alors procéder à une **simulation en continu d'une chronique de débits**. Pour limiter le temps de calcul, il est recommandé d'utiliser un fonctionnement en mode dégradé, en définissant un seuil de débit à partir duquel on considère le début d'un épisode de crue (par exemple trois à quatre fois le débit moyen interannuel) et en réinitialisant le niveau du réservoir à chaque épisode. La chronique de débit utilisée pourra être celle disponible en amont de l'ouvrage (cf. réseau hydrométrique) ou celle reconstituée par une approche de simulation. La régionalisation de ce type d'approche, de façon analogue à ce qui est proposé dans le logiciel LOIEAU pour la détermination de débits de référence au pas de temps mensuel [LINO, 2000], conduit à reconstituer au droit du site cible une série chronologique de débit qui servira de base à l'analyse du fonctionnement hydraulique de la retenue. Une première application de ce type

d'approche régionale au pas de temps horaire a été réalisée sur la zone méditerranéenne française [Lavabre, 2003].

3.1.3 Analyse de l'effet des aménagements sur le phasage des crues dans le bassin versant

Les aménagements de ralentissement dynamique réduisent la pointe de crue au droit des ouvrages, mais ils sont susceptibles d'aggraver la situation plus en aval en retardant la pointe de crue, s'ils conduisent à rendre concomitante celle-ci avec la crue d'un affluent, qui auparavant était décalée dans le temps.

Lorsque les temps de réaction des différents sous-bassins versants mettent en évidence un certain régime dans le phasage des pointes de crue des différents affluents, on procédera à une vérification de l'effet des ouvrages de ralentissement dynamique. Un calcul du laminage d'hydrogrammes de crue de référence sera réalisé au droit de chaque ouvrage de ralentissement dynamique, puis transféré de proche en proche vers l'aval par une méthode hydraulique adéquate. Il sera alors possible d'apprécier le retard induit par les différents aménagements et de conclure sur un risque de concomitance aggravé des crues. On se basera dans la mesure des données disponibles sur l'étude du décalage des pointes de crues avant aménagements.

Lorsque le phasage des crues est plus complexe, soit pour un grand bassin versant constitué de sous-bassins aux régimes de crues bien différenciés (océanique-méditerranéen, pluvial-nival ...), soit du fait du caractère aléatoire de la localisation géographique des fortes intensités pluvieuses dans le bassin, la notion de décalage moyen entre les crues perd de sa pertinence. Il devient alors souhaitable de raisonner sur quelques scénarios de référence. Ces scénarios traduisent d'une part, le comportement lié au régime moyen des crues et des précipitations, et d'autre part, quelques situations particulières correspondant à une répartition défavorable des précipitations. Ils sont établis en fonction des connaissances disponibles sur les événements antérieurs répertoriés sur le bassin et sur la climatologie des précipitations. On appréciera alors, à partir de ces scénarios, l'effet des ouvrages de ralentissement dynamique sur le phasage des crues.

3.2 ETUDE HYDRAULIQUE

3.2.1 Objectifs de l'étude hydraulique

L'étude hydraulique a un double objectif :

- 1.évaluer et comparer l'efficacité des aménagements envisagés dans le cadre d'un fonctionnement normal ;
- 2.évaluer et comparer les conséquences d'éventuels refus de service des aménagements envisagés.

Généralement cette étude consiste tout d'abord à construire un modèle numérique (maquette informatique) capable de simuler la réponse de la zone aménagée à différentes sollicitations extérieures, principalement différents événements hydrologiques ou des modifications de l'occupation du sol.

La deuxième étape est celle de l'exploitation du modèle sur les différents scénarios (aménagement, hydrologie et refus de service) envisagés.

3.2.2 Modélisation numérique

Aujourd'hui, l'étude hydraulique s'effectue très souvent, pour des raisons qui sont mentionnées ci-dessous, à l'aide de modèles numériques de simulation des écoulements. Il est de ce fait indispensable que les chargés d'étude, comme les utilisateurs des résultats, connaissent bien ce type d'approche et à défaut s'entourent des compétences adéquates. Il est aussi utile de rappeler qu'un modèle hydraulique, outil aussi puissant soit-il, n'est pas l'outil absolu : il ne prend tout son sens qu'en relation avec l'ensemble des études conduites sur le fonctionnement du bassin versant étudié ; par ailleurs, le cadre d'utilisation d'un modèle (hypothèses et approximations sous-jacentes, sensibilité des résultats aux variations des paramètres, incertitudes) doit être bien délimité ; enfin, la précision et la fiabilité des résultats d'un modèle est directement dépendante de la qualité des données utilisées pour le construire. **Le chargé d'études devra donner, avec les résultats, la marge d'incertitude dont ils sont affectés. C'est un point important du cahier des charges.**

3.2.2.1 Les différents types de modélisation possibles

Il est classique de distinguer les modèles physiques (modèles réduits) et modèles numériques. Dans le cas d'une étude de ralentissement dynamique qui s'intéresse à des aménagements en lit majeur, on peut considérer que les modèles physiques sont mal adaptés car difficiles et coûteux à réaliser, en particulier l'occupation du sol en lit majeur est délicate à restituer. Dans la suite, nous nous intéressons seulement aux modèles numériques. Cependant un modèle physique peut s'avérer nécessaire pour simuler le fonctionnement détaillé d'un ouvrage particulier, surtout s'il est essentiel dans l'aménagement : section de contrôle en lit mineur, seuil latéral de dérivation,...

Un modèle numérique est, pour l'essentiel, un code de calcul qui résout les équations mathématiques qui gouvernent les écoulements en milieu naturel. Bien entendu, plusieurs ensembles d'équations peuvent être retenus par le modélisateur selon les variables et les simplifications qu'il choisit. Un tel ensemble d'équations est appelé modèle mathématique.

Dans un premier temps le modélisateur doit donc choisir le modèle mathématique qui représentera au mieux (le sens de ce « au mieux » est à définir par le modélisateur) le système à étudier. Ce choix de méthode est suivi de celui d'un code de calcul, capable de la mettre en œuvre. Dans la pratique, le choix de l'outil est souvent imposé (les autres sont trop chers, le modélisateur ne sait pas en utiliser d'autres, ...) mais la plupart disposent d'options qui permettent d'affiner le choix du modèle mathématique.

La première question à se poser pour le choix d'un modèle mathématique est celle des variables pertinentes, ici celles qui décrivent bien l'écoulement. Les principales options sont les suivantes :

1. *approche globale simplifiée* : elle consiste à effectuer des bilans forfaitaires de volume par grandes unités identifiées [pendant le temps Δt , l'unité stocke le volume ΔV , tels que $Q_{entrant}(t) - Q_{sortant}(t) = \Delta V / \Delta t$] combinés à des calculs simples de perte de charge en écoulement permanent (loi de frottement). Cette approche, peu gourmande en données, peut permettre de dégrossir l'approche du fonctionnement d'un cours d'eau. Elle est indiquée brièvement ici à ce titre, étant entendu qu'elle n'est pas adaptée à l'étude précise des écoulements transitoires.

2. *approches monodimensionnelles* : on admet que chaque tronçon de la rivière a une direction d'écoulement privilégiée, on peut alors considérer que des grandeurs moyennées sur les sections droites de l'écoulement (profils en travers) sont de bonnes approximations.
 - *Modèles de Hayami, Muskingum-Cunge* : la seule variable prise en compte est le débit. En pratique, on considère qu'on dispose d'une relation hauteur-débit (loi de tarage) en chaque point de la rivière ou, ce qui revient en pratique à peu près au même, que l'écoulement est uniforme.
 - *Modèle de Barré de Saint-Venant 1D* : l'écoulement est décrit par un débit et un niveau en chaque point du linéaire. On peut aussi utiliser de façon équivalente une vitesse moyenne à la place du débit et une profondeur ou une section mouillée à la place du niveau. Outre l'hypothèse classique de pression hydrostatique, le modèle de Saint-Venant 1D admet que le niveau est horizontal dans la direction perpendiculaire à l'écoulement. Ce point peut être d'importance dans le cas d'un écoulement en lits composés (lit mineur + lit majeur).
3. *Approches pseudo-bidimensionnelles : modèles à casiers*. En général, on résout de façon monodimensionnelle les équations de St-Venant sur le lit mineur et les écoulements dans la plaine d'inondation (lit majeur) sont représentés à l'aide de casiers interconnectés les uns aux autres et avec le lit mineur par des relations choisies par le modélisateur (loi d'ouvrage, régime uniforme, Saint-Venant 1D, ...). Ce qui fait la complexité d'un tel modèle est que les directions de l'écoulement sont définies par les liaisons entre casiers et doivent être connues a priori par le modélisateur.
4. *Approches bidimensionnelles : modèle de Saint-Venant 2D*. L'écoulement est représenté par un niveau et un vecteur « vitesse moyenne sur la verticale » qui donne à la fois l'intensité de la vitesse et sa direction. On ne fait donc aucune hypothèse a priori sur celle-ci.

Chaque modèle mathématique de base (comme Saint-Venant 1D) est généralement enrichi de modèles complémentaires destinés à prendre en compte des phénomènes hors du champ d'application du modèle de base. C'est en particulier le cas quand on veut simuler la présence de singularités hydrauliques (seuils, ponts, vannes, ...) et quand on doit prendre en compte des débordements en lit majeur (écoulements en lits composés). **Ce dernier point est particulièrement sensible pour les modèles 1D puisqu'un débordement ne se fait généralement pas dans la direction principale de l'écoulement.**

Les modèles de Saint-Venant peuvent être utilisés en régime permanent (stationnaire) et dans ce cas on suppose que la dépendance des variables par rapport au temps est négligeable. En crue, cette approximation est rarement valable et ne devrait pas être utilisée avec le débit de pointe pour estimer l'extension maximale de l'inondation.

Il est bon de souligner pour chaque modèle, les limitations imposées par le choix des variables :

- Hayami, Muskingum-Cunge : on ne peut pas accéder à la hauteur d'eau, sauf à supposer que l'écoulement est uniforme ce qui donne une relation bi-univoque entre le débit et le niveau.
- Saint-Venant 1D : on ne peut pas accéder directement aux vitesses locales, en particulier en lit majeur. A titre d'exemple, un tel modèle serait inadapté pour

déterminer si une inondation de faible profondeur d'un parking d'hypermarché pourrait être dangereuse pour un piéton en raison de la vitesse de l'écoulement.

- Saint-Venant 2D : la principale limitation (applicable a fortiori en 1D) vient de l'hypothèse de pression hydrostatique qui n'est plus valable pour les écoulements à forte pente (pente du fond > 10%).

3.2.2.2 Les données nécessaires

On s'intéresse ici aux modèles de Saint-Venant 1D et 2D.

a) Données topographiques

Les modèles de Saint-Venant et à casiers ont besoin de données topographiques représentant correctement le domaine d'étude qu'il faut définir a priori avec soin. Ce point est d'importance car le modèle ne pourra pas tenir compte de contraintes ou d'influences extérieures qui n'auraient pas été envisagées par le modélisateur. Ainsi négliger un affluent peut conduire à « oublier » une zone d'expansion de crue au voisinage du confluent avec comme conséquence une sur-estimation des niveaux (effet de laminage de la zone non prise en compte) et un mauvais diagnostic sur l'étendue des zones inondables. On retiendra une marge de sécurité dans les limites latérales du modèle topographique, en s'appuyant sur la connaissance des champs d'inondation de crues historiques ou sur une estimation préliminaire par une approche globale simplifiée.

Dans le cas d'un modèle Saint-Venant 1D, on utilise une topographie définie par des profils en travers des lits mineur et majeur. La difficulté réside dans le choix d'implantation des profils à lever. Sachant que les codes de calcul interpolent les données topographiques sur une grille (1D ou 2D) dont le pas d'espace choisi par le modélisateur doit obéir à des critères de qualité numérique, il est inutile de lever des profils très rapprochés. En effet, il est préférable de lever des profils moins nombreux mais bien choisis pour que l'interpolateur géométrique puisse faire du bon travail. Autrement dit, il est inutile de lever beaucoup de profils quand ceux-ci varient peu ou régulièrement ; en revanche, il est nécessaire de repérer toutes les variations brutales de géométrie, en particulier les élargissements brusques, les ruptures de pente et les lignes de structure transversales. Pour cela, il est de bonne pratique de relever un profil en long préalablement au choix des profils en travers.

Pour donner un ordre d'idée, on peut considérer comme raisonnable de lever un profil tous les 500 mètres environ auxquels il faut ajouter les profils levés spécialement aux points singuliers.

Dans le cas d'une modélisation 2D, on utilise de préférence un modèle numérique de terrain (MNT) qui peut être réalisé à partir de profils en travers mais ce n'est pas obligatoire. Comme en 1D, ce n'est pas la finesse du MNT qui en fait toute la qualité mais surtout la **description des lignes de structure du terrain** (routes, digues, voies SNCF, ...). Qu'il s'agisse de profils en travers ou de semi de points, la précision attendue est de l'ordre de la dizaine de centimètres.

Pour des éléments plus détaillés, on pourra se reporter à la version provisoire du guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques [METLTM,2004]. La rédaction de ce guide, édité par le ministère chargé de l'équipement, direction générale de l'urbanisme, de l'habitat et de la construction, est coordonnée par le CETMEF et le Cemagref. Les tableaux synthétiques ci-dessous, extraits du chapitre 6 « bathymétrie et topographie » mis au point par le CETMEF et le CETE Méditerranée, présentent l'inventaire des techniques de levés disponibles et les éléments de coûts et de précisions associés.

TABLEAU SYNTHETIQUE DES TECHNIQUES DE LEVES (d'après [METLTM,2004] version provisoire)

Il s'agit ici de lister toutes les méthodes courantes de levés topométriques. La colonne "observation" est destinée à fournir une description succincte favorable à une vue d'ensemble. Des détails sont accessibles dans les fiches techniques de ce catalogue et dans les annexes techniques éventuellement spécifiées.

| Technique de levé | type de donnée | Association possible ou nécessaire | Pré-requis | précision planimétrique et altimétrique | Eléments de coût | observation | N° Fiche / Annexe |
|---|---|--|--|---|---|--|----------------------|
| photogrammétrie | <ul style="list-style-type: none"> levés linéaires topographiques zones hors d'eau¹ (courbes de niveau, berges, profils terrain, routes, voies SNCF, haies, crêtes / pieds de digues ou talus, ...) semis de points zones hors d'eau levés linéaires éventuels de repérage (lignes électriques,.....) | <ul style="list-style-type: none"> levés terrestres pour les zones masquées (possible, fréquent) levés bathymétriques pour les zones en eau (nécessaires le plus souvent) | Bonne Météo L'échelle Ec des prises de vues vaut au plus ¼ de l'échelle du plan à restituer (environ). Ex : Ec ≥ 1/20000° - levé au 1/5000° : Ec ≥ 1/8000° | En fonction de l'échelle Ec du cliché ² . Exemples : Ec=1/14500° planimétrie : 0.27 m altimétrie : 0.3 m Ec=1/8000° planimétrie : 0.15 m altimétrie : 0.16 m | selon la précision et, dans une moindre mesure, la densité de la restitution. Pour des plans au 1/5000°, entre 3000 FHT et 12 000 FHT par km ² - pour des plans au 1/2000°, 4 fois plus | La précision des points de canevas ou des couples de calage est plus fine que celle des points restitués. Possibilité de commandes distinctes : clichés, stéréopréparation, restitution. Levés bathymétriques indispensables Exemple de ratios réalistes en coûts : 40% vol et stéréopréparation+30% restitution+20% terrestre+10%bathy | F1 A2 |
| Scrutation par Laser embarqué (ALS) | <ul style="list-style-type: none"> semis de points zones hors d'eau (courbes de niveau, berges, profils terrain, routes, voies SNCF, haies, crêtes / pieds de digues ou talus, ...) levés partiels zone végétalisées et faiblement inondées plus difficilement traits de côtes | <ul style="list-style-type: none"> levés terrestres pour les zones masquées (possible, fréquent) levés bathymétriques pour les zones en eau (nécessaires le plus souvent) GPS | Bonne Météo zone assez étendue pour que le coût global soit justifié (coût de mise en œuvre important) | 15 cm annoncés en altimétrie - pas de discrétisation de 50cm en planimétrie | entre 2000 FHT et 3 500 FHT par km ² | technique peu éprouvée, se renseigner sur les productions récentes avant la commande applications comparables à photogrammétrie | F2 A3 |
| levé terrestre³ • théodolite et tachéomètre • GPS | <ul style="list-style-type: none"> levé linéaires topographiques levés d'ouvrages points isolés zones hors d'eau (dont canevas) | <ul style="list-style-type: none"> photogrammétrie préalable : avantageux si la zone à couvrir est étendue bathymétrie pour les zones en eau | Bonne Météo | centimétrique en théorie, en pratique plus généralement sub-décimétrique | Profils de contrôle : environ 5 FHT / ml ou 150 FHT /ha. Levés d'ouvrages et repères des crues : environ 1800 FHT / ouvrage; 150 FHT / repère. Autres profils entre 500 FHT et 2 000 FHT | Le coût est très dépendant de la densité de points demandé et de la nature du terrain La commande peut être liée à une commande données photogrammétrique, certains géomètres proposent alors une association avec un autre cabinet spécialisé dans les levés terrestres | F3 F4 A4 A5 |
| Bathymétrie • perche ou sonde manuelle • sondeur ultrasonore | <ul style="list-style-type: none"> profils en travers lits mineurs ("bande" de points cotés pour la mesure au sondeur ultrasonore) profils en long lits mineurs ("bande" de points cotés pour la mesure au sondeur ultrasonore) semis de points coté de surface étendu pour le sondeur ultrasonore | <ul style="list-style-type: none"> levés terrestres en général GPS obligatoire pour sondage ultrasonore | Bonne Météo Voies navigables pour la bathymétrie ultrasonore | centimétrique à décimétrique | - Manuel: entre 800 FHT et 2500 FHT par profil - Ultrasonore : entre 12 000 FHT et 20 000 FHT pour environ 6 profils | il faut être attentif au géoréférencement de la position en plan, et au rattachement au berge la bathymétrie ultrasonore peut présenter des limites par petits fonds et fonds vaseux | F5 F6 A6 |
| Orthophotographie | <ul style="list-style-type: none"> planimétrie | | Bonne Météo | Très fine (décimétrique) pour la planimétrie. Les cotes, si elles sont fournies à titre indicatif, ne constituent pas une valeur mesurée | | L'orthophotoplan constitue une cartographie de très bonne qualité pour un fond de plan destiné à l'exploitation et à la présentation de résultats de modélisations. Mais sans données d'altimétrie, uniquement utilisable pour les post-traitements | A2 |

¹ lorsque ces zones ne sont pas masquées (végétation, nuages, zones d'ombre,...).

² et non de l'échelle du plan restitué.

³ le terme "levé terrestre" est aussi utilisé pour définir plus généralement les levés avec contact, par opposition aux levés à grande distance (photogrammétrie, ALS).

On peut alors entendre parler de "levés terrestres" pour désigner aussi la bathymétrie. La distinction est faite dans ce tableau, mais pas nécessairement dans le reste de ce catalogue.

Précision des données géométriques ¹ (d'après [METLTM,2004] version provisoire)

| Types de données | nature des données | Nature de l'incertitude (origine) | Ecart le plus probable (ou précision) | Ecart possible (ou tolérance) | Ecart exceptionnel envisageable ² | Commentaires |
|---|---------------------|--|---------------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------------|
| topographiques BD Topo | semis, CDN | Précision (spécifications IGN) | ± 1 m (XY) ± 1.5 m (Z) | ± 2.7 m (XY) ± 4 m (Z) | ± 10 m (XY, Z) | valeurs réglementaires |
| topogr./ photogrammétrie / aérotriangulation Cas Ec=1/8000e(prises de vue) | semis (couples) | Tolérance (arrêté du 21/01/80) | ± 0.1 m (XY) ± 0.1 m (Z) | ± 0.27 m (XY) ± 0.22 m (Z) | ± 0.4 m (XY, Z) | valeurs réglementaires |
| topogr./ photogrammétrie / restitution Cas Ec=1/8000e(prises de vue) | semis, linéaires 3D | Tolérance (arrêté du 21/01/80) | ± 0.15 m (XY) ± 0.15 m (Z) | ± 0.40 m (XY) ± 0.45 m (Z) | ± 0.8 m (XY, Z) | valeurs réglementaires |
| levés terrestres (levés en long, en travers, canevas de géomètres,...) | semis, linéaires 3D | Précision (arrêté du 21/01/80 et arbitraire) | ± 5 à 10 cm (XY) ± 20 cm (Z) | ± 10 à 20 cm (XY) ± 50 cm (Z) | ± 0.5 m (XY) ± 0.7 m (Z) | proche des valeurs réglementaires |
| levés terrestres / ouvrages en lit majeur | semis, linéaires 3D | Précision (arrêté du 21/01/80 et arbitraire) | ± 2 cm (XY, Z) | ± 1 à 5 cm (XY, Z) | ± 10 cm (XY, Z) | proche des valeurs réglementaires |
| bathymétrie / profils en travers ou semis | semis, linéaires 3D | Précision (arrêté du 21/01/80 et arbitraire) | ± 5 à 10 cm (XY) ± 20 cm (Z) | ± 10 à 20 cm (XY) ± 50 cm (Z) | ± 0.5 m (XY) ± 1 m (Z) | proche des valeurs réglementaires |
| bathymétrie : ouvrages en lit mineur | semis, linéaires 3D | Précision (arrêté du 21/01/80 et arbitraire) | ± 2 cm (XY, Z) | ± 1 à 5 cm (XY, Z) | ± 10 cm (XY, Z) | proche des valeurs réglementaires |

¹ Il s'agit de valeurs interprétées : si elles sont issues de textes réglementaires, les grandeurs sont exactes pour les précisions et tolérance, alors l'écart exceptionnel correspondant est arbitraire. Sinon, il s'agit de valeurs issues d'enquêtes et de recueils d'expériences.

² Il s'agit de valeurs arbitraires déterminées de manière subjective en tenant compte des contraintes physiques (site, type de mesure,...) représentant une éventualité réelle maximum. Mais cela ne concerne pas les données manifestement erronées que l'on suppose exclues du jeu de données par le manipulateur avant livraison à l'hydraulicien (erreurs de mesures, perte de l'origine,...).

b) Les ouvrages de stockage

Pour un petit ouvrage de stockage à vocation de ralentissement dynamique, **les données topographiques doivent être suffisantes pour constituer la courbe hauteur-volume de la retenue considérée**. En outre, les organes d'entrée (ouvrage de dérivation sur la rivière) et de sorties (déversoir, buses de vidanges) de la retenue doivent être précisément décrits (dimensions latérales et verticale, calage en cote, type d'ouvrage, asservissement éventuels). Il est alors possible de reconstituer avec fiabilité le fonctionnement caractéristique de l'ouvrage.

Des informations annexes peuvent préciser utilement les conditions de fonctionnement de l'ouvrage, au plan de la quantité (présence de singularités géologiques, karst par exemple) ou de la qualité (pollutions potentielles).

c) Autres données

Les autres données concernent les conditions aux limites et apports en volume, les singularités, l'occupation du sol et les données hydrauliques de calage.

Les conditions aux limites contrôlent l'écoulement aux frontières du domaine d'étude. Sur les frontières entrantes (amont en 1D), on fournit en général un débit (1D) ou une vitesse (2D) à chaque pas de temps. Les choix de méthodes pour définir ces données relèvent de l'étude hydrologique préalable.

Sur les frontières sortantes (aval en 1D), on fournit soit une cote soit une relation hauteur-débit (1D) ou hauteur-vitesse (2D). Hors le cas d'un écoulement permanent ou soumis à l'influence de la marée, il est délicat de fournir une condition à la limite aval en cote car il faut alors bien synchroniser les entrées et sorties du modèle pour qu'un débit sortant à un instant donné et qui dépend à la fois des volumes injectés et de la contrainte aval, corresponde au bon niveau. On préférera en général utiliser des relations hauteur-débit ; celles-ci peuvent être des lois de tarage mesurées (et valides dans les gammes de débits des scénarios à simuler), imposées par des ouvrages dénoyés (seuil avec ressaut) ou artificielles si on n'a rien d'autre. Dans ce dernier cas, on prolonge linéairement la géométrie au delà du point aval et on impose une relation hauteur-débit correspondant à un écoulement en régime uniforme. Une étude de sensibilité au choix de la condition aval est souvent utile pour s'assurer de la pertinence de ce choix.

Les singularités doivent être modélisées de façon aussi précise que possible car bien souvent elles contrôlent fortement l'écoulement. Outre les ruptures de pente, ce sont par exemple les seuils naturels ou non, les autres ouvrages en travers comme les ponts, vannes ou orifices, les élargissements ou rétrécissements brusques, les digues et plus généralement les obstacles à l'écoulement situés en lit mineur ou en lit majeur.

Les singularités sont représentées par des modèles qui viennent en complément de Saint-Venant, généralement une relation entre le débit et la perte de charge due à la singularité. Une telle relation est définie par des données géométriques de la singularité (largeur et hauteur d'un seuil par exemple) et par un coefficient de débit destiné à prendre en compte l'écart entre la singularité réelle et la forme canonique utilisée pour la modéliser. Une bonne connaissance des ouvrages est impérative même si les coefficients de débit peuvent souvent être considérés comme des paramètres de calage capables de corriger des détails de modélisation. Cependant, une bonne pratique de modélisation consiste à ne faire

représenter par les paramètres de calage que les informations dont on ne dispose vraiment pas.

L'occupation du sol renseigne le modélisateur sur les coefficients de rugosité qu'il va devoir utiliser pour modéliser les pertes de charge par frottements sur le fond et les berges (pertes de charge linéaires). Dans la pratique, ces coefficients (Manning, Strickler, Chézy, ...) sont le plus souvent considérés comme des paramètres à caler ;

Le calage consiste à ajuster les valeurs des différents paramètres du modèle de sorte qu'il calcule la propagation de crues réelles avec une marge d'erreur acceptable. C'est une opération capitale, préalable indispensable pour asseoir la fiabilité et la pertinence du modèle, qui sera ensuite utilisé pour simuler des situations hypothétiques de crues. Des données d'observation de crue sont donc nécessaires pour réaliser ce calage. Issues d'observations, d'analyses et de mesures de terrain (enregistrements, laisses de crue), ces **données hydrauliques de calage** sont constituées par les valeurs des cotes et des débits atteints, en différents points, par des crues réelles ayant affecté le bassin versant étudié. Des conseils sur le recueil, l'analyse et la conservation des données d'observation peuvent être trouvées dans le thème « données hydrauliques » de [METLTM,2004].

3.2.3 Exploitation du modèle numérique

L'exploitation du modèle numérique consiste, une fois le modèle considéré comme calé, à comparer les simulations de plusieurs scénarios d'aménagement, chaque fois pour plusieurs scénarios hydrométéorologiques, y compris des scénarios dépassant l'événement de référence de façon à évaluer le comportement de chaque aménagement envisagé dans une situation plus critique, éventuellement associée à une répartition spatiale défavorable des précipitations.

3.2.3.1 Simulation de divers scénarios d'aménagement

Les divers scénarios d'aménagement doivent être modélisés avec le même soin que la situation de référence. Il s'agit en général de créer des variantes du modèle numérique initial représentant la situation de référence. Ces variantes sont réalisées soit en modifiant les données géométriques, soit en ajoutant ou supprimant des singularités, soit en modifiant les coefficients de rugosité pour simuler un changement de l'occupation du sol, soit en combinant plusieurs des modifications précédentes.

Les scénarios d'aménagement représentant des situations hypothétiques, il n'est pas possible de réaliser un calage sur des événements observés. Cela peut entamer la confiance que l'on peut avoir dans les résultats des simulations, en particulier si on envisage des aménagements qui conduisent à modifier sensiblement l'occupation du sol et/ou l'installation d'ouvrages en lit majeur ; ce qui est généralement le cas des études de ralentissement dynamique. Pour pallier ce manque de données d'observation, il faut faire des études de sensibilité sur les paramètres importants des scénarios d'aménagement. Ce sont les coefficients de rugosité et les coefficients de débit des ouvrages. Une telle analyse de sensibilité suppose d'avoir défini auparavant un critère d'intercomparaison des résultats des simulations. Il peut ainsi être judicieux de comparer non seulement l'influence des paramètres sur les hauteurs d'eau maximales (ligne d'eau enveloppe) mais aussi sur les surfaces inondées et la dynamique des écoulements (ralentissement, réduction des concomitances de crue, ...).

3.2.3.2 Simulation de divers scénarios hydrométéorologiques

Les différents scénarios dont il s'agit ici sont ceux du fonctionnement normal de l'aménagement. Il n'est pas raisonnable de se contenter d'un seul événement de référence (crue décennale ou centennale) pour juger de l'efficacité de l'aménagement ; il faut aussi vérifier que l'aménagement n'aggrave pas la situation pour des événements plus fréquents. De la même façon, il faut étudier le comportement de l'aménagement pour une crue dont le débit est supérieur à la crue de dimensionnement.

Comme pour les scénarios d'aménagement, il est prudent de réaliser une étude de sensibilité aux paramètres qui contrôlent les scénarios hydrométéorologiques. On pourra ainsi étudier la stabilité du modèle numérique à de petites variations du débit de pointe, du volume apporté, du temps de montée et de la durée de la décrue.

3.2.3.3 Vérification du fonctionnement au delà du fonctionnement nominal

Il s'agit ici de vérifier le comportement de l'aménagement en dehors de la plage de fonctionnement nominale.

a) Fonctionnement au delà de l'événement de référence

Il s'agit ici d'étudier ce qui se passe quand l'aménagement est soumis à un événement hydrométéorologique qui dépasse l'événement de référence. Par exemple, dans le cas d'une retenue sèche, il faut vérifier non seulement que les dispositifs de surverse fonctionnent correctement mais aussi que, lorsqu'ils fonctionnent, l'ouvrage n'engendre pas une situation pire que celle qui se produirait sans l'aménagement pour le même événement.

b) Scénarios hydrométéorologiques défavorables

On examine ici le comportement de l'aménagement lors des quelques scénarios hydrométéorologiques sélectionnés susceptibles de conduire à un phasage défavorable du régime des crues (concomitances, crues bimodales)

c) Onde de submersion en cas de rupture d'un ouvrage

Dans le cas d'aménagements comme des seuils ou des retenues sèches, il est souhaitable de simuler une rupture de l'ouvrage afin de préparer les mesures de sécurité nécessaires. Pour ce faire il faut utiliser un code de calcul capable de telles simulations qui doivent prendre en compte des lignes d'eau discontinues (ondes de chocs, ressauts, écoulements torrentiels).

3.3 ETUDES DES OUVRAGES DE GÉNIE CIVIL

Nous reprenons ici les différentes catégories d'ouvrages dont le principe de fonctionnement a été décrit au chapitre 2.7 et nous indiquons, pour chacune de ces catégories, les principes de leur dimensionnement hydraulique. Nous abordons ensuite globalement les études géotechniques et le dimensionnement géomécanique.

3.3.1 Dimensionnement hydraulique d'un barrage écrêteur de crues

3.3.1.1 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 :

$$Q = cS\sqrt{2gH}$$

avec : Q [m^3/s] : débit de plein bord en aval dans les zones à enjeux significatifs ;

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

S [m^2] : 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 [CFGB, 1997] 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.

3.3.1.2 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.

3.3.1.3 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 proscrire, 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 :

$$Q = \mu L \sqrt{2g} . h^{\frac{3}{2}}$$

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 ;

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

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 :

$$Q = \mu' . L . h' . \sqrt{2 . g . (h - h')} \text{ avec } \mu' = 3\sqrt{3}\mu / 2 .$$

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. Se référer à ce sujet aux recommandations du Comité Français des Grands Barrages [CFGB, 1997].

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 [MinAgri, 1977] et [BuRec, 1987].

Au débit maximal déterminé comme indiqué ci-dessus, le dimensionnement du seuil permet d'associer une cote, appelée cote des plus hautes eaux. Au delà de cette cote, il convient de rajouter une revanche pour se prémunir contre l'effet des vagues et des éventuels tassements du barrage et de sa fondation. La cote de la partie non déversante du barrage sera calée au niveau des plus hautes eaux majoré de la revanche.

A cette cote de crête du barrage, on peut associer un débit correspondant au début de la surverse sur les parties non protégées du barrage. Ce débit peut lui-même être associé à un hydrogramme de crue dont on peut évaluer la probabilité d'occurrence. Cela permet d'introduire la notion de crue de sûreté, crue au delà de laquelle la sécurité du barrage n'est plus garantie. En général, cette crue de sûreté est associée à une probabilité annuelle de dépassement de 10^{-4} à 10^{-5} .

Le seuil peut être équipé d'un boudin gonflable, de hausses fusibles ou d'un clapet. Ces dispositifs permettent d'améliorer l'efficacité hydraulique de l'aménagement avec un plus grand volume d'écrêtement à moindre coût et un débit de sécurité plus important lorsque le dispositif s'efface, sous réserve d'être assuré de leur bon fonctionnement automatique en toutes circonstances.

3.3.2 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 :

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

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 :

$$Y_A = Y_c + \frac{Q^2}{2gS_c^2}$$

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 calé à la cote de l'eau pour l'événement de référence.

3.3.3 Dimensionnement hydraulique de bassins en dérivation

Le schéma général de fonctionnement est illustré par la figure 15 (chapitre 2.7.3).

3.3.3.1 La section de contrôle du cours d'eau

La section de contrôle du cours 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. Cela se fait en général au moyen d'une section à profil trapézoïdal dont la loi hauteur – débit est déterminée tel que décrit au § 3.3.2 ci-dessus.

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 de la quasi totalité du débit excédentaire vers l'ouvrage de dérivation.

3.3.3.2 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 :

$$Q = \mu L \sqrt{2g} . h^{\frac{3}{2}}$$

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.

3.3.3.3 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'amenée 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.

3.3.3.4 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 embroussaillage qui serait alors nuisible au bon écoulement de l'eau.

3.3.3.5 Les ouvrages 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 et on trouvera dans [CFGB, 1997] des recommandations plus complètes pour le calcul de la revanche.

3.3.3.6 Conclusions sur le dimensionnement de bassins en dérivation

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...).

3.3.4 Dimensionnement de digues de protection

Comme indiqué au § 2.7.4, 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 se prémunir de l'effet des vagues.

L'hypothèse d'une crue dépassant l'événement de référence doit absolument être prise 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.

3.3.5 Etudes géotechniques et dimensionnement géomécanique

En ce qui concerne les aspects liés au génie civil, portant sur le traitement de la fondation et sur les ouvrages en béton ou en remblai, on se référera aux recommandations et guides techniques en vigueur dans le domaine des barrages [MinAgri, 1977], [BuRec, 1987], [CFGB, 1997], [CEA, 2000], en gardant à l'esprit que les ouvrages décrits dans le présent guide présentent, par rapport aux barrages de retenue permanente, des particularités, certaines défavorables et d'autres favorables :

- il sera, le plus souvent, très difficile voire impossible, de réaliser une première mise en eau contrôlée¹ ;
- de même, les retenues n'étant que rarement remplies, la surveillance régulière des ouvrages ne nous renseignera que très peu sur leur comportement en conditions de sollicitations maximales ;

¹ Cependant, pour un ouvrage important, on prévoira si possible une mise en eau initiale contrôlée, au moins partielle, par exemple par mise en place de batardeaux provisoires.

- a contrario, les sollicitations hydrauliques sont rares et de courte durée, et les conditions d'écoulements permanents internes à la fondation et au remblai (conditions les plus sévères) n'auront en général pas le temps de s'établir.

Ce dernier aspect n'est à prendre en compte que pour autant qu'il n'y ait pas de changement futur dans le fonctionnement des ouvrages, tel que la transformation d'un barrage sec en barrage à retenue permanente.

Gardons par ailleurs en mémoire que ces ouvrages intéressent quasiment toujours la sécurité publique, au sens que leur rupture éventuelle aurait pour conséquence d'augmenter nettement les effets des crues vis-à-vis desquelles ils sont censés apporter une protection.

Tous ces éléments plaident pour des règles de conception et de dimensionnement de ces ouvrages qui soient aussi sévères que celles des barrages de retenue permanente, bien sûr toutes proportions gardées concernant leur taille. Mais justement, la référence [CFGB, 1997] donne des recommandations modulées en fonction de la taille des barrages. On pourra donc utilement s'y reporter. De même, la référence [CEA, 2000] fournit le cadre pour le CCTP et le bordereau des prix pour la construction de petits barrages et s'adapte bien au contexte des ouvrages en remblai décrits dans le présent guide.

Le seul point sur lequel on peut envisager une conception moins sévère concerne les filtres et drains. En effet, et sous réserve de vérification en fonction de la perméabilité des matériaux, la faible durée des sollicitations hydrauliques ne devrait pas conduire à la saturation du barrage et à l'établissement de conditions d'écoulement permanent dans le remblai. Les risques de suffusion (érosion interne diffuse) sont donc très limités et la capacité des drains ne sera pas un point crucial. Pour les ouvrages de faible hauteur, on pourra envisager, bien sûr en la justifiant, la suppression des drains.

Par contre, le risque de renard doit être sérieusement évalué, car il peut se développer, même en cas de sollicitation hydraulique de courte durée. On prendra donc toutes les dispositions habituelles en ce qui concerne le traitement des hétérogénéités en fondation, le traitement des surfaces de contact entre béton et terre et le passage d'éventuelles conduites. Au titre des mesures de surveillance et d'entretien des remblais, on contrôlera l'apparition éventuelle de terriers et on empêchera toute implantation de végétation arborée dont les racines pourraient, à terme de leur pourrissement, constituer autant de cheminements préférentiels pour initier un renard.

Le choix des matériaux de remblai et leur mise en œuvre (épaisseur des couches, teneur en eau, compactage, scarification entre couches) devront faire l'objet de prescriptions précises. Enfin on attachera une attention particulière, faut-il le rappeler, à la vérification et au respect des cotes des remblais et des organes hydrauliques.

Ces recommandations s'appliquent également aux projets de transformation de remblais routiers ou ferroviaires que l'on souhaite voir jouer un rôle de mobilisation des champs d'expansion de crue (voir le paragraphe 2.6.2.1).

3.4 ENTRETIEN ET SURVEILLANCE DES OUVRAGES

Avec des ouvrages qui n'entrent que rarement en fonction, la tentation de l'oubli est grande. Mais en cas de négligence dans leur entretien, voire d'abandon total, le rappel à notre souvenir n'en serait que plus brutal car, encore une fois, ces ouvrages qui protègent contre les crues sont susceptibles, en cas de dysfonctionnement, d'aggraver considérablement les

effets du phénomène naturel. **Ces considérations amènent à insister sur la nécessité absolue d'un entretien et d'une surveillance réguliers.**

Deux guides pratiques ont été rédigés et édités par le Cemagref, l'un pour les barrages [Peyras, 2003] et l'autre pour les digues [Mériaux, 2001] et ils s'appliquent en grande partie aux ouvrages de ralentissement dynamique décrits dans le présent guide.

En conséquence, seuls sont indiqués ici les grands principes de la surveillance et de l'entretien des ouvrages de ralentissement dynamique, en traitant ces aspects par grandes catégories d'ouvrages. En effet, les opérations d'entretien et de surveillance seront le plus souvent couplées, en ce sens que la surveillance nécessite souvent un entretien préalable (nettoyage de la végétation par exemple) et qu'elle débouche régulièrement sur des travaux de réparation. Un paragraphe spécifique traite du contrôle de ces ouvrages, mission régaliennne de l'Etat qui s'exerce dès qu'un ouvrage est classé comme intéressant la sécurité publique.

Pour chaque aménagement, l'arrêté d'autorisation indique l'ensemble des modalités de la surveillance et du contrôle.

3.4.1 Les barrages écrêteurs et les ouvrages de mobilisation du lit majeur

Du moment où ils sont classés comme intéressant la sécurité publique, ces ouvrages sont soumis à des dispositions très précises de surveillance et de contrôle, qui sont décrites en particulier dans la circulaire interministérielle n°70-15 du 14 août 1970. On pourra aussi se référer au guide pratique sur l'entretien des petits barrages [Peyras, 2003].

Il est prévu des inspections visuelles et des mesures d'auscultation, dont la périodicité est à fixer au cas par cas en fonction de l'importance de l'ouvrage. Des visites annuelles sont organisées par le service de contrôle, en présence du propriétaire, de son exploitant éventuel et de son ingénieur conseil. Pour les barrages avec un plan d'eau permanent, des visites décennales permettent l'inspection des parties immergées ou très difficiles d'accès, parties non inspectées lors des visites annuelles.

Pour tous ces ouvrages, une mesure essentielle est celle de la cote du plan d'eau amont, car elle va permettre d'enrichir les données hydrologiques et de valider le bon fonctionnement hydraulique. Sur les grands et moyens ouvrages, il est recommandé de disposer de **deux** moyens d'enregistrement de la cote du plan d'eau, fonctionnant de façon totalement indépendante et selon des principes de mesure différents (flotteur, capteur de pression, mesure par ultrasons ...).

Un autre point particulier de la surveillance et de l'entretien concerne les embâcles et les matériaux transportés par charriage. Ils doivent régulièrement être dégagés après chaque crue, de façon à éviter leur accumulation dans la retenue et devant les grilles. Le cas échéant, ce point peut justifier des mesures préventives à l'échelle du bassin versant.

Pour les barrages, la troisième particularité tient au fait que la retenue est pratiquement toujours vide et que l'on dispose donc de très peu de mesures et d'observations sur le comportement de l'ouvrage au voisinage de sa cote maximum. La surveillance et l'auscultation pendant les épisodes de crues moyennes sera donc extrêmement précieuse. La même remarque s'applique bien sûr aux crues rares et exceptionnelles, à la nuance près que, dans ces situations, l'exploitant aura comme priorité de s'assurer du bon fonctionnement des organes hydrauliques et sera moins disponible pour effectuer des

mesures et observations détaillées. Ces dernières seront donc faites aussi tôt que possible à la décrue.

Pour un barrage écrêteur bien conçu et bien réalisé, on peut estimer que le coût total de la surveillance, de l'entretien et de la maintenance courants (y compris les prestations réalisées en régie) représente annuellement de 0,2 à 0,5% du prix de l'ouvrage. Ce coût est donc à prévoir par le propriétaire, alors qu'en général un tel ouvrage ne génère aucune rentrée financière.

3.4.2 Les ouvrages de stockage en dérivation et les digues

Les modalités doivent en être décrites dans des consignes, dont le contenu pourra s'inspirer des pratiques recommandées dans [Mériaux, 2001] On sera attentif au contrôle de la végétation : fauchage (bi)annuel de la végétation herbacée sur les talus, lutte contre le développement de la végétation arborée sur les remblais et sur une bande de 5 à 10 m au delà des pieds de talus. Les chemins de service en crête et en pieds de talus seront régulièrement entretenus : comblement des nids de poule, regravillonnage. On surveillera attentivement l'apparition de terriers sur les talus ou en pied de remblais et on procédera, si besoin, à des campagnes de lutte contre les animaux fouisseurs, en sachant que l'entretien régulier des digues est un moyen efficace de prévention vis-à-vis de ces hôtes indésirables.

Pour faciliter la surveillance et l'entretien des digues, on instaurera une bande de servitude d'au minimum 5 m de largeur en pied de chaque côté. Un chemin y sera aménagé (même sommairement) et on y proscrit tout labour ou plantation d'arbres.

Les particularités concernent les ouvrages hydrauliques de dérivation de la rivière, de trop-plein et de vidange des bassins ; il convient de s'assurer régulièrement (et en particulier après chaque crue) qu'ils ne sont pas obstrués et de les dégager en tant que de besoin. On surveillera aussi très attentivement qu'ils ne soient ni contournés ni affouillés, ce qui nuirait rapidement à leur pérennité.

3.4.3 Les organes vannés

Ces organes, essentiels au bon fonctionnement et à la sécurité de l'aménagement, doivent faire l'objet de procédures de surveillance et d'entretien particulièrement rigoureuses. La surveillance des vannes repose en premier lieu sur des essais réguliers et sur toute la plage de fonctionnement. Ces essais, réalisés en général à vide, ne permettent malheureusement pas de s'assurer du bon fonctionnement des vannes en charge. On testera aussi des fonctionnements en mode dégradé (manœuvre manuelle d'un organe automatique).

Il est recommandé de conduire une analyse des modes de défaillance et de leurs effets et de prévoir, dans les consignes, les mesures à prendre face à des dysfonctionnements.

L'entretien et la maintenance porteront sur les vannes, les vérins, leur système de manœuvre et de commande et tout le dispositif éventuel de télésurveillance. On adoptera une politique de maintenance systématique, à la rigueur de maintenance conditionnelle, mais certainement pas de maintenance curative.

Il est recommandé que le propriétaire, s'il ne dispose pas de compétence particulière sur tous ces aspects, passe un contrat de maintenance avec une entreprise spécialisée.

Le coût moyen annuel de gestion, de maintenance et d'entretien des vannes peut être estimé dans la fourchette de 5 à 10% du prix de fourniture.

3.4.4 Le contrôle des ouvrages

Les ouvrages décrits dans ce guide relèvent pour la plupart de l'autorisation au titre de la Police des eaux. Le service de police des eaux compétent sur le cours d'eau concerné sera chargé de l'instruction technique et administrative du dossier, au terme de laquelle il proposera éventuellement l'autorisation. Pour des ouvrages classés comme intéressant la sécurité publique, le service de police des eaux est également chargé du contrôle de la sécurité, contrôle qui consiste à s'assurer que chacun des intervenants (propriétaire, exploitant éventuel, sous-traitants, bureau d'étude spécialisé) a un rôle bien défini et qu'il remplit correctement le rôle qui lui est assigné.

Il appartient au propriétaire de définir par voie contractuelle les responsabilités et tâches de chacun de ses opérateurs et le Service de contrôle est en droit de vérifier ces liens contractuels.

Pour les barrages, les modalités du contrôle sont décrites dans la circulaire interministérielle 70-15 du 14 août 1970 et imposent en particulier une visite annuelle du Service de contrôle. Pour les autres ouvrages, une circulaire sur la surveillance et le contrôle des digues est en cours de préparation.

3.5 ANALYSE DES RISQUES DE DÉFAILLANCE

Les aménagements qui sont décrits dans le présent guide sont en général assez complexes et comportent des ouvrages multiples avec des interactions fortes. Il y a donc lieu d'analyser les risques avec rigueur, en s'inspirant de méthodes éprouvées, dans le cadre d'études d'analyse de risques à l'échelle du bassin versant, ou au moins de l'ensemble d'un aménagement.

Une définition assez générale du risque est utilisée ici : *le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets et conséquences*. Le risque apparaît donc comme une fonction à deux variables. Pour l'obtenir, il conviendra d'évaluer *la fréquence (ou la probabilité)* d'apparition d'un événement indésirable (une défaillance ou un aléa) et *les conséquences* auxquels il faut s'attendre si cet événement survenait.

Il s'agira donc, d'une part, d'analyser l'ensemble des défaillances possibles du système en remontant à leur(s) origines(s), et, d'autre part, d'évaluer les conséquences de ces défaillances.

Pour mener rigoureusement une étude d'analyse de risques sur de tels aménagements, parmi les différentes démarches existantes, nous recommandons, dans notre cas, les approches globales d'analyse. Ces approches sont déployées par *modélisation fonctionnelle du système*.

Cela consiste, tout d'abord, à produire une analyse fonctionnelle du système hydrographique et de ses aménagements (décomposition de l'aménagement considéré dans sa globalité en un certain nombre d'ouvrages élémentaires interconnectés, puis identification des fonctions de chaque ouvrage). Ensuite, on pourra établir de manière formelle les liens entre les

défaillances, leurs causes et leurs effets. Parmi les différentes techniques d'analyse de risques, citons en particulier l'AMDE (Analyse des Modes de Défaillance et de leurs Effets), la méthode des Arbres des Conséquences ou la méthode des Arbres de Causes, la première de ces méthodes étant plus particulièrement à recommander.

Ces méthodes utilisées couramment dans l'industrie nécessitent quelques adaptations pour être appliquées dans notre domaine, mais il est important d'en adopter les principes pour prendre en compte et évaluer l'ensemble des risques. Selon l'importance des aménagements hydrauliques, ces études pourront être plus ou moins poussées.

Des simplifications peuvent être introduites dans ces études, en particulier pour l'évaluation des *conséquences* de telle ou telle défaillance. Des approches qualitatives simplifiées (évaluation du nombre de maisons inondées ou de la surface concernée par l'inondation par exemple) peuvent être suffisantes pour fixer une idée des conséquences de la défaillance en jeu.

Dans un aménagement avec des ouvrages en cascade, l'étude d'analyse de risques doit prendre en compte les défaillances des ouvrages aval consécutives à des défaillances des ouvrages amont. Par ailleurs, quelques modes de défaillance sont d'ores et déjà identifiés et doivent être analysés :

- les scénarios d'événements hydrométéorologiques dont la probabilité d'occurrence dépasse l'événement de référence ayant servi au dimensionnement optimal de l'aménagement, et les scénarios défavorables ;
- les dysfonctionnements ou accidents de vannes, y compris liés à des erreurs humaines ;
- le dépassement de la capacité des déversoirs et la surverse sur les remblais, créant érosion et brèche sur toute la hauteur² ;
- les autres mécanismes éventuels de ruptures d'ouvrages, tels que l'érosion interne des remblais (renard hydraulique, puis brèche), affouillements, etc...

Au final, une représentation du risque peut être faite dans un plan conséquence/fréquence : les *conséquences* sont portées en abscisse et représentent soit un nombre de victimes ou un coût économique, soit une évaluation simplifiée des effets (nombre de maisons inondées) ; la *fréquence* est portée en ordonnée. On peut ainsi comparer la situation avant et après aménagement et avoir une vue synthétique de la diminution du risque apportée par l'aménagement.

Pour une présentation plus complète de ces méthodologies, on pourra se reporter à l'Annexe D qui détaille le contenu d'une étude d'analyse de risques ou de sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique et indique les références bibliographiques principales.

² La modélisation la plus réaliste consiste à simuler la vidange de la retenue, couplée à une érosion progressive de la digue, d'abord par approfondissement de la brèche jusqu'au niveau de fondation, puis par élargissement de la brèche. On peut, en première approche, faire un calcul hydraulique en régime permanent en adoptant des hypothèses simplifiées sur la forme de la brèche, qui sont : hauteur égale à la hauteur totale de la digue, largeur égale au moins à trois fois la hauteur de la digue.

3.6 COMPARAISON ÉCONOMIQUE DE DIMENSIONNEMENTS D'OUVRAGES

L'exemple présenté ici revêt un caractère méthodologique, dans une première partie, puis illustre, par des données chiffrées, le cheminement vers le choix économique de projet. Il convient de rappeler qu'il n'existe pas, à ce jour en France, de guide normatif pour le calcul économique appliqué aux inondations (pour un ouvrage de synthèse des approches socio-économiques en France, voir [HUBERT, 1999]) et que l'exemple proposé ci-dessous n'a pas vocation à combler ce vide. Il rassemble quelques conseils et détaille les outils disponibles pour pratiquer des évaluations économiques. L'exemple numérique développé en seconde partie est adapté d'un cas anglais. Cette référence étrangère se justifie par le fait que ce pays dispose d'une meilleure expérience en matière d'évaluation économique des inondations³, ce qui lui a permis de les améliorer. De plus, les travaux anglais ont largement influencé un ouvrage français de référence [TORTEROTOT,1993], dont s'inspirent de nombreux bureaux d'études dans leurs pratiques économiques sur les inondations. La mise en œuvre des méthodes de valorisation des dommages potentiels par les EPTB pourra constituer une voie d'approfondissement utile aux utilisateurs de ce guide. Le souhait d'obtenir des évaluations les plus représentatives de la situation locale s'est traduit, dans la démarche de chaque établissement, par des équilibres différents entre la reprise de données-type et leur adaptation par des collectes d'informations locales.

3.6.1 Horizon temporel et aversion au risque dans les calculs économiques

Lorsque deux projets sont en compétition, leurs durées de vie T1 et T2 ne sont en général pas les mêmes. Puisqu'il faut prendre en compte la totalité des avantages et des coûts de chacun d'eux, il convient de les comparer sur une même durée T au moins égale à T1 et T2. Le plus raisonnable est en général de supposer que ces deux projets seront reproduits à l'identique. On choisit alors pour horizon T le plus petit commun multiple à T1 et à T2.

L'aversion au risque, par simplicité, n'est généralement pas prise en compte en première approche. C'est le cas dans l'exemple présenté.

3.6.2 Evaluation des coûts des dispositifs de prévention

Les coûts sont à entendre au sens des coûts des travaux pendant toute la durée de vie des ouvrages ou systèmes préventifs, ainsi que les coûts de gestion associés. Les coûts d'un projet comprennent ainsi tous les coûts du capital, de la maintenance et des dépenses courantes. Les coûts de maintenance se décomposent en :

- coûts attendus des réparations, suite à des inondations ;
- coûts de démontage ou mise hors service des installations.

Les coûts des dispositifs de prévention sont très dépendants du site, de la complexité de l'ouvrage à construire, des risques, des contraintes de temps de réalisation,...Lorsqu'il n'est pas possible de disposer de données historiques, issues de la littérature pour les évaluer lors des études préliminaires de choix de projet, il peut être fait recours à des données fournies par les opérateurs qui ont une expérience commerciale de cette infrastructure.

³ Le ministère de l'Agriculture et de l'Environnement britannique (DEFRA) a édité un guide méthodologique : "Food and Coastal Defence Project Appraisal. Economic Appraisal."

3.6.3 Evaluation des dommages des inondations

3.6.3.1 Dommages directs et indirects aux propriétés urbaines

Lorsque les propriétés sont susceptibles d'être jugées définitivement inhabitables, leur valorisation doit être conduite en s'interrogeant sur la prise en compte ou non de la moins value, liée au risque d'inondation.

Sur les sites où une inondation s'est produite récemment, le recours aux données enregistrées à cette occasion sera souvent la source initiale des évaluations. Toutefois, l'utilisation de ces données est limitée, car elles ne couvrent pas l'éventail des types d'inondations possibles, alors que le choix de projet par le calcul économique nécessite de connaître ces données pour une large gamme d'aléas. De plus, l'enregistrement des valeurs des dommages est souvent tenu dans un but financier (dommages financiers, dommages assurés) et non pas économique, ce qui impose un retraitement. Aussi, l'évaluation monétaire des dommages potentiels ne pourra se faire qu'à partir d'une caractérisation des enjeux : enquêtes locales ou désagrégation d'enquêtes nationales appliquées au secteur inondé (recensement INSEE). Les dommages potentiels seront ensuite estimés par des courbes d'endommagement.

L'évaluation des dommages aux propriétés urbaines commence avant tout par le recensement du nombre de logements dans la zone inondable. Les méthodes utilisées à ce jour pour cette comptabilisation ont été :

- comptage manuel (fond cadastral des PPR ou campagne de terrain). Cette méthode est avant tout réservée aux zones d'habitat dispersé ;
- reprise de références de densités surfaciques de logements édictées par l'Equipe du Plan Loire Grandeur Nature, dans les zones urbaines denses. Ces données existent pour des logements collectifs hauts (supérieurs à 3 étages) ;
- utilisation de données du recensement INSEE (voir guide pratique de l'estimation, DIREN Languedoc-Roussillon, juin 2002).

Les courbes d'endommagement, qui sont ensuite appliquées, sont basées soit sur la surface de la zone d'habitations inondées, soit sur le nombre de propriétés inondables. La méthode généralement utilisée consiste à compartimenter le secteur inondable en zones d'enjeux homogènes, selon la segmentation suivante : casier hydraulique, mode d'occupation du sol (habitat collectif / individuel) et type d'habitat (présence / absence de sous-sol). A l'intérieur de chaque classe, puis par addition sur toute la zone inondable, on calcule le dommage potentiel en tenant compte :

- de la hauteur d'eau qui concerne le niveau habité (modélisation hydraulique et enquêtes) ;
- de la durée de l'inondation (modélisation hydraulique) ;
- du nombre de logements en rez-de-chaussée et de la population touchée (enquêtes) ;
- de la valeur monétaire du bien (enquêtes) ;
- d'un coefficient de qualité du bâti (enquêtes) ;
- du taux d'endommagement (fourni par la méthode).

3.6.3.2 Dommages aux activités semi-permanentes

Dans le cas particulier des constructions semi-permanentes (camps de mobile-homes et caravanes ou chalets), il semble logique de préconiser que :

- dans un scénario où rien n'est fait, les installations mobiles (mobile home, caravanes) peuvent être délocalisées. Le dommage est donc limité au coût de transport et à la perte des équipements fixes, une fois dépréciés ;
- dans un scénario où le site est protégé, les dommages correspondants soient évalués à partir des courbes d'endommagement type, en tenant compte de l'occupation saisonnière de l'habitat.

3.6.3.3 Dommages directs et indirects aux activités

Comme précédemment, le secteur inondable est compartimenté en zones d'enjeux homogènes, selon la hiérarchie suivante : casier hydraulique, mode d'occupation du sol et type d'activité, d'après la classification selon le code de la Nomenclature des Activités Françaises (NAF). La mise en oeuvre du calcul économique montre que la valorisation des dommages de ce secteur demande une forte adaptation locale au travers des données :

- nombre d'employés (enquêtes) ;
- valeurs immobilières du matériel et du stock (travail d'expertise locale) ;
- chiffre d'affaire moyen annuel (enquêtes)
- taux d'endommagement (travail d'expertise locale) ;
- coefficient de perte d'exploitation (travail d'expertise locale).

3.6.3.4 Dommages directs et indirects aux équipements (hors réseaux) et à l'agriculture

La méthode concerne les équipements administratifs, établissements de santé, d'enseignements et sportifs situés en zone inondable. Comme précédemment, le secteur inondable est compartimenté en zones d'enjeux homogènes. Le calcul du dommage potentiel tient compte des données spécifiques aux enjeux étudiés :

- surface occupée par chaque équipement / surface agricole (enquêtes) ;
- valeur monétaire surfacique de chaque enjeu (enquêtes) ;
- taux d'endommagement (fourni par la méthode).

Concernant l'agriculture, l'organisation globale de l'exploitation doit être prise en compte et pas seulement le champ endommagé, car le changement de pratique culturale a des implications sur toute l'exploitation.

3.6.4 Un exemple de comparaison économique de dimensionnements d'ouvrages

L'exemple⁴ développé présente un cas où deux dispositifs de prévention sont combinés – le stockage amont et le renforcement des digues. De fait, il s'agira le plus souvent d'apprécier non pas une mesure de prévention mais la combinaison de plusieurs dispositifs.

3.6.4.1 Situation examinée

Une commune est en partie située en zone inondable. Historiquement, elle s'est protégée des inondations en construisant des digues le long de la rivière, mais elle subit néanmoins encore deux types de sinistres :

- *inondation par surverse au-dessus des digues* : trente propriétés et un moulin à papier, situés dans son champ d'inondation, peuvent être endommagés de façon plus ou moins importante, selon l'intensité de l'inondation ;
- *inondation par rupture de digue* : dans ce cas, une partie importante de la ville est sinistrée. Dans la situation actuelle, un tel événement a une fréquence de retour décennale.

3.6.4.2 Présentation des différents scénarios de protection envisagés

Scénario de référence ou option 1 : « absence d'intervention ». Dans ce scénario, rien n'est entrepris. Il est important à ce stade d'avoir une vision prospective, car ceci ne signifie pas que la situation est figée dans le temps (quelle évolution des enjeux est prévue au cours du temps ?). Dans cet exemple, les digues, déjà affaiblies, continuent alors de s'éroder, ce qui augmente leur probabilité annuelle de rupture. Celle-ci passe linéairement de 1/10 initialement à 1/5 au bout de 50 ans.

Les autres scénarios envisagés consistent à valoriser au mieux l'efficacité des investissements déjà faits, mais aussi à créer de nouveaux investissements dans une stratégie intégrée et dans une vision à l'échelle du bassin versant et portant sur la rétention des flux en amont. Ceci se décline par le renforcement des digues existantes (diminution du risque de rupture) et la création d'un stockage amont, assurant une protection centennale vis-à-vis des inondations par surverse. Trois options sont envisagées, selon le niveau de protection choisi par rapport au risque de rupture des digues, qui se traduisent par des coûts d'investissements initiaux et de maintenance décennale différents concernant les digues – d'autant plus élevés que le niveau de protection augmente.

- A) Option 2 : protection vingtennale ;
- B) Option 3 : protection cinquantennale ;
- C) Option 4 : protection centennale.

Dans chacun de ces 3 scénarios, on estime que la maintenance décennale permet de maintenir les berges dans leur état initial et que, en conséquence, la probabilité de rupture est constante tout au long de la période, à la différence du scénario de référence où elle s'aggravait.

⁴ L'ensemble des données est consultable sur le site Internet : <http://www.defra.gov.uk/envIRON/fcd/pubs/pagn/fcdpag3>

La commune a souhaité disposer d'un éclairage sur l'efficacité économique de ces scénarios et a donc évalué les coûts et les bénéfices associés au projet pour comparer chacun d'eux.

3.6.4.3 Evaluation des coûts

Les coûts actualisés, relatifs à la mise en oeuvre de chaque scénario, sont obtenus sur la base de coûts d'investissement initiaux et de maintenance préventive décennale. Le coût total actualisé de chaque option est la somme des coûts annuels actualisés sur la période. Celle-ci est fixée à 50 ans, du fait de la variation régulière de la probabilité de rupture de digue sur cette durée.

coût total actualisé de chaque option

| | Pas d'intervention | Option 2 | Option 3 | Option 4 |
|--|--------------------|----------|----------|----------|
| Coût total actualisé (10³ €) | - | 2 672 | 3 401 | 5 429 |

A- Evaluation des dommages

Etape 1/ Dommages issus de la protection contre la surverse :

L'évaluation des dommages associés à la surverse est conduite en utilisant des courbes d'endommagement, qui font correspondre à la valeur d'un bien la valeur de son dommage, pour un aléa de fréquence F, en fonction de la hauteur d'eau attendue au droit de ce bien, telle qu'elle ressort de modèles hydrauliques. Sur cette base, une quantification des dommages est réalisée, pour 8 événements susceptibles de se produire sur la zone (de période de retour 5 ans à 250 ans). Selon l'ampleur de l'aléa, les dommages prennent en compte en tout ou partie les coûts pour les habitations, les activités commerciales, le transport (route coupée) et le coût des secours. La valeur moyenne annuelle courante du dommage a été obtenue en faisant la somme des dommages générés par chaque aléa, pondérés par la fréquence de retour de chaque aléa.

$$\sum_{\text{Evènements}} (\text{fréquence de retour d'un événement } \alpha) * (\text{coût des dommages associé à l'événement } \alpha)$$

Ce mécanisme a été appliqué à chaque scénario, y compris celui de référence (absence d'intervention). De fait, hormis pour ce scénario de référence, tous les autres scénarios conduisent à une valeur de dommage moyen annuel identique, puisqu'ils correspondent tous au même niveau de protection centennal, en ce qui concerne le risque de surverse, qui est géré par le bassin amont.

Etape 2/ Dommage issu de la protection contre la rupture de digue et dommage total

Concernant la rupture de digue, la valeur annuelle courante du dommage lié à cet aléa est constante. Elle est estimée à 14, 5 millions €.

Finalement chaque année, la commune est soumise à deux risques potentiels, qui s'excluent : inondation par rupture de digues ou par surverse. Le dommage total s'obtient par l'addition :

(valeur courante du dommage rupture * proba. rupture pour l'année n) +

(valeur courante du dommage moyen annuel surverse * proba. non-rupture pour l'année n)

= Valeur courante annuelle totale du dommage

Dans le but de pouvoir comparer les stratégies de protection, il convient alors de ramener les coûts et bénéfices de chacun sur une base comparable. Ceci est fait en transformant les valeurs monétaires des années n en valeurs pour une année de base commune, via l'actualisation, puis en sommant ces valeurs actualisées.

$$\text{Coût total actualisé du dommage} = \sum_{t=1}^{t=50\text{ans}} \text{Coût annuel du dommage} / (1 + \text{taux d'actualisation})^t$$

L'évaluation doit être conduite de la sorte pour chaque scénario, puisque les probabilités de rupture de digues sont différentes pour chacun d'eux et que les valeurs du dommage annuel moyen courant issues de l'inondation par surverse diffèrent également entre le scénario de référence et les autres.

Valeurs actualisées du dommage total

| | Pas d'intervention | Option 2 | Option 3 | Option 4 |
|---|--------------------|----------|----------|----------|
| Coût actualisé du dommage (10³ €) | 10 378 | 1 544 | 672 | 381 |

B- Bilan coûts / avantages des différents scénarios

Les trois scénarios sont comparés sur la base de leur coût de mise en oeuvre et des bénéfices qu'ils induisent. Le bénéfice lié à chaque scénario est traduit par un coût de dommage évité, en référence au scénario où rien n'est entrepris. La valeur actualisée nette (VAN) du projet constitue alors l'outil de comparaison. Elle résulte de la différence entre les valeurs actualisées (Bénéfice – Coût). L'utilisation retenue doit être celle qui produit la valeur maximale des bénéfices, nets des coûts à engager (Max (VAN)).

| | | | | |
|---|--------------------|----------|----------|----------|
| Année de base de l'estimation | oct-1999 | | | |
| Unité de compte | 10 ³ € | | | |
| Taux d'actualisation | 6%* | | | |
| Coûts et Bénéfices des options | | | | |
| | Pas d'intervention | Option 2 | Option 3 | Option 4 |
| Coûts actualisés (1) | - | 2 672 | 3 401 | 5 429 |
| Coût actualisé du dommage (2) | 10 378 | 1 544 | 672 | 381 |
| Coût actualisé du dommage évité (3) | | 8 834 | 9 707 | 9 998 |
| Bénéfices actualisés (4) | | 8 834 | 9 707 | 9 998 |
| Valeur Actualisée Nette VAN : 4) – (1) | | 6 163 | 6 305 | 4 567 |

* : en France, le taux d'actualisation généralement utilisé est celui fixé par le Commissariat Général au Plan, soit 8%. Des écarts motivés à cette valeur sont possibles.

4 CONTEXTE ADMINISTRATIF ET REGLEMENTAIRE

4.1 LE PROJET D'INTÉRÊT GÉNÉRAL

Avant de détailler plus loin les principales procédures administratives et réglementaires, il convient de rappeler la possibilité, qui peut s'avérer utile dans certains cas, de faire qualifier le projet par le préfet de projet d'intérêt général (P.I.G) dont le principe est prévu aux articles L.121-2 et L.121-9 du code de l'urbanisme.

Selon l'article R.121-3 du code de l'urbanisme, peut constituer un P.I.G, tout projet d'ouvrage, de travaux ou de protection présentant un caractère d'utilité publique, à condition qu'il soit destiné, notamment, à la prévention des risques, et qu'il ait fait l'objet d'une délibération ou d'une décision d'une personne ayant la capacité d'exproprier, arrêtant le

principe et les conditions de réalisation du projet et mise à disposition du public, ou d'une inscription dans un document de planification publié.

Selon l'article R.121-4, le préfet qualifie un projet de P.I.G par arrêté, qu'il notifie à la personne qui élabore le document d'urbanisme. L'arrêté n'est valable que 3 ans après cette notification. Il peut être renouvelé.

La reconnaissance d'un P.I.G par le préfet oblige les autorités locales à modifier en conséquence leurs documents d'urbanisme.

4.2 LE RÉGIME D'AUTORISATION OU DE DÉCLARATION AU TITRE DE LA POLICE DE L'EAU

Afin de répondre aux objectifs fixés par la gestion équilibrée de la ressource en eau visée à l'article L.211-1 du code de l'environnement, sont soumis à autorisation ou à déclaration suivant les dangers qu'ils présentent et la gravité de leurs effets sur la ressource en eau et les écosystèmes aquatiques les installations, ouvrages, travaux et aménagements entraînant par exemple, des prélèvements d'eau ou des modifications de niveau ou du mode d'écoulement des eaux.

L'article L.214-3 de ce même code soumet au régime de l'autorisation, délivrée après enquête publique, les installations, ouvrages, travaux et activités susceptibles de présenter des dangers pour la santé et la sécurité publiques, de nuire au libre écoulement des eaux, de réduire la ressource en eau, d'accroître notablement les risques d'inondation, de porter gravement atteinte à la qualité ou à la diversité du milieu aquatique.

Il soumet au régime de la déclaration les installations, ouvrages, travaux et activités dont les incidences sur la ressource et le milieu sont limitées, mais qui doivent néanmoins respecter les prescriptions générales.

L'examen des demandes d'autorisation ou de déclaration relève de la compétence du préfet qui assure la police de l'eau dans le département. Les modalités d'instruction de ces demandes sont définies par le décret n° 93-742 du 29 mars 1993 (décret procédure) qui garantit l'information du public au moyen de l'enquête publique, en cas d'autorisation, et le droit d'expression du pétitionnaire.

Les seuils de déclenchement du régime de l'autorisation ou de la déclaration sont définis par le décret n° 93-743 du 29 mars 1993 modifié (décret nomenclature) notamment par le décret n° 2002-202 qui a créé une rubrique 2.5.4 relative aux digues et remblais dans le lit majeur des cours d'eau.

Les ouvrages des aménagements de ralentissement des crues peuvent entrer dans le champ d'application de cette nomenclature, notamment au titre des rubriques suivantes :

2.5.4 relative aux digues et remblais dans le lit majeur des cours d'eau.

2.4.0 : ouvrages entraînant une différence de niveau de 35 cm entre amont et aval

2.5.0 : ouvrages conduisant à modifier le profil ou à la dérivation ou au détournement d'un cours d'eau

6.1.0 : Travaux des collectivités locales réalisés en application du L.211-7 du code de l'environnement, supérieurs à 12 MF (1,829 K€)

2.1.0 : Ouvrages permettant le prélèvement total supérieur ou égal à 5%

2.5.3 : Ouvrages dans le lit mineur constituant un obstacle à l'écoulement des crues.

4.3 DISPOSITIONS SPÉCIFIQUES À L'INTERVENTION DES COLLECTIVITÉS LOCALES : LA D.I.G

L'article L.211-7 du code de l'environnement donne aux collectivités territoriales la possibilité d'entreprendre, dans des domaines qui ne relèvent pas normalement de leur compétence, des travaux déclarés d'intérêt général.

Dans ce contexte, l'intervention de ces collectivités est donc subordonnée à une déclaration d'intérêt général (D.I.G) précédée d'une enquête publique. Cette procédure les habilite à effectuer des travaux dont la réalisation incombe normalement à des personnes privées. En outre, elle autorise à demander le cas échéant une participation financière aux personnes qui ont rendu les travaux nécessaires ou qui y trouvent un intérêt. La déclaration d'intérêt général est prononcée par arrêté préfectoral.

Les ouvrages de ralentissement dynamique sont des travaux de défense contre les inondations qui ne relèvent pas de la compétence directe des collectivités territoriales, mais de celle des riverains. Pour en assurer la maîtrise d'ouvrage, les collectivités territoriales doivent donc solliciter une DIG.

4.4 ARTICULATION ENTRE LES DIVERSES PROCÉDURES AUXQUELLES LE PROJET PEUT ÊTRE SOUMIS

Une collectivité territoriale qui veut réaliser un ouvrage de ralentissement des crues doit solliciter :

-une D.I.G en application de l'article L.211-7 du code de l'environnement ;

-une autorisation ou déclaration au titre des articles L.214-1 à 6 du code de l'environnement ;

-le cas échéant, une déclaration d'utilité publique (DUP) en application de l'article L.11-2 du code de l'expropriation.

La DIG, la DUP et l'autorisation au titre de la police de l'eau nécessitant toutes les trois une enquête publique, les dispositions de l'article L.211-7 III du code de l'environnement prévoient une seule enquête publique au titre de ces trois procédures, selon les modalités définies par le décret n°93-1182 du 21 octobre 1993.

La composition du dossier soumis à enquête publique est précisée aux articles 10, 12 et 13 du décret du 21 octobre 1993 précité. Elle diffère selon que l'opération est soumise ou non à autorisation ou à déclaration au titre de la loi sur l'eau.

Dans tous les cas, outre les pièces particulières nécessaires aux procédures éventuelles d'autorisation ou de D.U.P, le dossier doit être composé d'un mémoire justifiant l'intérêt général de l'opération, d'une estimation des dépenses d'investissement et des dépenses relatives aux modalités d'entretien et d'exploitation et d'un calendrier prévisionnel.

Enfin, lorsque la collectivité publique demande une participation aux dépenses des personnes qui ont rendu les travaux nécessaires ou y trouvent un intérêt, le dossier soumis à enquête publique est complété par l'ensemble des documents définis à l'article 10-2 du décret n° 93-1182 précité (liste des personnes appelées à participer aux dépenses, proportion des dépenses dont le pétitionnaire demande la prise en charge, critère retenu pour fixer les bases de répartition, modalités de calcul des participations, plan de situation,...).

La figure 16 précise le type d'enquête applicable à la procédure d'autorisation « police de l'eau ».

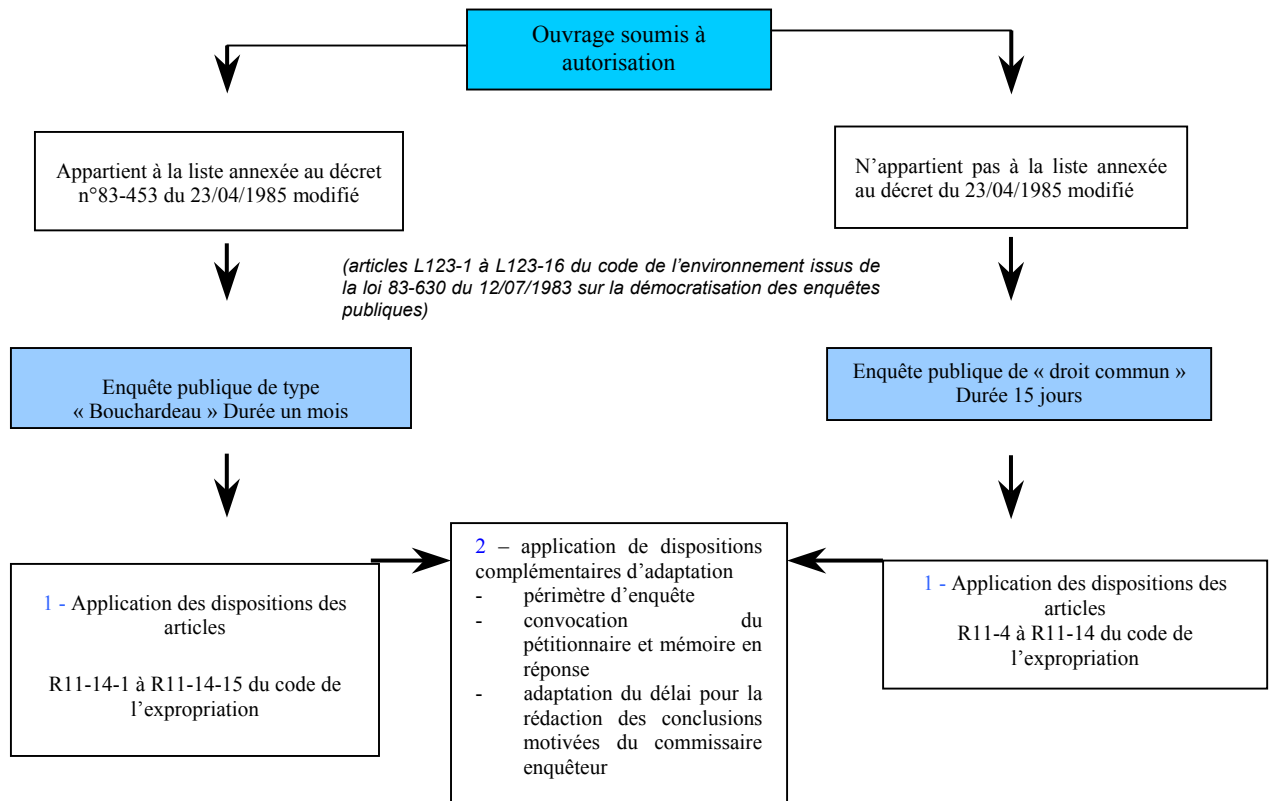


figure 16. Enquête publique de la procédure d'autorisation de police de l'eau et des milieux aquatiques

4.5 ARTICULATION ENTRE LES DIFFÉRENTS DOCUMENTS ÉVALUANT LES EFFETS DES OUVRAGES SUR L'ENVIRONNEMENT ET L'EAU

4.5.1 L'étude d'impact

L'article L.122-1 du code de l'environnement impose que soit réalisée une étude de l'impact sur l'environnement, des aménagements ou ouvrages qui, par leurs dimensions ou leurs incidences sur le milieu naturel, peuvent porter atteinte à ce dernier.

Le décret n°77-1141 du 12 octobre 1977 précise dans ces articles 3 et 4 et dans ses annexes les cas de dispense d'étude d'impact, sous réserve, éventuellement, de l'élaboration d'une notice d'impact.

En son article 3, il précise également que tout aménagement ou ouvrage de plus d'1,9 M€ est systématiquement soumis à une étude d'impact.

Les aménagements de ralentissement dynamique seront donc soumis à étude d'impact au moins dès lors qu'ils franchiront ce seuil financier d'1,9 M€. D'autres cas de soumission à étude d'impact pourront exister, en fonction du type d'aménagements.

L'article 2 précise le contenu de l'étude d'impact. Il doit être fonction de l'importance des travaux et aménagements, et de leurs incidences prévisibles sur l'environnement. L'étude doit présenter une analyse de l'état initial du site et **une analyse des effets directs et indirects du projet, en particulier** sur la faune et la flore, les sites et paysages, le sol, **l'eau**, l'air, le climat, les milieux (...) naturels et les équilibres biologiques, sur la protection des biens et du patrimoine culturel, **et le cas échéant**, sur la commodité du voisinage ou sur l'hygiène, **la sécurité et la salubrité publique**.

L'article 5 prévoit l'intégration de l'étude ou de la notice d'impact dans le dossier d'enquête publique, si le dossier est soumis par ailleurs à enquête publique.

L'article 8 du décret précise que si un projet soumis à étude ou notice d'impact est également soumis à une autorisation au titre d'une réglementation particulière, le dossier de demande d'autorisation du pétitionnaire doit comporter cette étude d'impact.

4.5.2 Le document d'incidences

L'article 2 du décret n°93-742 du 29 mars 1993 (décret « nomenclature ») précité, prévoit que la demande d'autorisation au titre de la police de l'eau doit comprendre un document indiquant les incidences sur tous les aspects de l'eau.

Le caractère suffisant des éléments apportés dans le document d'incidences est à apprécier au cas par cas. Dans le cas des ouvrages de ralentissement dynamique, la nature et la consistance de l'ouvrage devront préciser suffisamment les matériaux et techniques prévus, les hauteurs de digues, les volumes d'eau concernés, etc. afin de permettre un jugement correct, par le service de police de l'eau, de la réalité des incidences étudiées et des mesures de corrections prévues.

Les ouvrages de ralentissement dynamique intéressant par nature la sécurité publique, le document d'incidences doit être particulièrement précis sur le volet sécurité civile. Il doit permettre d'évaluer les conséquences d'une rupture ou surverse de digues selon des scénarios pertinents et donc comporter une étude de risques suffisante. Il doit préciser toutes les mesures envisagées pour réduire au maximum le risque de rupture (conception, surveillance, entretien, etc.) et les mesures prévues en cas de rupture (alerte, interventions, etc.).

Ce document d'incidences doit s'attacher à définir :

a) l'origine des incidences chroniques, épisodiques ou accidentelles, notamment :

☞ nature des ouvrages et installations, y compris des travaux de construction des ouvrages ; en particulier pour les aménagements de ralentissement dynamique, nature des matériaux de construction, hauteurs prévues des digues, niveau de revanche, etc.,

☞ procédés mis en oeuvre, modalités d'exercice de l'activité, conditions de fonctionnement,

☞ maintenance, vidange, arrêt volontaire ou non,

☞ nature, origine, volume des eaux concernées : eaux , polluées ou non, susceptibles d'entrer dans les ouvrages, installations, aménagements et d'en sortir ; eaux susceptibles d'être influencées.

b) l' impact, concernant notamment :

☞ le milieu aquatique : hydrobiologie, écosystèmes, zones humides,

☞ la ressource en eau : quantité et valeur économique,

☞ le niveau des rivières, plans d'eau, nappes,

☞ la qualité des eaux superficielles, souterraines, de ruissellement.

☞ **les exigences de la sécurité publique** (article L.211-1 du code de l'environnement) **et du libre écoulement des eaux et de la protection contre les inondations. Cela se traduira pratiquement par une étude des risques en cas de rupture.** (Décret no 93-742 du 29 mars 1993 relatif aux procédures d'autorisation et de déclaration prévues par l'article 10 de la loi no 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau ; circulaire du 14-08-1970 modifiée du 29-09-1988 ; circulaire du 06-08-2003)

c) l' influence des variations :

☞ naturelles : sécheresse, crues, orages, gel, ...,

☞ d'origine humaine : population, irrigation, industrie réalimentation de rivières ou de nappes,

☞ propres à l'activité du pétitionnaire.

d) les mesures pour limiter les incidences, notamment :

☞ conception, maintenance et surveillance des ouvrages ou installations,

☞ technologies, procédés, exploitations propres,

☞ modulation dans le temps,

☞ connaissance et maîtrise des eaux utilisées, collectées, stockées, rejetées,

☞ mesures compensatoires.

e) la compatibilité avec :

☞ SDAGE - S.A.G.E.,

☞ objectifs de qualité (décret 91-1238 du 19.12.91), y compris en l'absence de rejet et objectif de qualité écologique issu de la directive 2000/60/CE établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.

f) l'évaluation des incidences sur le site Natura 2000 lorsque nécessaire

4.5.3 Relation entre étude d'impact et document d'incidences

L'article 2 du décret 93-742, précise également que si les informations demandées dans le document d'incidences sont données dans une étude ou notice d'impact, celle-ci remplace ce document.

La figure 17 résume cette liaison.

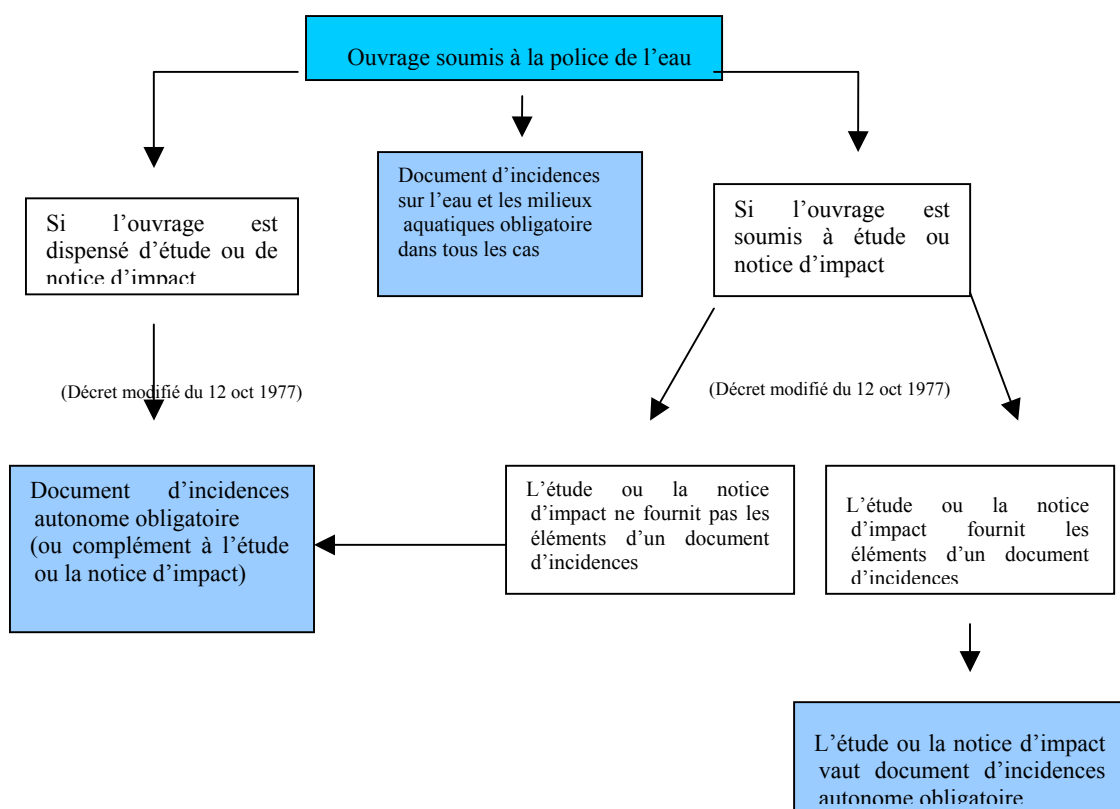


figure 17. Document d'incidences nécessaire à la constitution d'un dossier de demande d'autorisation

4.6 SCHEMA TYPE D'UNE PROCEDURE D'AUTORISATION

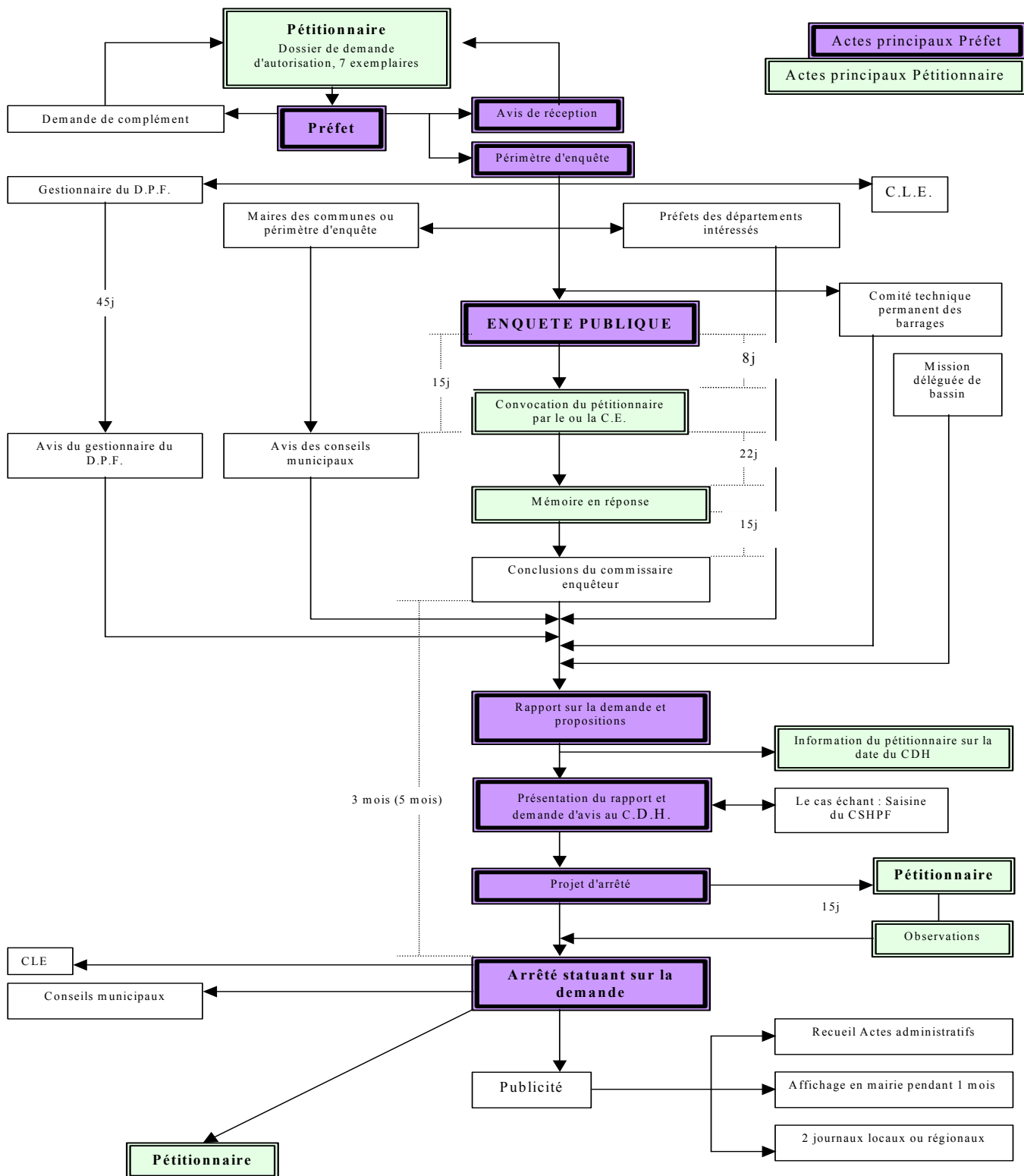


figure 18. Schéma type d'une procédure d'autorisation

4.7 QUE DOIT CONTENIR L'ARRÊTÉ D'AUTORISATION ?

a) objet de l'autorisation

- ☞ chaque opération du pétitionnaire soumise à autorisation,
- ☞ ensemble de ses opérations individuellement inférieures au seuil d'autorisation qui, cumulées, dépassent ce seuil,
- ☞ ses installations ou équipements connexes soumis ou non à déclaration sous réserve de leur participation aux incidences sur le milieu et la ressource.

b) encadrement des prescriptions

- ☞ éléments de l'article L 211-1 du code de l'environnement,
- ☞ SDAGE et SAGE,
- ☞ objectifs de qualité,
- ☞ efficacité et économie des meilleures techniques disponibles,
- ☞ règles techniques nationales avec possibilité de modalités d'application particulières.

c) catégories de prescriptions

- ☞ obligations de moyens,
- ☞ obligations de résultat au regard, par exemple et notamment pour les ouvrages de ralentissement dynamique, des exigences de la sécurité civile, etc.

d) l'autorisation fixe :

- ☞ les conditions de réalisation, d'aménagement, d'exploitation des ouvrages ou des installations,
- ☞ les conditions d'exécution des travaux,
- ☞ les conditions d'exercice de l'activité,
- ☞ les moyens d'autosurveillance, y compris sur le milieu,
- ☞ les modalités des contrôles techniques (programmés ou inopinés effectués au frais du bénéficiaire de l'autorisation par l'administration ou par un organisme indépendant),
- ☞ les moyens d'intervention en cas d'incident,
- ☞ la durée de l'autorisation.

Pour les ouvrages de ralentissement dynamique, doivent être précisées dans l'arrêté, les caractéristiques des prises d'eau, des dérivations, des dispositifs de restitution, les déversoirs de crue, les dispositions prises pour que les ouvrages résistent à des crues au-delà de la crue de projet sans aggraver la situation, tout comme les consignes de gestion en régime normal, en cas de crue, les dispositions d'entretien, de surveillance, etc. Les mesures correctives ou compensatoires auxquelles est conditionnée la délivrance de l'autorisation, doivent être indiquées avec suffisamment de précision pour en permettre le contrôle.

e) contenu évolutif par arrêté complémentaire

☞ pour la protection des intérêts protégés par le code de l'environnement,

☞ pour la suppression des dispositions obsolètes,

☞ pour la mise à jour des éléments du dossier,

☞ pour prescrire les mesures d'auto surveillance et les contrôles techniques qui n'auraient pas été prescrites au départ.

L'arrêté initial peut être complété d'un ou de plusieurs arrêtés. Selon l'importance des modifications apportées (voir avec la MISE, Mission interservices de l'eau), le pétitionnaire devra engager soit une nouvelle procédure complète soit une procédure allégée sans enquête publique.

Le maître d'ouvrage ou son représentant doit tenir informée la MISE de tout incident pouvant occasionner un impact sur le milieu naturel.

f) dispositions spécifiques

☞ des prescriptions au titre de la protection du réseau Natura 2000,

☞ des prescriptions au titre de l'archéologie préventive.

Il est à noter que l'autorisation revêt un caractère précaire et qu'elle peut être suspendue voire retirée, notamment, selon les dispositions de l'article L.214-4 du code de l'environnement, en cas de menace pour la sécurité publique ou de manque d'entretien régulier.

4.8 AUTRES RÉGLEMENTATIONS ET DOCUMENTS À PRENDRE EN COMPTE

- *La police de la pêche*

Les travaux soumis à déclaration par la nomenclature relèvent du régime de l'autorisation dès qu'ils concernent des zones mentionnées à l'article L. 432-3 du code de l'environnement (frayères, zones de croissance, d'alimentation, de réserves de nourriture de la faune piscicole). Les zones visées n'ont pas encore fait l'objet de désignation explicite mais les MISE et les agents du Conseil Supérieur de la Pêche ont une bonne connaissance de ces

zones. Les schémas départementaux de vocation piscicole (SDVP) en donnent une certaine cartographie.

Un débit réservé doit être maintenu en aval des ouvrages (en cas de dérivation par exemple) en vertu de l'article L 432-5.

Des dispositifs de franchissement sont à prévoir systématiquement lorsqu'un ouvrage occasionne un obstacle à la montaison ou dévalaison de la faune piscicole, particulièrement sur les cours d'eau classés au titre de l'article L 432-6 du code de l'environnement.

Lorsqu'il y a des bassins toujours en eau, une autorisation de vidange des plans d'eau peut être nécessaire en application de l'article L. 432-9 du code de l'environnement. Autant que possible, il est souhaitable d'intégrer l'autorisation de vidange dès l'acte autorisant la création du plan d'eau, l'autorisation de vidange valant pour une durée maximale de trente ans, éventuellement renouvelable, sauf pour les barrages de retenue dont la hauteur est supérieure à 10 m ou dont le volume de la retenue est supérieur à 5 000 000 m³.

L'autorisation délivrée au titre de la loi sur l'eau vaut autorisation au titre de la police de la pêche.

- *Les articles L. 215-7 et L. 215-9 du Code de l'environnement sur le libre cours des eaux*

Ils offrent à l'autorité administrative la possibilité d'intervenir pour réglementer ou prescrire, dès lors que le libre cours des eaux n'est plus assuré ou que les droits des tiers sont menacés. Pour les cours d'eau domaniaux, l'article 27 du Code du Domaine Public Fluvial offre des possibilités analogues.

- *La réglementation de l'urbanisme*

En application du code de l'urbanisme, notamment de ses articles L 421.1 (champ d'application des permis de construire) ou R 442.1 (champ d'application des autorisations pour installations et travaux divers) et selon les modalités du plan local d'urbanisme (PLU ex POS) s'il existe, certains des ouvrages prévus au titre du ralentissement dynamique, tels que barrages, remblais (de plus de 100 m² et 2 m de haut)... sont susceptibles d'être soumis à autorisation au titre des règles d'urbanisme. Il convient de se rapprocher du service (mairie, DDE) compétent localement pour l'instruction de telles autorisations.

- *L'autorisation d'Occupation Temporaire du DPF*
- *Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux –SDAGE*
- *Le Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux –SAGE- s'il est approuvé*
- *Le Plan de Prévention des Risques –PPR- naturels s'il existe*

- *La réglementation des Installations Classées*
- *La réglementation des Carrières*
- *La prise en compte des enjeux et contraintes environnementales*

Périmètres rapprochés des captages, arrêtés de biotope, ZPS, ZICO, ZNIEFF, réserves naturelles ou de pêche ou de chasse, parcs naturels, proposition de sites d'intérêt communautaire (*sites Natura 2000 relevant des articles 6.3 et 6.4 de la directive habitat*), sites remarquables au titre de l'article 146-6 du code de l'urbanisme issu de la loi littorale du 3 janvier 1986, etc.

- *La réglementation relative aux sites classés (loi de 1930)*
- *Les articles 640 et 641 du code civil sur la régulation des débits*

5 GLOSSAIRE

Ce glossaire rassemble quelques termes techniques utilisés dans le guide. Il est réalisé en partant des définitions les plus générales possibles et en précisant, dès que cela est nécessaire, la définition restreinte telle qu'elle est sous-entendue dans le guide. On se réfère le plus possible aux définitions en usage dans le domaine de la gestion des ressources en eau et des risques associés, et éventuellement déjà utilisées dans d'autres documents techniques à l'initiative notamment du Ministère chargé de l'environnement.

aléa : événement imprévisible, tour imprévisible que peuvent prendre les événements. [📖 Robert]

Nous l'utilisons, dans ce guide, dans un sens particulier : part aléatoire du risque d'inondation due au fonctionnement physique du bassin versant et du réseau hydrographique, quantifiable statistiquement. Il représente le degré d'exposition d'une zone aux inondations et peut être décrit, généralement en termes probabilistes, par diverses grandeurs physiques (fréquence, hauteur et durée de submersion, vitesse d'écoulement, rapidité de montée des eaux, période préférentielle d'occurrence dans l'année).

alerte : information à caractère urgent sur un phénomène hydrologique, considéré comme dangereux, auquel on s'attend dans un délai plus ou moins court. [📖 Roche]

aversion au risque : entre deux situations données, produisant des gains identiques en espérance mathématique, mais dans des conditions de risque différentes, l'agent est averse au risque s'il préfère la situation la moins risquée. L'espérance mathématique du gain se définissant comme le produit du gain escompté par la probabilité de l'obtenir.

bassin versant : le terme « bassin » ou « bassin versant » marque à la fois la notion topographique de zone limitée par une ligne de partage des eaux et celle de surface d'interception des précipitations. [📖 Roche]

calage : vient du sens général de « monter une pièce avec précision ».

Dans l'action de modélisation, se dit de la phase de recherche des paramètres du modèle qui permettent d'obtenir les résultats les meilleurs (au vu de l'utilisation attendue du modèle). Il n'existe en général pas de calage absolu ou parfait et les procédures de calage sont le plus souvent des procédures d'approximation successives.

En hydraulique, le coefficient de Manning-Strickler, traduisant la rugosité des parois, est couramment utilisé comme un coefficient de calage.

coefficient de Strickler (ou de Manning-Strickler) : coefficient qui traduit la rugosité des parois délimitant un écoulement et, par conséquent, les frottements existants entre le liquide et ces parois, et les pertes de charge associées. Il est traditionnellement noté par la lettre K . Les anglo-saxons emploient plus volontiers le coefficient de Manning, noté n , défini comme l'inverse du précédent : $n=1/K$.

Dans la plupart des modèles hydrauliques existants, la loi de perte de charge utilisée est la loi de Manning-Strickler, d'où l'utilisation de ce coefficient comme principal paramètre de calage d'un modèle.

On rappelle qu'un coefficient K fort (>35) correspond à une rugosité faible (parois lisses) et qu'inversement, un coefficient de rugosité faible ($K<20$) correspond à des rugosités fortes ou à des pertes de charge importantes liées à des perturbations topographiques ou des phénomènes turbulents particuliers.

☞ les définitions complétées par [📖 Robert] sont issues du Petit Robert, dictionnaire de la langue française.

☞ les définitions complétées par [📖 Roche] sont issues du dictionnaire français d'hydrologie de surface de M. M.-F. ROCHE, ed. Masson, 1986.

- crue : période de hautes eaux, de durée plus ou moins longue, consécutive à des averses plus ou moins importantes.
- Réponse d'un bassin à une averse ou un épisode pluvieux. [Roche]
- la terminologie utilisée ici, volontairement schématique, est la suivante :
- Crue fréquente : une crue de période de retour inférieure à 2 ans
 Crue moyenne : une crue de période de retour de 2 à 10 ans
 Crue rare : une crue de période de retour de 10 à 100 ans
 Crue exceptionnelle : au delà.
- crues de projet : crues retenues pour les calculs de dimensionnement et de fonctionnement d'un ouvrage hydraulique. La notion de crue de projet est essentiellement subjective en ce sens qu'elle tient, ou peut tenir, compte des conditions économiques du projet et des risques encourus, de la nature de ces risques, (vies humaines, industries, pertes agricoles). Par ailleurs, suivant la nature de l'aménagement (réservoir, fil de l'eau, ...), le paramètre à prendre en considération peut être le débit instantané maximal ou le volume assorti éventuellement de la forme de la crue (hydrogramme de la crue de projet). [Roche]
- crue de référence : terme utilisé parfois en lieu et place de crue de projet. En particulier, cela est le cas quand on choisit pour crue de projet une crue historique observée (par exemple la crue de 1911 à Paris) qui devient alors un niveau de référence. La crue historique est parfois remplacée par une crue de période de retour donnée (crue décennale ou centennale).
- culture du risque : ensemble de concepts et de connaissances de base qui devraient être partagés par tous les citoyens afin de les rendre réceptifs aux choix d'aménagements préventifs ainsi qu'aux messages de prévisions et d'alerte. C'est le résultat d'une action concrète et volontariste de vulgarisation auprès du grand public afin que chaque individu puisse se forger sa propre opinion sur les problèmes de risques (naturels en particulier), seul moyen de rendre efficace une politique de prévention.
- débit de pointe : ou débit instantané maximum , c'est le débit maximum atteint lors d'une crue donnée.
- débit instantané maximum annuel décennal : c'est le quantile de crue, associé au débit instantané maximum annuel et relatif à la probabilité au dépassement de 0.1 (ou période de retour de 10 ans).
- Dans les modèles synthétiques Débit-durée-Fréquence, ce paramètre est utilisé comme représentatif de la fonction de production de l'écoulement du bassin versant étudié.
- durée caractéristique d'une crue : c'est la durée continue de dépassement de la moitié du débit de pointe d'un événement de crue particulier.
- durée caractéristique d'un bassin versant : elle est définie comme la médiane conditionnelle des durées caractéristiques de crue, obtenue pour une crue dont le débit de pointe serait le débit instantané maximum annuel décennal QIXA10.
- écoulement critique : écoulement qui correspond au minimum de la fonction $H(h)$, charge spécifique en fonction de la profondeur ... [Roche]
- écoulement fluvial ou torrentiel : voir écoulement subcritique ou supercritique.
- écoulement subcritique : écoulement qui se produit avec une profondeur supérieure à la profondeur critique. Ces écoulements sont aussi appelés fluviaux. Ils correspondent généralement à des biefs peu pentus et à des écoulements calmes, pour lesquels le niveau aval influe sur les écoulements en amont.
- écoulement supercritique : écoulement qui se produit avec une profondeur inférieure à la profondeur critique. Ces écoulements sont aussi appelés torrentiels. Il correspondent généralement à des biefs à fortes pentes et à des écoulements fortement énergétiques (induisant souvent des transports solides conséquents).
- écrêtement : action d'écrêter, c'est à dire de niveler au-delà d'un certain seuil ou d'égaliser en supprimant les éléments extrêmes. [Robert]
- On parle d'écrêtement des crues comme résultat du phénomène hydraulique du laminage, qui se traduit par une diminution du débit de pointe d'un hydrogramme au prix d'une extension de la durée de crue, suite au stockage temporaire d'un volume d'eau dans une zone ad hoc (bassin, retenue, plaine d'inondation, etc.).

- étiage : niveau annuel le plus bas atteint par un cours d'eau en un point donné. Aussi utilisé dans le sens de basses eaux. [Roche]
- fonction de production : passage de la pluie totale à la pluie nette génératrice des crues.
- fonction de transfert : opérateur hydrologique permettant le passage de la pluie nette au débit à un exutoire.
- gestion durable des crues : elle doit prendre en compte :
 - les risques de toute nature (humains et matériels mais aussi écologiques),
 - les effets à long terme, positifs et négatifs, des dispositifs de prévention et de protection,
 - les coûts et incidences externes (coûts d'entretien, contrôle de la vulnérabilité,...).
- Gradex : **Gradient des valeurs Extrêmes.** Paramètre statistique homogène au paramètre d'échelle de la loi de Gumbel de la variable étudiée. Le Gradex des pluies en millimètres est le paramètre utilisé pour extrapoler la distribution des débits aux fréquences rares et extrêmes (méthode du Gradex ; modèle AGREGEE). Le Gradex des pluies est aussi utilisée pour choisir la famille ou modèle QdF correspondant au bassin versant étudié.
- hydraulique : science de l'écoulement de l'eau ... dans des conduites ou des chenaux naturels ou artificiels ou à travers des ouvrages quelconques. C'est une science physique, branche de la mécanique des fluides. [Roche]
- hydraulique à surface libre : se dit de l'hydraulique appliquée aux écoulements à surface libre, c'est à dire dont la surface est en équilibre avec la pression atmosphérique, à une cote ou altitude qui peut donc varier pour satisfaire cette condition. Ceci sert à la différencier de l'hydraulique en charge, c'est à dire où la section de l'écoulement est imposée par la géométrie de la conduite, et où la pression peut varier.
- hydrogramme : graphique de variation des débits en fonction du temps. Souvent spécialisé : hydrogramme de crue. [Roche]
 Le même terme est utilisé pour décrire l'évolution du débit en fonction du temps sous une forme quelconque (fonction $Q(t)$, hydrogramme discrétisé en couples (Q_i, t_i) , etc.)
- hydrogramme synthétique monofréquence : produit dérivé des courbes Débit-durée-Fréquence, cet hydrogramme a la particularité d'être relatif à une même fréquence quelle que soit la durée retenue pour le caractériser (1heure, 6heure, 1jour,...). Contrairement à un hydrogramme réel, qui a le plus souvent une période de retour du débit de pointe différente de celle du volume de crue, l'hydrogramme synthétique peut être caractérisé par une seule fréquence au dépassement. Ceci facilite l'interprétation fréquentielle des limites du champ d'inondation obtenu par simulation hydraulique de la propagation d'un tel hydrogramme.
- hydrologie : toute action, étude ou recherche qui se rapporte à l'eau, au cycle de l'eau et à leurs applications. A l'origine, le terme français se limitait aux aspects chimiques et bactériologiques et à leurs caractéristiques médicales ... [Roche]
 Nous l'utilisons dans ce guide pour traduire la quantification des apports dus au bassin versant pour se différencier de l'hydraulique qui s'intéresse aux transferts.
- hydrométrie : Méthodologie et technologie de la mesure des hauteurs et des débits dans les cours d'eau. [Roche]
- Inondabilité : néologisme forgé à partir du mot « inondable » pour décrire l'aptitude à l'inondation de certains sites ou de certaines parcelles. L'Inondabilité d'une parcelle ne contient aucune connotation positive ou négative et traduit une grandeur a priori mesurable et quantifiable.
 Le terme est utilisé pour nommer la méthode du même nom qui repose sur la définition d'un risque maximal acceptable en fonction de l'occupation du sol ou d'un objectif de protection minimal. Elle consiste à dimensionner les aménagements en fonction de ces objectifs ... quitte à accepter des dégâts dus aux inondations de temps en temps pour d'autres raisons relatives à l'intérêt général.
- laminage : amortissement d'une crue avec diminution du débit de pointe et étalement de son volume dans le temps par effet de stockage et de déstockage dans un réservoir compte tenu de la loi hauteur – débit de l'évacuateur et de la courbe de remplissage du réservoir. [Roche]
 Nous généralisons l'utilisation du terme pour des réservoirs quelconques, en particulier les lits majeurs des cours d'eau qui jouent ce rôle au moment des crues débordantes.

- ligne d'eau :** profil en long de la surface d'un écoulement , suivant une ligne qui joint en principe les points de cette surface situés au milieu de la largeur du lit apparent. En pratique on la relève où l'on peut et souvent sur les berges. [Roche]
- lit majeur :** partie du lit situé en dehors des berges franches (des bourrelets de berge s'ils existent). Un lit majeur peut être très large (plusieurs dizaines de kilomètres) et comporter lui-même tout un réseau de chenaux secondaires. Les écoulements peuvent y être très complexes et les effets de stockage très importants [Roche]
- Il est possible de généraliser le concept de lit majeur à toute zone utilisée par l'eau en période de crue, en particulier les réseaux d'assainissement pluvial enterrés ou les fossés d'assainissement agricole.
- lit mineur :** sens étendu : lit apparent ; sens restrictif : chenal de basses eaux. [Roche]
- Nous le généralisons à toute zone suffisamment et fréquemment en eau pour qu'elle ne soit pas convoitée par une utilisation différente (fossé, ...).
- modèle :** représentation concrète ou abstraite d'une réalité physique, économique, sociale ou autre, élaborée dans le but de simuler son fonctionnement, ou tout au moins son comportement, afin d'en tirer toute conséquence concernant l'estimation de ses paramètres, son évolution, les prévisions de son exploitation, etc... En ce sens, par exemple, une loi de distribution statistique est un modèle. [Roche]
- modèle hydraulique :** cette appellation est utilisée dans deux sens un peu différents.
- D'une part, il s'agit d'un modèle numérique qui permet de résoudre les équations de l'hydraulique à surface libre et il existe différentes familles de modèles de complexité variable (section paramétrée ou géométrie réelle, modèle permanent ou transitoire, réseau ramifié ou maillé, modèle monodimensionnel ou bidimensionnel, etc.)
- D'autre part, il s'agit du modèle d'une rivière particulière, c'est à dire de l'ensemble des données spécifiques (topographie, géométrie et hydraulique des ouvrages, hydrologie, observations de calage, etc.) rassemblées pour faire tourner un modèle numérique (au sens précédent) dans une situation particulière et pour un objectif donné (étude des crues ou des étiages, dimensionnement d'un ouvrage).
- modèles pluie-débit :** modèles hydrologiques qui s'attachent à établir des relations entre le signal pluviométrique que reçoit un bassin versant et le signal débitométrique qui en sort. Il existe plusieurs familles de modèles pluie-débit (conceptuel, distribués, statistique ...) utilisés pour différents objectifs. Beaucoup d'entre eux sont utilisés dans un contexte de prévision ou de simulation de chroniques, c'est à dire dans l'échelle de temps t. Certains, comme le modèle du Gradex et ses dérivés, reposent sur une analyse statistique des phénomènes dans l'échelle des périodes de retour T.
- modèles synthétiques Débit-durée-Fréquence :** modèles hydrologiques synthétiques qui décrivent le régime d'un bassin versant par une représentation en Débit-durée-Fréquence des quantiles de crue prédéterminés. Le vocable « synthétique » rappelle que ce sont des modèles qui cherchent à résumer (synthétiser) une information hydrologique complexe. Ils ne décrivent pas explicitement les processus à l'origine des débits mais n'en demeurent pas moins réalistes et opérationnels.
- monodimensionnel :** limité à une seule dimension. Se dit en particulier des modèles hydrauliques 1D (encore appelés filaires) qui privilégient la direction principale de l'écoulement et traitent les équations de l'hydraulique après intégration sur le profil en travers ce qui permet d'utiliser des variables moyennées par section en travers : cote ou niveau d'eau, vitesse du courant, débit, etc.
- période de retour :** c'est la durée moyenne qui sépare deux occurrences successives d'un événement donné (théorie du renouvellement). On devrait en toute rigueur parler de période moyenne de retour pour rappeler qu'en réalité deux événements de même intensité peuvent ne pas être séparés par cette durée.
- Dans le cas d'un événement défini par rapport au maximum annuel, on peut relier la période de retour T à la fréquence au dépassement F par la relation : $T=1/F$.
- Par exemple, on peut dire que sur une période de 100 ans consécutifs, toutes choses étant égales par ailleurs (pas de dérive climatique notable, pas d'évolution de l'occupation des sols, pas de travaux hydrauliques conséquents), la crue décennale sera dépassée une

dizaine de fois. Les hypothèses fortes en matière de non évolution du contexte n'enlèvent rien à la pertinence du concept, puisque à un instant donné on peut toujours définir l'événement de probabilité 1/100 soit la crue centennale, ou celui de probabilité 1/1 000 soit la crue millénale, etc.

pluviométrie : tout ce qui concerne la mesure de la pluie. Résultats de cette mesure ; hauteur d'eau tombée dans un intervalle de temps précisé par un qualificatif : pluviométrie horaire, journalière, mensuelle ... [📖 Roche]

prédétermination : détermination d'un fait ... par des causes antérieures au moment qui le précèdent immédiatement. [📖 Robert].

Dans le contexte de la réflexion autour du risque d'inondation, nous opposons ce vocable à celui de prévision pour tenir compte que la prédétermination se fait dans un référentiel de temps synthétique, la période de retour T , alors que la prévision se fait dans un référentiel de temps réel t . La prédétermination est nécessaire pour dimensionner correctement des ouvrages et planifier l'occupation des sols, la prévision est nécessaire pour gérer les crises et assumer le risque collectivement accepté.

prévention : ensemble de mesures préventives contre certains risques, c'est à dire qui tend à empêcher une chose fâcheuse de se produire. [📖 Robert].

La prévention des risques d'inondation repose sur plusieurs éléments : la prédétermination des crues et l'aménagement raisonné du territoire ; la prévision des crues et la gestion des crises ; et aussi la culture individuelle du risque c'est à dire tous les messages de sensibilisation et de « prévention ».

prévision : action de prévoir, connaissance de l'avenir. [📖 Robert].

Action permettant, grâce à des observations effectuées à un instant t donné, de donner une estimation de ce qui peut arriver à un instant futur $t+\delta t$. Dans ce contexte, on s'intéresse surtout aux dispositions permettant de faire de l'annonce de crue, c'est à dire d'anticiper sur le déroulement d'une crue à venir (alerte, évacuation) et éventuellement sur la gestion d'ouvrages de laminage.

profil en long : levé topographique particulier qui se fait dans l'axe d'une ligne particulière, comme le lit mineur d'un cours d'eau. On peut ainsi lever le profil en long d'un cours d'eau qui correspond à la ligne rejoignant les points les plus bas du cours d'eau, ou le profil en long de la surface libre, qui correspond à la ligne rejoignant la cote atteinte en chaque section par la surface de l'eau, etc ...

profil en travers : levé topographique qui se fait perpendiculairement à un axe défini par ailleurs, souvent l'axe du lit mineur d'un cours d'eau (pour ce qui nous concerne).

propagule : unité de propagation d'une plante. Il peut s'agir d'une spore (mousses et "ptéridophytes"), d'une graine (gymnospermes, angiospermes), d'un fruit (angiospermes), d'un cône ou d'une inflorescence (genévrier, bardane, ananas), d'une partie végétative (bulbille, fragment de rhizome) ou de la plante entière ("tumbleweeds" américains).

quantile : se dit de la valeur prise par une variable aléatoire pour une probabilité donnée. Par exemple, soit QIX la variable aléatoire représentant le débit instantané maximum des crues d'un bassin versant donné. Le quantile décennal de la variable QIX est la valeur relative à une fréquence au dépassement de 1/10 (ou une période de retour de 10 ans).

recalibrage : opération qui consiste à modifier la section hydraulique d'un cours d'eau (c'est à dire son lit mineur) pour augmenter sa débitance et diminuer la probabilité des débordements.

régime : mode de variation et/ou caractéristiques, définies statistiquement, d'un (ou d'un ensemble de) phénomène(s) physique(s), tels que le débit d'une rivière, le vent, la température, la pluie, ...

condition particulière dans laquelle se produit un phénomène : régime d'écoulement [📖 Roche]

régime fluvial : régime d'écoulement en condition subcritique. Cf. écoulement.

régime hydrologique : ensemble des caractéristiques hydrologiques à une station ou sur un ensemble hydrographique. Le terme peut être spécialisé : régime des crues, régime des basses eaux ... [📖 Roche]

- régime permanent : régime d'écoulement particulier invariable dans le temps.
- régime torrentiel : régime d'écoulement en condition supercritique. Cf. écoulement.
- régime transitoire : régime d'écoulement particulier qui varie dans le temps.
- reprofilage : action de modifier le profil d'un cours d'eau, en général associée à un recalibrage, en particulier par suppression de seuils (profil en long) ou par élargissement (profil en travers).
- risque : danger éventuel plus ou moins prévisible, éventualité d'un événement ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet et tout autre dommage. [📖 Robert]. Dans le présent guide, le risque (d'inondation), issu du croisement de l'aléa et de la vulnérabilité, donne une vision des conséquences des inondations sur une zone quelconque du territoire.
- risque maximal acceptable : l'impossibilité reconnue de se protéger quel que soit le niveau de risque (ce qui dépasse les capacités économiques de la société) impose de définir cette notion de risque maximal acceptable comme étant un niveau raisonnable de protection tel que la fréquence d'occurrence du risque résiduel reste « acceptable » (socialement et collectivement parlant).
- Strickler : voir coefficient de Strickler.
- thalweg : fond de vallée ou de vallon non nécessairement occupé par un cours d'eau en activité. [📖 Roche]
- tronçon : partie, fragment de [📖 Robert]
- on parle de tronçon de rivière pour isoler une partie de celle-ci dotée de propriétés remarquables (extrémités dûment identifiées, homogénéité du profil en long ou en travers, ...)
- vulnérabilité : caractère de ce qui peut être blessé, frappé par un mal physique [📖 Robert]
- Ce concept traduit les enjeux liés à une activité humaine et s'applique dans notre cas pour qualifier les dommages que pourraient causer une inondation si elle survenait : plus les dommages potentiels sont grands, plus la vulnérabilité du lieu est forte. La probabilité de cette inondation n'entre nullement en ligne de compte pour qualifier la vulnérabilité qui dépend intrinsèquement de l'usage socio-économique d'une parcelle de terrain.

6 BIBLIOGRAPHIE

6.1 RÉFÉRENCES PRINCIPALES

- 1 [Arnaud, 1997] Arnaud P., Lavabre J., 1997. Simulation du fonctionnement hydrologique d'un bassin versant : application à la conception et à la gestion d'un barrage. Ingénieries – E A T, n°10, 43-54.
- 2 [ASCA, 2002] ASCA, 2002. Vers une évaluation de la vulnérabilité des activités agricoles aux inondations. Etude pour le compte du MEDD. 64 pages
- 3 [Bourrelier, 1997] Bourrelier, 1997. Rapport de l'instance d'évaluation de la politique publique de prévention des risques naturels. Minist. de l'Economie, des Finances et du Plan. Commissariat Général au Plan.
- 4 [CEA, 2000] CEA, 2000. *Guide to Dam Risk Management*. Canadian Electricity Association – Dam Safety Interest Group.
- 5 [Cemagref, 1999] Cemagref, 1999. *Construction de petits barrages en terre, CCTG, CCTP et cadre du bordereau des prix*. Cemagref, Aix-en-Provence, 80 p., disponible aussi sous forme de fichier Word.
- 6 [CERTU, 1998] CERTU, nov.1998. Techniques alternatives aux réseaux d'assainissement pluvial. ISSN 1263-3313.
- 7 [CERTU, 1999] CERTU, 1999. Valoriser les zones inondables dans l'aménagement urbain. Repères pour une nouvelle démarche. 232 p.
- 8 [CERTU, 2000] CERTU, 2000. Organiser les espaces publics pour maîtriser le ruissellement urbain. 124 p.
- 9 [CFGB, 1994] CFGB, 1994. *Les crues de projet des barrages : méthode du GRADEX ; Design Flood Determination by the Gradex Method* – 18° Congrès CIGB-ICOLD N°2, nov., Bulletin du Comité Français des Grands Barrages, FRCOLD News, 96p. (en français et anglais).
- 10 [CFGB, 1997] Degoutte G. coordinateur, 1997. *Petits barrages, recommandations pour la conception, la réalisation et le suivi*. Comité Français des Grands barrages, Cemagref éditions, Antony, 176 p., disponible aussi sous forme de CD-Rom interactif bilingue français anglais.
- 11 [CPER-MP, 2000] DIREN et ARPE Midi-Pyrénées ; 2000. Guide méthodologique : Aménagements pour la réduction des crues dans les petits bassins versants, 32p.
- 12 [CTGREF, 1982] CTGREF, SRAE, DIAME, S.H., 1980-1982. *Synthèse nationale sur les crues des petits bassins versants*. Fascicule 2 : la méthode SOCOSE ; Information Technique n° 38-2 (Juin 1980) ; Fascicule 3 : la méthode CRUPEDIX.
- 13 [Dauge, 1999] Dauge Y., 1999. *Cadre de débat et de concertation dans le domaine des inondations*. Rapport de mission pour le Premier Ministre, sur la prévention du risque d'inondation. Assemblée Nationale, oct., 55p.
- 14 [Degoutte, 2003] ENGREF Paris, 2003. coordination G. DEGOUTTE, P. ROYET. Sécurité des barrages en service, p127 à 137.

- 15 [Devaux-Ros, 1998] Devaux-Ros, 1998. Évaluation des enjeux et des dommages potentiels liés aux inondations de la Loire moyenne. Méthode et principaux résultats. Étude pour le compte de l'Équipe Pluridisciplinaire Plan Loire Grandeur Nature, 46p.
- 16 [Garçon, 2002] Garçon R., Bossard E., Lang M., Le Clerc S., 2002. *Revisiter la notion de scénario hydrologique de référence pour la caractérisation du risque d'inondation*. Rapport commun EDF/DTG - Cemagref pour le compte du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable. Programme Risque Inondation RIO 1. 76 p.
- 17 [Gilard, 1998b] Gilard O., 1998. *Guide pratique de la méthode Inondabilité*. Etude Inter-Agences n°60, 158p.
- 18 [HUBERT, 1999] HUBERT G. LEDOUX B., 1999. « Le coût du risque...l'évaluation des impacts socio-économiques des inondations ». Presse de l'École Nationale des Ponts et Chaussées. 232 p
- 19 [ICOLD, 2001] ICOLD, 2001. *Bulletin on Risk Assessment - Risk assessment as an aid to dam safety management – A reconnaissance of Benefits, Methods and Current Applications*.
- 20 [IGA, 2002] IGA et al., 2002. Avis délibéré de l'Inspection Générale de l'Administration, du Conseil Général des Ponts et Chaussées, du Conseil Général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, de l'Inspection Générale de l'Environnement sur *les retours d'expérience et les inspections des services déconcentrés en charge des risques naturels réalisés depuis l'année 1999*. 19p.
- 21 [IGE, 2002] Rapport de l'Inspection Générale de l'Environnement, 2002. Inspection suite aux désordres et à la rupture des bassins de rétention de la "Savoureuse" et enseignements à en tirer notamment pour le fonctionnement des services de l'Etat impliqués dans la police des eaux sur des installations similaires. 50p + annexes.
- 22 [IIBRBS, 1998] Les Grands Lacs de Seine, 1998. Evaluation des dommages liés aux crues en Région Ile de France ; CD-ROM réalisation EDATER.
- 23 [Lang, 2003] Lang M., 2003. Les différents volets d'action pour la prévention du risque d'inondation et l'intérêt de l'information historique. VIIe Journées débat «Au péril de l'eau, la conservation préventive et les risques d'inondation», 11-12 avril 2002, Paris, Conservation-restauration des biens culturels, Cahier technique n°10, ARAAFU, Paris, 29-35
- 24 [Lavabre, 1997] Lavabre J., Cambon J.P., Folton C., Makhoulouf Z., Michel C., 1997. LOIEAU : un logiciel pour l'estimation régionale de la ressource en eau - Application à la détermination des débits de référence de la région méditerranéenne française. *Ingénieries - E A T*, n°12, 59-66.
- 25 [Le Clerc, 2004] Le Clerc S., 2004. Revisiter la notion de scénario hydrologique de référence pour la caractérisation des inondations. Thèse doctorat Université J. Fourier Grenoble 1, Cemagref Lyon, 373p.

- 26 [LINO, 2000] Lino M., Meriaux P., Royet P., 2000. Méthode de diagnostic des digues appliquée aux levées de la Loire Moyenne, Cemagref Editions, 224 p.
- 27 [Masson, 1996] Masson M., Garry G., Ballais JL., 1996. Cartographie des zones inondables. Approche hydrogéomorphologique – 1996. Ministère de l'Environnement (DE,DPPR), Ministère de l'Équipement, des Transports et du Tourisme (DAU), Edition Villes et Territoires.
- 28 [MATE, 1999] Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement ; 1999 – Plans de prévention des risques naturels, risque d'inondation ; guide méthodologique.
- 29 [MEDD, 2004] Ministère de l'écologie et du développement durable ; Recommandations pour le calcul des aléas hydrologiques dans le cadre des plans de prévention des risques d'inondations ; guide à paraître.
- 30 [MEDD, 2003] Ministère de l'écologie et du développement durable. Les plans de prévention des risques ; le risque d'inodation ; www.prim.net.
- 31 [Mériaux, 2001] Mériaux P., Royet P., Folton C., 2001. *Surveillance, entretien et diagnostic des digues de protection contre les inondations ; Guide pratique à l'usage des propriétaires et des gestionnaires*, Ministère de l'Environnement, Cemagref éditions, Antony, 192 p.
- 32 [METLTM,2004] Ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 2004, à paraître. Guide méthodologique pour le pilotage des études hydrauliques.
- 33 [Michel, 1989] Michel C., 1989. Réservoir passifs d'écrêtement de crue dans les petits bassins sans données hydrométriques" - *Hydrologie continentale, 1989, vol 4 n°1 : 25-31*
- 34 [MinAgri, 1977] Rolley R. coordinateur, 1977. *Technique des barrages en aménagement rural*. Ministère de l'Agriculture, Paris, 325 p., disponible aussi sous forme de CDRom interactif bilingue français anglais.
- 35 [MinInt, 1977] Minist. Intérieur, Minist. Environnement, Minist. Equipement et al., 1977. *Instruction technique relative aux réseaux d'assainissement des agglomérations*.
- 36 [Modarres, 1993] Modarres M., 1993. *Reliability and Risk Analysis*. New York, Marcel Dekker, Inc.
- 37 [OFEG, 2001] Office Fédéral des Eaux et de la Géologie, 2001. *Protection contre les cours d'eau*. Directives de l'OFEG, Bienne, 72p.
- 38 [Peyras, 2003] Peyras L., 2003. *Diagnostic et analyse de risques liés au vieillissement des barrages - Développement de méthodes d'aide à l'expertise*. Thèse de doctorat, spécialité génie civil, Université Blaise PASCAL – CLERMONT II, EDSPIC 217, DU 1407, 2003.
- 39 [Royet, 1994] Royet P., 1994. *La surveillance et l'entretien des petits barrages ; Guide pratique*, Ministère de l'Environnement, Cemagref éditions, Antony, 88 p.
- 40 [SETRA, 1997] Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes, 1997. *Ouvrages routiers et inondations, des idées pour mieux gérer les écoulements dans*

routiers et inondations, des idées pour mieux gérer les écoulements dans les petits bassins versants. Ministère de l'Équipement SETRA, Bagneux, plaquette de 8 p.

- 41 [TORTEROTOT,1993] Torterotot J-P, 1993. Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes. Mémoire présenté pour l'obtention du titre de docteur de l'ENPC. 263 pages et annexes
- 42 [Villemeur, 1988] Villemeur A., 1988. *Sûreté de fonctionnement des systèmes industriels.* Paris : Eyrolles.

6.2 AUTRES RÉFÉRENCES

- 43 [Arnaud, 1999] Arnaud P., Lavabre J., Masson J.M., 1999. Amélioration des performances d'un modèle stochastique de génération de hyétogrammes horaires : application au pourtour méditerranéen français. *Revue des Sciences de l'Eau*, 12/2 (1999), pp 251-271.
- 44 [AZIBI,1997] AZIBI R., 1997 - Construction de critères d'évaluation des scénarios de gestion des crues fortes en Loire moyenne, Etude du LAMSADE, Université Paris-Dauphine, pour l'Equipe pluridisciplinaire du plan Loire 42p + annexes.
- 45 [BCEOM, 2001] BCEOM, 2001. Modélisation des écoulements de la Meuse. Etude pour le compte de l'EPAMA.
- 46 [BuRec, 1987] Bureau of Reclamation, 1978, third edition. *Design of small dams.* United States Department of the Interior, Denver Colorado, 860 p.
- 47 [Colin, 1977] Colin E., Michel C., Oberlin G., 1977. *Application du calcul de la distribution de deux variables à l'estimation des crues* - BTGR N°120, Cemagref, Groupement Antony, mai, 45p.
- 48 [Dalrymple, 1960] Dalrymple, T., 1960. *Flood frequency analysis.* U.S. Geol. Surv. Water Supply Pap., 1543A.
- 49 [Desbos, 1999] Desbos, E., 1999. *Qualification de la vulnérabilité du territoire face aux inondations.* Rapport de DEA Insa Lyon, Cemagref Lyon.
- 50 [Gilard, 1998a] Gilard O., 1998. *Les bases techniques de la méthode Inondabilité.* Cemagref Editions, 207p.
- 51 [Gilard, 1998c] Gilard O., Gendreau, 1998. Inondabilité : une méthode de prévention raisonnable du risque d'inondation pour une gestion mieux intégrée des bassins versants. *Revue des Sciences de l'Eau*, 3, 429-444.
- 52 [Grand, 1996] Grand F., 1996. *Dimensionnement optimal du volume d'une retenue d'écrêtement / Comparaison des approches QdF et du laminage hydrologique.* Mémoire de 3^{ème} année ENGEES / Maître de stage G. Galéa, juillet 1996 ; Cemagref groupement de Lyon.
- 53 [Guillot, 1967] Guillot P., Duband D., 1967. La méthode du Gradex pour le calcul de la probabilité des crues à partir des pluies. *Colloque International sur*

les crues et leur évaluation, Leningrad, 15-22 Août, IASH, publication n°84, 560-569. Symposium International d'Hydrologie, Fort Collins, sept.

- 54 [Hydratec, 1998] Hydratec, SIEE et Territoires Conseil, 1998. Impact des ouvrages existants et futurs de l'IIBRBS sur les dommages liés aux crues en Région Ile de France. Etude pour le compte de l'IIBRBS, Agence de l'eau Seine Normandie, DIREN IDF, MATE.
- 55 [IGE,2001] Inspection Générale de l'Environnement, 2001. Rapport de la mission d'expertise sur les crues d'avril 2001 du bassin de la Somme, 83 p. <http://www.environnement.gouv.fr/telch/rapports-ig/2001/1221-crues-somme.pdf>
- 56 [ISL, 2001] ISL Ingénieurs Conseils, 2001. Étude de définitions d'actions d'aménagement du bassin de l'Oise. Étude pour le compte de l'Entente Interdépartementale pour la protection contre les inondations de l'Oise, de l'Aisne, de l'Aire et de leurs affluents.
- 57 [Javelle, 2002] Javelle P., Ouarda T., Lang M., Bobée B., Galéa G., Grésillon J.M., 2002 – Development of regional flood-duration-frequency curves based on the index-flood method, *Journal of Hydrology* (258)1-4, 249-259.
- 58 [Lavabre, 2003] Lavabre J., Fouchier C., Gregoris Y., 2003. SHYREG . une méthode pour l'estimation régionale des débits de crue. Application aux régions méditerranéennes françaises. *Ingénieries - EAT*, n° spécial Risques naturels et aménagement du territoire, 97-111.
- 59 [Margoum, 1992] Margoum M., 1992. *Estimation des crues rares et extrêmes : le modèle Agregée. Conceptions et premières validations.* Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, Cemagref Lyon, GIS Hydrologie FRIEND-AMHY, 252p.
- 60 [Margoum, 1994] Margoum, M., Oberlin, G., Lang, M., Weingartner, R., 1994. Estimation des crues rares et extrêmes : principes du modèle Agregée. *Hydrologie Continentale*, vol.9 (1), 85-100.
- 61 [Mathot, 1994] Mathot P., Mariani T., 1994. *Inondations, une réflexion pour demain.* Rapport de la commission d'enquête parlementaire sur les causes des inondations et les moyens d'y remédier, 3 nov., 474p.
- 62 [Michel, 1982] Michel C., 1982. *Extrapolation par la méthode du Gradex.* Note du 03-05, Cemagref Antony.
- 63 [Michel, 1985] Michel C., 1985. *Effet d'un réservoir linéaire sur les crues : programme DVPB - Cemagref Antony, Note interne, Re 09.01.85.*
- 64 [Michel, 1986] Michel C., Legras Y., 1986. Estimation de l'écrêtement réel des crues par une retenue à l'aval d'un petit bassin versant" - *SHF, XIX^e journées de l'Hydraulique, question n°V, rapport n°13.*
- 65 [Petrascheck, 199] Petrascheck A., 1999. Gestion des risques de crue – l'expérience de la Suisse. *Conférence internationale sur les risques naturels en montagne , atelier Inondations, Grenoble 12-13 avril, Cemagref*

Editions, 148-150.

- 66 [Poulard, 2002] Poulard C. Witkowska H., 2002. Rapport annuel de projet du programme bilatéral Polonium. Ralentissement des crues par des aménagements répartis en tête de bassin. 78p.
- 67 [SOGREAH,1994] SOGREAH, 1994. Aménagement de l'Isère dans la vallée du Grésivaudan. Etude d'impact économique. Etude pour le compte de l'association départementale Isère-Drac-Romanche. 48 p.

Annexe A LA POLITIQUE NATIONALE DE GESTION DU RISQUE INONDATION

La politique nationale de gestion du risque d'inondation s'inscrit dans un cadre législatif qui a beaucoup évolué depuis 20 ans avec plusieurs lois importantes :

- la loi n°82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles ;
- la loi n°87-565 du 22 juillet 1987 relative à l'organisation de la sécurité civile, à la protection de la forêt contre l'incendie et la prévention des risques majeurs ;
- la loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau ;
- la loi n°95-101 du 2 février 1995 relative au renforcement de la protection de l'environnement ;
- la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels et à la réparation des dommages.

La politique de l'Etat en matière de gestion du risque inondation repose sur plusieurs piliers :

- la connaissance du risque,
- la prévention du risque,
- la concertation sur le risque et l'information du public.

A.1 LA CONNAISSANCE DU RISQUE

La gestion du risque inondation exige tout d'abord de bien l'appréhender toutes ses composantes : l'aléa, les enjeux et leur vulnérabilité.

Les événements récents, en France comme en Europe, ont montré que des marges importantes de progrès subsistent en matière de méthodologie pour la caractérisation des fréquences de retour des événements, pour le recueil et la conservation des données relatives aux inondations. Ce sujet ne peut être négligé. L'imprécision des estimations des fréquences de retour peut avoir des conséquences importantes sur la tenue des aménagements faits dans les lits mineur et majeur des cours d'eau (seuils, barrages, digues, infrastructures de transports,...).

L'identification des réponses les plus durables en termes de gestion du risque inondation exige de caractériser l'hydrologie et les fonctionnements hydraulique et sédimentaire du cours d'eau et du bassin versant.

Les programmes de recherche portant sur le risque inondation dit RIO et « évaluation et prise en compte des risques naturels et technologiques » dit EPR, animés et financés par le MEDD, ont contribué à une meilleure connaissance du risque inondation au niveau national et international dans les dimensions scientifiques, techniques et sociales. Le programme "risques, décision et territoires" (RDT) a pris la suite de ces deux programmes.

A.1.1 L'aléa

L'aléa représente le phénomène physique susceptible de provoquer des dommages, ici le débordement du cours d'eau. Cet aléa ne concerne que certaines parties du territoire français. La délimitation de l'extension maximale des inondations constitue un aspect important du diagnostic de l'exposition au risque d'un territoire.

La constitution des atlas des zones inondables par l'Etat est l'occasion d'approfondir la connaissance de l'aléa notamment dans sa dimension historique (catalogue des crues passées). La méthode géomorphologique, fréquemment utilisée pour la réalisation des atlas des zones inondables, a montré sa capacité à caractériser de manière qualitative les écoulements lors des crues de septembre 2002 dans le Gard.

Les outils de surveillance actuellement en place participent à la caractérisation de cet aléa. La constitution, la mise à jour et la gestion d'une base de données sur l'hydrologie des cours d'eau telle que la banque HYDRO contribue à la connaissance localisée de l'aléa ainsi qu'à l'établissement des fréquences de retour des crues.

La mise en place de repères de crues permet d'inscrire le niveau des crues passées dans la mémoire collective.

La mesure en temps réel du niveau des eaux par les services d'annonce de crue et de prévision de crue contribue à une connaissance de l'imminence du danger.

A.1.2 Les enjeux et la vulnérabilité

Le risque naît de la conjugaison d'un aléa et d'enjeux. Les personnes et les biens présents dans la zone inondable constituent une partie des enjeux examinés dans le cadre de la politique de gestion des inondations. Le recensement de ces enjeux permet d'examiner le niveau potentiel des dommages. Le niveau réel des dommages dépendra, quant à lui, des mesures de prévention prises ainsi que de la vulnérabilité résiduelle des enjeux. En plus de la connaissance de l'aléa, l'évaluation du risque nécessite ainsi de caractériser les enjeux situés en zone inondable et d'en évaluer la vulnérabilité. Les plans de prévention des risques constitue une occasion d'étudier cette question et cet aspect devrait y être renforcé.

Il est à souligner que l'étude des enjeux et de la vulnérabilité ne peut se limiter à une évaluation statique. En effet, les collectivités territoriales peuvent être tentées de prévoir dans les documents d'urbanisme, et en particulier les SCOT, la constructibilité de terrains situés en zone inondable dans la continuité de l'urbanisation en vue d'absorber la demande d'espace suscitée par la croissance démographique et économique. Si le diagnostic de la vulnérabilité du territoire doit tenir compte des évolutions planifiées de l'urbanisation, réciproquement la planification de l'évolution de l'urbanisation doit complètement intégrer les risques présents sur le territoire, que l'Etat aura porté à connaissance.

La somme de ces travaux préalables permet de caractériser le risque inondation. Si la réduction de la vulnérabilité, la limitation voire la suppression de l'occupation des sols en zone inondable doivent être envisagées dès ce stade du diagnostic, proposer des solutions techniques de protection contre les inondations des constructions existantes exige d'examiner plus avant le fonctionnement hydrologique, hydraulique et sédimentaire du bassin versant.

A.1.3 Le fonctionnement hydrologique, hydraulique et sédimentaire

Un cours d'eau est un système dynamique. Le régime d'écoulement des eaux, la nature du lit et la végétation façonnent la morphologie du cours d'eau. Les quelques exemples ci-après le mettent suffisamment en évidence :

- La capacité de transport sédimentaire croissant avec la vitesse, la fréquence et l'importance des crues agissent sur l'évolution du lit.
- Lorsque le lit mineur est endigué, la vitesse du courant est plus forte lors des crues ; ce qui se traduit par une plus forte capacité de transport sédimentaire et souvent par l'affouillement des ouvrages de protection.
- Dans les zones où la vitesse est lente, les bancs de sédiments sont susceptibles d'être fixés par la végétation et de réduire d'autant la capacité d'écoulement du cours d'eau.

L'examen des différents modes de gestion de ce risque comporte ainsi nécessairement une dimension descriptive importante visant à étudier l'hydrologie et à comprendre le fonctionnement hydraulique et sédimentaire du cours d'eau :

- Les interventions sur les lits majeur ou mineur du cours d'eau (construction d'un seuil en lit mineur, élévation de digue en lit majeur, curage,...) , même très locales, peuvent affecter le fonctionnement hydraulique et sédimentaire d'une partie voire de l'ensemble du bassin versant.
- Une action bénéfique sur un sous-bassin peut se traduire par la synchronisation des pointes de crues à la confluence et dégrader la situation en aval de la confluence.
- Une solution satisfaisante à court terme peut présenter des conséquences à long terme, notamment en termes de sédimentation ou d'affouillement des protections, que seul un examen approfondi du projet peut révéler. Par exemple la mise en place de digues de protections en bordure du lit majeur a de grandes chances de se traduire par un enfoncement du lit et un affouillement en pied de ces protections.
- La question des conséquences des protections contre les inondations à l'amont ou à l'aval sur les lignes d'eau doit en particulier être traitée.
- La gestion du transport sédimentaire peut être également centrale pour étudier l'équilibre économique de certains projets. Les dépenses nécessaires à la réfection des protections locales affouillées en pied, à l'évacuation des sédiments dans les retenues d'eau ou de gestion des atterrissements qui peuvent se former dans les zones de plus faible vitesse témoignent de ce fait.

Tous ces exemples soulignent l'importance d'une approche globale, à l'échelle du bassin versant, et intégrée, examinant l'ensemble des conséquences sur l'environnement.

A.2 LA PRÉVENTION DU RISQUE

Comme évoqué ci-dessus, le risque résulte de la conjugaison d'un aléa et d'une vulnérabilité. Ainsi, la prévention du risque inondation doit agir sur ces deux volets : la connaissance de l'aléa et la réduction de la vulnérabilité des enjeux.

En France comme en Europe, les événements des dix dernières années ont montré que les stratégies de protection contre les inondations s'attachant uniquement à réduire l'aléa pouvaient être mises en défaut. Les conséquences d'une telle mise en défaut, notamment humaines et économiques, peuvent être considérables.

Ceci souligne l'importance d'agir de concert sur les deux volets précités : réduction de l'aléa et réduction de la vulnérabilité. L'action sur l'aléa restant assez modeste, les meilleures actions de prévention consistent à agir sur les enjeux et leur vulnérabilité aux inondations. Les collectivités territoriales, qui disposent d'outils de planification de l'occupation des sols, ont un rôle important à jouer dans ce domaine tant en matière d'aménagement du territoire, qu'en matière de prévention du risque.

A.2.1 La réduction de l'aléa

L'objectif d'une stratégie de réduction de l'aléa est de réduire le niveau des eaux sur les zones comportant d'ores et déjà de forts enjeux humains et économiques à l'échelle du bassin versant. A cette fin, plusieurs actions peuvent être mises en œuvre :

A.2.1.1 La préservation et la restauration des champs d'expansion des crues

Les champs d'expansion de crues existants avec leurs capacités de stockage des eaux excédentaires constituent un moyen efficace de lutter contre les inondations. Leur préservation, en évitant d'y réaliser des constructions ou aménagements incompatibles, est primordiale. En effet, les champs d'expansion des crues limitent les débits en aval par un phénomène naturel de stockage/déstockage ainsi que l'érosion en réduisant les vitesses. Les champs d'expansion des crues participent ainsi à la régulation des hautes eaux.

La restauration des champs d'expansion de crues constitue une action prioritaire.

A.2.1.2 La restauration des cours d'eau et le maintien du libre écoulement des eaux

La restauration des cours d'eau consiste à maintenir les capacités d'écoulement naturelles des cours d'eau notamment en assurant l'entretien des berges et en conservant la mobilité des bancs.

Maintenir le libre écoulement des eaux consiste à éviter que les lits mineurs et majeur soient encombrés par des éléments non désirés qui peuvent nuire à l'écoulement des eaux ou présenter un danger en cas de crue (embâcles,...). Ces actions doivent participer à l'objectif de réduction du niveau des eaux au droit des zones comportant de forts enjeux humains et économiques.

Ces travaux sont organisés par l'Etat pour le lit mineur des cours d'eaux domaniaux relevant du domaine public de l'Etat. Cette organisation peut prévoir des modalités diverses de mise en œuvre allant d'une maîtrise d'ouvrage directe à des concessions ou transferts de gestion en passant par la mise en place d'établissements publics spécifiques (VNF) ou par une gestion partenariale avec les collectivités territoriales intéressées.

Les propriétaires riverains ont en principe la responsabilité de ces travaux pour les autres cours d'eau mais cette responsabilité est très souvent reprise par des associations syndicales ou des collectivités territoriales.

Le contrôle du maintien du libre écoulement des eaux dans lit majeur s'exerce essentiellement dans le cadre de la police de l'eau et des plans de prévention des risques.

A.2.1.3 Les ouvrages de protection des constructions et des lieux habités

Toutes les mesures évoquées ci-dessus concourent à la protection des lieux habités. Toutefois, dans certaines situations, la protection des constructions et lieux habités peut conduire à mettre en œuvre des ouvrages spécifiques de protection.

Cette protection, assurée soit à l'échelle du bassin versant soit localement, doit être envisagée sur les fondements d'une réflexion à l'échelle du bassin versant afin d'examiner l'ensemble des conséquences de l'implantation des ouvrages.

Les ouvrages de ralentissement dynamique permettent de réguler les débits et peuvent faire sentir leurs effets à l'échelle du bassin versant en écrétant la pointe de crue. Certains ouvrages, qui présentent un plan d'eau permanent ou temporaire, ont l'inconvénient d'interrompre ou de perturber le transit sédimentaire.

Les zones déjà fortement urbanisées et inondables peuvent nécessiter des aménagements de protection rapprochée, en particulier des digues (voir circulaire du 30 avril 2002). Ces aménagements induisent, par réduction du champs d'expansion des crues, une aggravation de la situation hydraulique en aval (et sur la berge opposée). Ils génèrent par ailleurs un risque particulier pour la sécurité publique en cas de rupture.

Par définition, ces ouvrages de protection contre les inondations sont conçus pour résister et contenir un événement d'une ampleur définie. Au delà, ils n'assurent plus leur rôle de protection et peuvent même aggraver les conséquences de l'inondation en inondant brusquement des zones jusque là protégées.

A.2.1.4 Le contrôle de la sécurité des ouvrages

Les ouvrages évoqués ci-dessus présentent ainsi à divers degrés des risques pour la sécurité publique. La rupture par surverse des ouvrages de protection constitue un mode de rupture prévisible. Toutefois, la rupture peut intervenir avant même la surverse en cas de conception inadaptée ou d'entretien incomplet des ouvrages.

Leurs effets sur les écoulements d'eau, le transport sédimentaire ou les écosystèmes ainsi que le risque de rupture ont conduit à les soumettre à déclaration ou à autorisation au titre de la loi sur l'eau.

Les propriétaires et les gestionnaires doivent surveiller et entretenir leurs ouvrages dont ils ont la responsabilité ; c'est une condition nécessaire pour assurer la sécurité des riverains. Dans le cadre de leurs missions, les services chargés de la police de l'eau s'assurent que l'entretien et la surveillance des ouvrages sont bien assurés (Cf. Circulaire du 6 août 2003 relative à l'organisation du contrôle des digues intéressant la sécurité publique).

A.2.2 La réduction de la vulnérabilité

Les actions de réduction de la vulnérabilité peuvent être envisagées à de nombreuses échelles de temps :

- long terme : planification de l'occupation des sols,
- moyen terme : mesures constructives,
- court terme : mesures d'urgence.

A.2.2.1 L'occupation et l'usage des sols

Le « porter à connaissance » du risque constitue une étape très importante de l'information des collectivités territoriales leur permettant une meilleure prise en compte du risque dans les documents d'urbanisme. Le porter à connaissance pour tout document d'urbanisme sur la base des informations disponibles est impérative (art. L121-2 du Code de l'Urbanisme).

A.2.2.2 Les plans de prévention des risques et les mesures constructives

Les plans de prévention des risques naturels prévisibles visent à réglementer l'occupation des sols dans les zones inondables dans une perspective de réduction ou de limitation de la vulnérabilité. Ils permettent en outre de préserver les zones d'expansion des crues. Ils définissent ainsi des zones interdites à l'urbanisation du fait de l'aléa trop important ou pour y préserver la capacité de stockage des crues. Ils édictent des prescriptions propres à réduire la vulnérabilité des constructions existantes en zone inondables.

Leurs prescriptions portent donc autant sur les aménagements existants que sur les projets futurs. Des prescriptions spécifiques peuvent être définies au titre des mesures de sauvegarde. Ces mesures de réduction de la vulnérabilité peuvent consister, par exemple, à adapter l'architecture ou l'aménagement intérieur aux conséquences d'une inondation.

A.2.2.3 La délocalisation des constructions

Dans certains cas, lorsque la protection des constructions est techniquement impossible ou conduit à fortement aggraver la situation en aval, le déplacement des constructions doit être envisagé.

A.2.2.4 Mesures d'urgence

Des mesures telles que l'évacuation temporaire des populations peuvent également être envisagées.

A.2.3 La planification, le financement des actions et l'indemnisation des dommages

A.2.3.1 Les outils de planification

Les schémas d'aménagement et de gestion des eaux rassemblent, autour d'un projet commun, l'ensemble des acteurs concernés par les usages de l'eau à l'échelle d'un bassin versant local. Ces SAGE peuvent notamment définir des actions de prévention des risques

liés aux inondations. Une fois le SAGE approuvé, les décisions prises dans le domaine de l'eau par les autorités administratives, applicables dans le périmètre qu'il définit, doivent être compatibles ou rendues compatibles avec le SAGE. Les autres décisions administratives doivent prendre en compte les dispositions du SAGE.

Pour limiter l'accroissement du risque, une gestion rationnelle de l'espace doit être mise en place. Cette gestion de l'urbanisation conduit à éviter les constructions nouvelles dans les zones inondables. Le Plan de Prévention du Risque, prescrit et élaboré par les services de l'Etat en concertation avec les maires des communes concernées, permet d'avoir cette réflexion sur l'aménagement du territoire. Les servitudes prévues par le plan de prévention des risques doivent être annexées aux plans locaux d'urbanisme.

Les schémas de cohérence territoriale, les plans locaux d'urbanisme et les cartes communales élaborés par les communes et les établissements de coopération intercommunale intègrent la prévention des risques naturels prévisibles .

A.2.3.2 Le financement des actions

Pour financer les actions de réduction de l'aléa ou de la vulnérabilité, le Ministère chargé de l'environnement mobilise chaque année de l'ordre de 45 millions d'euros sur son budget depuis 1994. Les Conseils Régionaux contribuent dans le cadre des contrats de plans Etat-Régions pour les années 2000 à 2006. Enfin, les collectivités territoriales ont la possibilité d'obtenir le remboursement de la TVA sur les opérations de protection contre les inondations dont elles sont maître d'ouvrage.

Les collectivités locales ont également la possibilité de se substituer aux propriétaires pour assurer l'entretien d'ouvrages et de rivières (art. L 221-7 du code de l'environnement).

L'élaboration des plans de prévention des risques et l'évacuation temporaire des personnes peuvent être financés par le fond de prévention des risques naturels majeurs. La loi du 30 juillet 2003 précitée prévoit enfin que des aides pourront être accordées aux particuliers et aux petites entreprises pour la réalisation de travaux de réduction de la vulnérabilité prévus par un plan de prévention des risques.

A.2.3.3 L'indemnisation des dommages :

La loi n° 82-600 du 13 juillet 1982 relative à l'indemnisation des victimes de catastrophes naturelles (art. L.125-1 à L.125-6 du code des assurances), modifiée notamment par la loi du 30 juillet 2003, a fixé pour objectif d'indemniser les victimes de catastrophes naturelles en se fondant sur le principe de solidarité nationale.

Les contrats d'assurance garantissant les dommages d'incendie ou les dommages aux biens situés en France ainsi que les dommages aux corps de véhicules terrestres à moteur ouvrent droit à la garantie contre les catastrophes naturelles. Cette garantie est étendue aux pertes d'exploitation, si elles sont couvertes par le contrat de l'assuré.

Sont considérés comme effets des catastrophes naturelles les dommages matériels directs non assurables. Pour que le sinistre soit couvert au titre de la garantie " catastrophes naturelles ", il faut que l'agent naturel en soit la cause déterminante. L'agent naturel doit par ailleurs présenter une intensité anormale, quelle que soit son extension géographique (dommage très localisé ou non).

La garantie sera mise en jeu si les biens atteints sont couverts par un contrat d'assurance " dommage " ou contrat " perte d'exploitation " et si l'état de catastrophe a été constaté par un arrêté interministériel pris par les ministres chargés de la sécurité civile, et de l'économie.

Tout assuré qui n'aurait pas respecté ou pris les mesures imposées par les règles en vigueur, prescrites par les plans de prévention des risques, peut ne pas bénéficier de la garantie.

A.3 LA CONCERTATION SUR LE RISQUE ET L'INFORMATION DU PUBLIC

Pour préparer les riverains à adopter une conduite adéquate lors de la survenue d'un événement, l'information préalable des habitants et des résidents constitue une nécessité impérative.

La mise en place de repères de crue par les communes participe également à cette information du public.

Les maires des communes sont une responsables en matière d'organisation de l'information du public.

A.3.1 La concertation

L'Etat et les collectivités territoriales ont l'obligation de travailler ensemble à la gestion des risques et à leur prise en compte dans l'aménagement. Le partage des connaissances géographiques et une appréciation commune des phénomènes et des enjeux est un préalable indispensable à l'élaboration d'un plan de prévention des risques ou d'un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux.

Les PPR sont élaborés à l'initiative de l'Etat, prescrits et approuvés par le préfet après consultation des collectivités territoriales et enquête publique. La concertation est une démarche qu'encourage le MEDD pour mobiliser l'ensemble des acteurs et mettre en jeu des synergies des actions de l'Etat et des collectivités territoriales qui ont des attributions complémentaires.

A.3.2 L'information préalable

Les outils de connaissance développés au niveau local permettent d'informer le public, les services de l'Etat et les collectivités territoriales des risques encourus et des gestes permettant de limiter les conséquences d'une inondation.

L'information du public est une composante particulièrement importante dans la gestion du risque inondation. Elle vise notamment à faire prendre conscience du risque et pérenniser la culture du risque.

Assurée à la fois par l'Etat et les communes, elle repose notamment sur les atlas des zones inondables (azi), les dossiers départementaux sur les risques majeurs (ddrm), le dossier communal synthétique (dcs) et les dossiers d'information communaux sur les risques majeurs (dicrim).

Le maire a notamment la possibilité d'imposer l'affichage du risque, sous certaines conditions, dans les établissements recevant du public, dans les immeubles destinés à l'exercice d'activité, dans les terrains aménagés pour l'accueil des campeurs ou dans les locaux à usage d'habitation.

Enfin, l'information à l'occasion des transactions immobilières permet de toucher les habitants.

A.3.3 Les atlas des zones inondables

L'identification des zones inondables (AZI) nécessite la connaissance des phénomènes de débordement des rivières et une cartographie des zones qui y sont soumises.

Les atlas de zones inondables, réalisés par l'Etat, sur la base des plus grandes crues connues, permettent une connaissance des zones à risque et une identification des zones de stockage à préserver.

L'affichage du risque permet de responsabiliser l'ensemble des acteurs concernés: services de l'Etat, communes, particuliers.

Le plan de prévention des risques naturels prévisibles (ppr) et les plans locaux d'urbanisme (plu) participent également à cette information.

A.3.4 L'annonce et la prévision des crues

Pour aider les maires dans leur mission de prévention des inondations, l'Etat organise une annonce des crues sur les cours d'eau les plus importants. Près de 6 300 communes bénéficient de cette annonce, rassemblant plus de 90% des populations situées en zone inondable. Le Service d'Annonce des Crues a pour mission de surveiller en permanence la pluie et les écoulements des rivières alimentant les cours d'eau dont il est en charge.

Une réforme a été engagée depuis le 1^{er} octobre 2002 pour mutualiser les moyens des 52 services d'annonce de crues afin de constituer 22 services de prévision des crues dotés d'une taille suffisante pour assurer les nouvelles missions, notamment la prévision, dont ils seront chargés. Cette réforme se développe suivant plusieurs axes :

- réorganisation des services,
- modernisation des outils (automatisation des stations de mesure, densification du réseau des radars hydrométéorologiques, mise en oeuvre d'outils de prévision des crues,...),
- amélioration de la communication (fourniture aux maires d'une information plus compréhensible et plus fiable,...)

Annexe B UN EXEMPLE D'AIDE À LA DÉFINITION DE STRATÉGIE : LA MÉTHODE INONDABILITÉ

B.1 LES PRINCIPES DE LA MÉTHODE INONDABILITÉ .

La méthode **Inondabilité** est un outil de simulation et de cartographie du risque d'inondation. Elle permet de visualiser sur un bassin versant soumis aux crues, la répartition spatiale du risque. La possibilité de comparer aisément sur une base cartographique, les différentes répartitions du risque correspondant à différents états du bassin versant, état actuel ou états futurs à la suite de différents scénarios d'aménagement, en fait un outil efficace d'aide à la définition de stratégies d'aménagement.

La méthode admet l'axiome selon lequel "*le risque zéro n'existe pas*" et repose sur la notion corollaire de niveau de risque acceptable. Cette dernière traduit le fait que la reconnaissance de ne pas pouvoir se prémunir totalement, même contre les risques faibles, amène à admettre l'existence d'un seuil au delà duquel on n'exige pas d'être protégé. L'acceptabilité du risque en un lieu, ou sa traduction active en besoin de protection, dépend essentiellement des enjeux qui lui sont attachés. Il est naturel d'admettre qu'un bâtiment public en zone urbaine, un hôpital par exemple, et une parcelle sylvicole en zone de bas fond alluviale, une peupleraie par exemple, n'ont pas le même besoin de protection contre les inondations. Inondabilité exploite les possibilités de gestion du risque qu'offre la répartition hétérogène de ce paramètre sur le territoire.

Dans la méthode inondabilité, le risque est classiquement évalué par comparaison de ses deux composantes indépendantes que sont l'aléa et la vulnérabilité.

L'aléa inondant d'un lieu donné est d'origine diverse : débordements d'un cours d'eau voisin, ruissellements locaux liés à une forte pluie proche. Pour le caractériser, la métrique probabiliste est utile. En inondabilité, l'aléa d'une parcelle peut être quantifié par la période de retour, notée **TAL**, pour période de retour **T** correspondant à l'**ALéa**, de la crue la plus faible capable de l'inonder. Ainsi, à une parcelle agricole atteinte par la crue quinquennale du cours d'eau riverain, est attaché un aléa inondant de valeur 5 ans. Cette variable, définie localement, peut être cartographiée sur un bassin versant, dès lors que l'on y connaît un éventail de crues de référence et l'étendue des inondations qu'elles ont provoquées. On notera que ces éléments sont accessibles notamment à partir des études hydrologiques et hydrauliques du bassin versant (cf § 3.1 et 3.2).

La vulnérabilité traduit la sensibilité d'une parcelle à l'inondation, l'importance des dommages encourus et l'acceptabilité au sens socio-économique de ces dommages. Le besoin de protection ainsi attaché à un certain usage du sol en un lieu, qu'on désigne indifféremment par objectif de protection, peut très généralement s'exprimer au moyen d'au plus quatre variables caractéristiques : période de retour, durée, profondeur et vitesse. Par exemple, pour un camping, on se donnera les objectifs de protection correspondant aux caractéristiques maximales d'une submersion acceptable, qui pourraient être : durée maximale de la submersion quasi nulle ; fréquence maximale de submersion une fois tous les 10 ans, tirant d'eau maximal 50 cm, vitesse maximale 30 cm/s. Les modèles hydrologiques mis en œuvre au sein de la méthode inondabilité (modèles en débits-durées-fréquences) permettent de réduire ce quadruplet à une seule variable, équivalente à une période de retour. Ainsi, la vulnérabilité peut se mesurer par une seule période de retour, désignée ici par **TOP**, pour Période de retour **T** correspondant à l'**Objectif de Protection**, directement comparable à celle utilisée pour l'aléa. La vulnérabilité, et par conséquent la variable TOP qui la caractérise, sont définies localement et peuvent être cartographiées sur un bassin versant dès lors que l'on sait associer un objectif de protection à une vulnérabilité, ou autrement dit un risque maximal acceptable à un enjeu.

On dispose alors, en tout lieu du bassin versant étudié, d'une mesure du risque d'inondation qui peut être estimée par l'écart (TOP-TAL) entre l'objectif de protection et l'aléa inondant.

Les grandeurs TAL et TOP, définies localement, peuvent être cartographiées et reportées sur fond de plan. Leur construction les rend directement comparables. Trois situations, chacune codée par une couleur, peuvent ainsi se présenter sur chaque parcelle d'un territoire soumis à inondation (cf figure 19 ci-dessous) :

- En jaune, nous identifions les parcelles qui ne sont inondées pour aucune des crues incidentes. TAL est quasi infini (la période de retour de la première crue inondante est très élevée et le risque d'inondation est quasi nul).
- En vert, nous identifions les parcelles qui ont une vulnérabilité, mesurée par TOP, plus faible que l'aléa, mesuré par TAL. Le risque, évalué par TOP – TAL est négatif. Ces parcelles sont en fait bien protégées et disposent même d'un crédit de protection : une inondation plus importante y serait acceptable.
- Enfin, les parcelles rouges correspondent à une situation à risque (TOP- TAL >0). Ces parcelles sont inondées de façon inacceptable. Par conséquent, soit leur protection doit être améliorée (construction d'endiguements localisés par exemple), soit leur vulnérabilité doit être diminuée (dispositions constructives, déplacement de l'habitat,...).

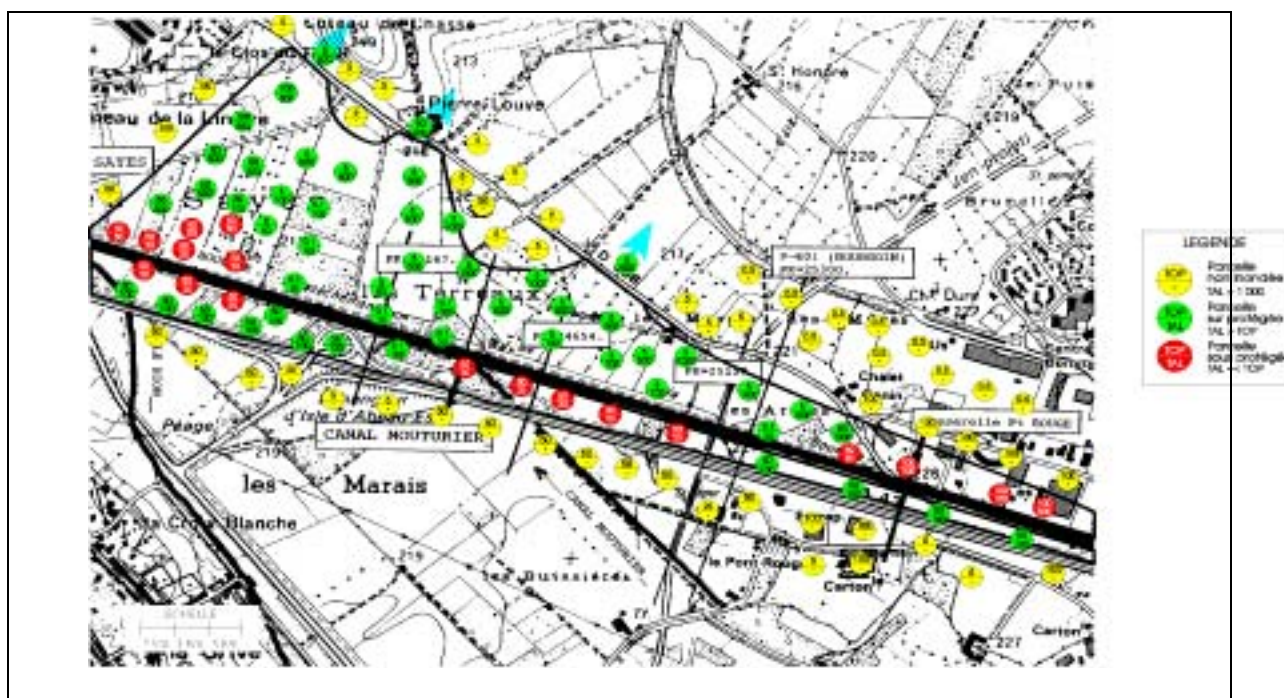


figure 19. Carte de risque (Rivière Bourbre, Isère)

B.2 L'ORGANISATION DES SOLIDARITÉS AMONT - AVAL SUR UN BASSIN VERSANT

Les cartes, résultats de la méthode Inondabilité, n'apportent pas de solution en elles-mêmes. Elles mettent simplement en évidence des zones à problème, sous-protégées, et des zones avec une marge de protection, en quelque sorte sur-protégées. Ainsi apparaissent clairement les « sources » et « puits » de protection que les aménagements devront s'efforcer de mieux équilibrer, selon le cas par sur-inondation ou par renforcement de la protection. La méthode permet de quantifier, en termes de risque d'inondation, la situation existante mais aussi les situations résultant de différents scénarios d'aménagements de protection. L'examen de l'évolution de la répartition du risque permet d'ailleurs d'orienter et de faciliter le choix des scénarios d'aménagement. En ce sens, Inondabilité peut être un outil efficace d'aide à la définition de stratégies d'aménagement.

Bien entendu, ce cadre propice ne peut être complètement valorisé qu'à une double condition. Les acteurs concernés doivent s'impliquer fortement dans la négociation préalable à la réalisation des travaux hydrauliques et s'efforcer de rechercher une répartition équilibrée du risque. Ils doivent s'entendre sur l'évaluation du risque maximal acceptable et sur l'évaluation des services associés aux transferts de volumes de crue entre zone mieux protégées et zones sur-inondées. Les cartographies synthétiques issues de la méthode inondabilité peuvent contribuer à rendre plus explicites et plus objectives les bases de cette négociation.

Annexe C MÉTHODES DE DIMENSIONNEMENT DU VOLUME DE RETENUE D'OUVRAGES DE LAMINAGE

C.1 MÉTHODE DES PLUIES MAXIMALES

C'est l'une des deux méthodes proposées pour le dimensionnement des bassins d'orage (Minist. Intérieur *et al.*, 1977). Elle consiste en une analyse statistique des données pluviométriques représentatives du bassin versant étudié. Les paramètres d'une série de lois de Gumbel sont ajustés sur des échantillons de pluies maximales de différentes durées d (courbes intensité-durée-fréquence). Pour une occurrence donnée, il est alors possible de représenter par une courbe la variation de la lame d'eau précipitée maximale en fonction de la durée d . Une telle courbe ne représente aucun épisode pluvieux réel, elle donne une courbe enveloppe des quantiles de pluie de différentes durées d susceptibles de se produire. On se fixe ensuite, pour une période de retour donnée, la valeur du débit de vidange que l'on supposera constant. Pour qu'il soit exprimé dans la même unité que les pluies, on le convertit en mm :

$$H(t) = \frac{360q}{S_a} \cdot t$$

où H : débit de sortie (mm)

q : débit de sortie (m³/s)

S_a : Surface active (ha) ; $S_a = S \cdot C_a$ (C_a : coefficient d'apport pour passer de la pluie brute à la pluie nette)

Il suffit ensuite de reporter sur un même graphique la courbe enveloppe des pluies liée à la période de retour choisie (ex. : décennale) et la droite $H(t)$ correspondant à la hauteur d'eau évacuée en fonction du temps (cf figure 20). L'écart en ordonnée entre la courbe enveloppe des pluies maximales et la droite de vidange représente à chaque instant la pluie à stocker. L'écart maximal ΔH correspond au volume du bassin de retenue nécessaire si toute la pluie contribuait à l'écoulement. Le volume de la retenue sera donné par la relation :

$$V = 10 \cdot \Delta H \cdot S_a$$

où V : volume de la retenue (m³)

ΔH : écart maximal (mm)

S_a : surface active (ha)

La précision de cette méthode n'est pas très bonne car elle s'appuie sur l'étude des pluies et nécessite l'estimation du coefficient d'apport C_a qui est toujours difficile à évaluer correctement (dépend de l'occupation du sol, de l'état de saturation du sol, de l'intensité de la pluie, ...).

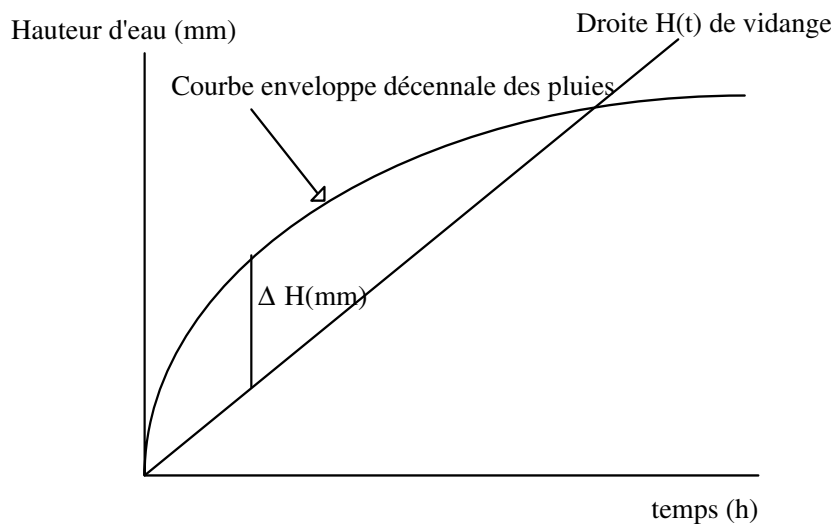


figure 20. Détermination du volume d'une retenue à partir d'une courbe enveloppe des pluies

C.2 COURBE ENVELOPPE DES VOLUMES MAXIMAUX

Le principe de l'approche précédente peut être repris en exploitant l'information fournie par les courbes QdF . Cela permet de s'affranchir de la délicate opération qui consiste à estimer le coefficient d'apport C_a dans le cas des pluies. La courbe enveloppe d'occurrence donnée est déduite des distributions relatives aux volumes de crue V_d relatifs aux différentes durées d . Cette courbe enveloppe n'est associée à aucun événement réel, mais elle est représentative du régime des crues du bassin versant. De même que pour les pluies maximales, nous obtenons le même type de représentation (figure 21).

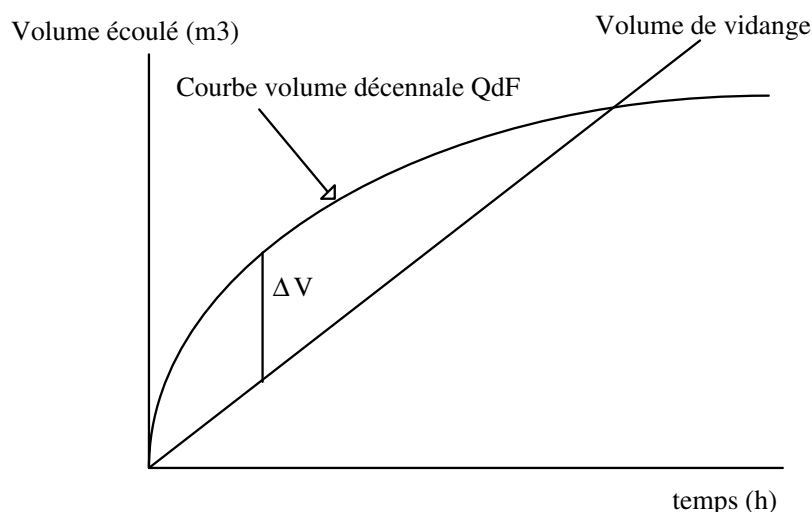


figure 21. Détermination du volume d'une retenue à partir d'une courbe enveloppe QdF

La retenue dimensionnée (ΔV) par cette méthode est supposée avoir un débit de sortie constant. Si l'on reprend les hypothèses de Michel (1985), considérant que le débit de sortie q de l'ouvrage est lié au volume V de la retenue par une relation du type :

$$q=(V/b)^\alpha \quad (\text{Eq. 1})$$

cela revient à dimensionner, à partir de la courbe QdF , une retenue dont le paramètre α est nul. On pourra se ramener à une retenue de paramètre α quelconque par la relation suivante (Michel et Legros, 1986) :

$$V_\alpha = \left(\frac{3+4\alpha}{3}\right) V_{\alpha=0} \quad (\text{Eq. 2})$$

C.3 RÉGRESSION MULTIPLE POUR LE DIMENSIONNEMENT D'OUVRAGES PASSIFS D'ÉCRÊTEMENT DE CRUE

C.3.1 Règle de dimensionnement

Michel (1989) a proposé une règle de dimensionnement simple du volume de retenue, à partir de la relation suivante obtenue à partir de l'étude de 59 bassins versants :

$$V = (0.57\alpha + 0.43) \frac{QIXA10 \cdot D}{k} \left(\frac{k-1}{1-2kQA/QIXA10} \right)^{1.25} \quad (\text{Eq. 3})$$

où V : volume de la retenue (m^3)

α : coefficient caractéristique de l'ouvrage d'évacuation (Eq. 1)

$QIXA10$: débit décennal de pointe (m^3/s)

D : durée caractéristique de crue, estimée par la méthode Socose (s)

k : objectif de réduction de la crue de référence ($k = Q_{\text{référence}}/Q_{\text{laminé}}$)

QA : débit moyen interannuel (m^3/s)

avec : $\ln D = 12.5 - 0.7 \ln QIXA10 + 0.4 \ln QA + 0.3 \ln S$ (méthode Socose)

où S : superficie du bassin versant (km^2)

Grand (1996) a comparé les deux formules d'estimation simplifiées du volume V , en considérant deux jeux d'échantillons :

- 109 bassins versants où le volume $V(QdF)$ de laminage a été calculé pour trois rapports k de laminage, à partir de la courbe enveloppe des volumes maximaux (figure 21) ;
- 43 bassins versants parmi les 109 précédents où les données étaient disponibles pour estimer le volume $V(\text{Michel})$ d'après la régression multiple (Eq. 3).

et en calculant de façon détaillée, par simulations d'hydrogrammes, le volume V permettant de réduire d'un facteur multiplicatif k le débit décennal de pointe $QIXA10$. Les droites de régression ajustées entre le volume V et les estimations $V(QdF)$ et $V(\text{Michel})$ ont respectivement pour équation :

$$\ln(V) = 0,988 \cdot \ln V(QdF) + 0,155 \quad \text{avec} \quad \text{Prob}[0,77V(QdF) < V < 1,31V(QdF)] = 0,70$$

$$\ln(V) = 0,984 \cdot \ln V(\text{Michel}) + 0,1 \quad \text{avec} \quad \text{Prob}[0,56V(\text{Michel}) < V < 1,80V(\text{Michel})] = 0,70$$

L'incertitude d'estimation du volume de la retenue est donc de l'ordre de $\pm 30\%$ par une approche sur les volumes maximaux (avec des courbes QdF) et de -40 à $+80\%$ par une approche par régression multiple (pour un intervalle de confiance à 70%).

C.3.2 Quantification de l'effet de laminage

On pourra alors comparer la distribution du débit de pointe, avec ou sans ouvrage de laminage et rechercher les caractéristiques de la retenue permettant de remplir l'objectif d'écrêtement fixé par ailleurs (Michel, 1985). La figure 22 donne un exemple de laminage hydrologique des crues d'un bassin versant de 2706 km^2 par une retenue à vidange linéaire, ($\alpha=1$ dans Eq. 1). La distribution la plus forte ($b=0$ jour) correspond à la distribution du débit de pointe maximal QIX à l'entrée du réservoir, les autres distributions étant relatives au débit QIX laminé par un réservoir linéaire pour différentes valeurs du paramètre b ($0,5 \leq b(j) \leq 10$). Pour un rapport de laminage décennal de 1.5 ($700/470$), un réservoir linéaire de paramètre b égal à 1 jour est nécessaire. Le volume du réservoir linéaire permettant d'atteindre l'objectif de laminage décennal (1.5) est donc d'environ 41 hm^3 d'après la formule d'évacuation (Eq. 1).

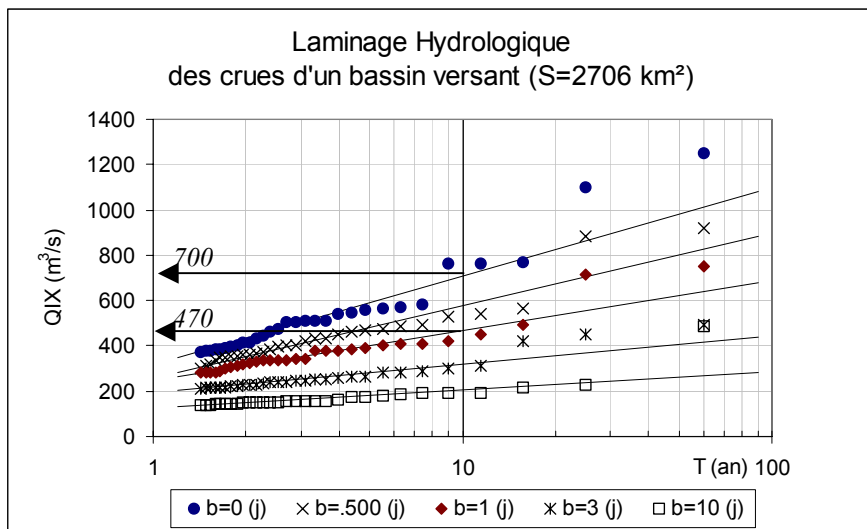


figure 22. Exemple de laminage hydrologique par un réservoir à vidange linéaire

Annexe D CONTENU D'UNE ÉTUDE D'ANALYSE DE RISQUES OU DE SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT D'UN AMÉNAGEMENT HYDRAULIQUE

Les préoccupations concernant la sécurité des ouvrages hydrauliques, et plus particulièrement des barrages, sont anciennes. Ainsi, en France, les procédures d'autorisation des ouvrages hydrauliques comportent une obligation de présenter les dispositions prises pour en assurer la sûreté. Pour les plus grands, les prescriptions liées à l'établissement des PPI (plans particuliers d'intervention) imposent l'étude d'un certain nombre d'aléas (crues, séismes, glissement de versant) et l'identification des conséquences d'une éventuelle rupture. Et plus généralement, pour l'ensemble des barrages intéressant la sécurité publique, la sûreté repose d'une part sur des règles strictes de dimensionnement matérialisées dans des guides techniques et d'autre part sur la surveillance et le contrôle qui font l'objet de dispositions précises régulièrement actualisées depuis plus de trente ans.

Cependant, le domaine de l'analyse des risques connaît actuellement de forts développements, sous l'impulsion notamment des pays nord-américains (USA et Canada) et nord-européens (Norvège, Suède, Pays-Bas). La présente annexe au chapitre 3.5 « analyse des risques de défaillance » se propose d'en faire le point, en indiquant les objectifs auxquels doit répondre une étude d'analyse de risques d'un aménagement hydraulique projeté (un ensemble d'ouvrages ou un ouvrage visant le ralentissement dynamique), ainsi que la démarche et les méthodes à mettre en œuvre pour les atteindre.

Compte tenu des développements en cours, cette annexe doit être considérée comme une première synthèse méthodologie, qui a vocation à s'enrichir au fur et à mesure des études qui seront réalisées. Par ailleurs, elle n'est donnée ici qu'à titres informatif et indicatif de la méthodologie disponible actuellement, sous sa forme la plus générale et la plus complète. Sous cette forme exhaustive, aucune étude relative à des ouvrages hydrauliques n'a encore été engagée en France. On pourra s'en inspirer pour l'adapter à l'étude éventuelle de cas concrets d'aménagements.

Dans cette optique, on mentionne ici deux points importants qui peuvent aider à la bonne mise en œuvre de la méthodologie et à la pertinence des résultats obtenus :

- L'analyse des études de sûreté réalisées (hors de nos frontières) fait apparaître des pratiques communes : travail d'équipe d'experts pluridisciplinaires, examen des principaux aléas (hydrologique, géotechnique et sismique), modélisation des scénarios de défaillance et de rupture, analyse quantitative par jugement d'experts. Ce retour d'expérience montre l'importance de **l'expertise collégiale pluridisciplinaire** pour ce type d'études.
- La philosophie générale d'une étude d'analyse de risque est bien de **se placer délibérément dans l'optique de la rupture** ou du dysfonctionnement grave d'un ouvrage (ou d'un aménagement), d'analyser toutes les façons imaginables d'y parvenir, puis de chercher comment œuvrer de manière optimale pour éviter cette circonstance. Cette approche n'est **à mettre en concurrence ni avec les méthodes de calcul de l'ouvrage** pour qu'il soit sûr **ni avec celles de contrôle de l'ouvrage** pour vérifier qu'il se comporte de manière sécuritaire.

D.1 OBJECTIFS ET PLAN GÉNÉRAL D'UNE ÉTUDE DE SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT

Une étude d'analyse de risques (ou de sûreté de fonctionnement) vise à évaluer la sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique et de ses composants annexes (ouvrages d'alimentation, de dérivation, etc.). Elle a pour objectif de répondre aux trois interrogations suivantes :

- quelles sont les situations de danger et quels scénarios peuvent-ils y conduire?
- quelles sont les probabilités pour que ces situations se produisent ?
- si elles se produisent, à quelles conséquences doit-on s'attendre ?

Les grandes lignes méthodologiques à mettre en œuvre dans une étude de sûreté de fonctionnement d'un aménagement hydraulique sont les suivantes (voir également l'organigramme donné figure 23 ci-après) :

- étape 1 : **l'analyse fonctionnelle** de l'ouvrage, par des méthodes spécifiques adaptées au génie civil.
- étape 2 : **la modélisation de la sûreté de fonctionnement** de l'ouvrage. Les principales méthodes de modélisation sont la méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets) et la méthode des Arbres d'Événements.
- étape 3 : **la mesure de la sûreté de fonctionnement** de l'ouvrage. Il s'agit là d'évaluer les probabilités de défaillance du système étudié. Généralement, elles sont obtenues par des mesures déclaratives issues de l'expertise et de la modélisation physique des mécanismes, couplées éventuellement à des modèles probabilistes.
- étape 4 : une **synthèse et conclusions**, comprenant les scénarios les plus critiques, les composants de l'ouvrage les plus vulnérables associés à une probabilité de défaillance, les conséquences des défaillances sur les personnes et les biens et les propositions visant à améliorer la sûreté de fonctionnement de l'aménagement projeté.

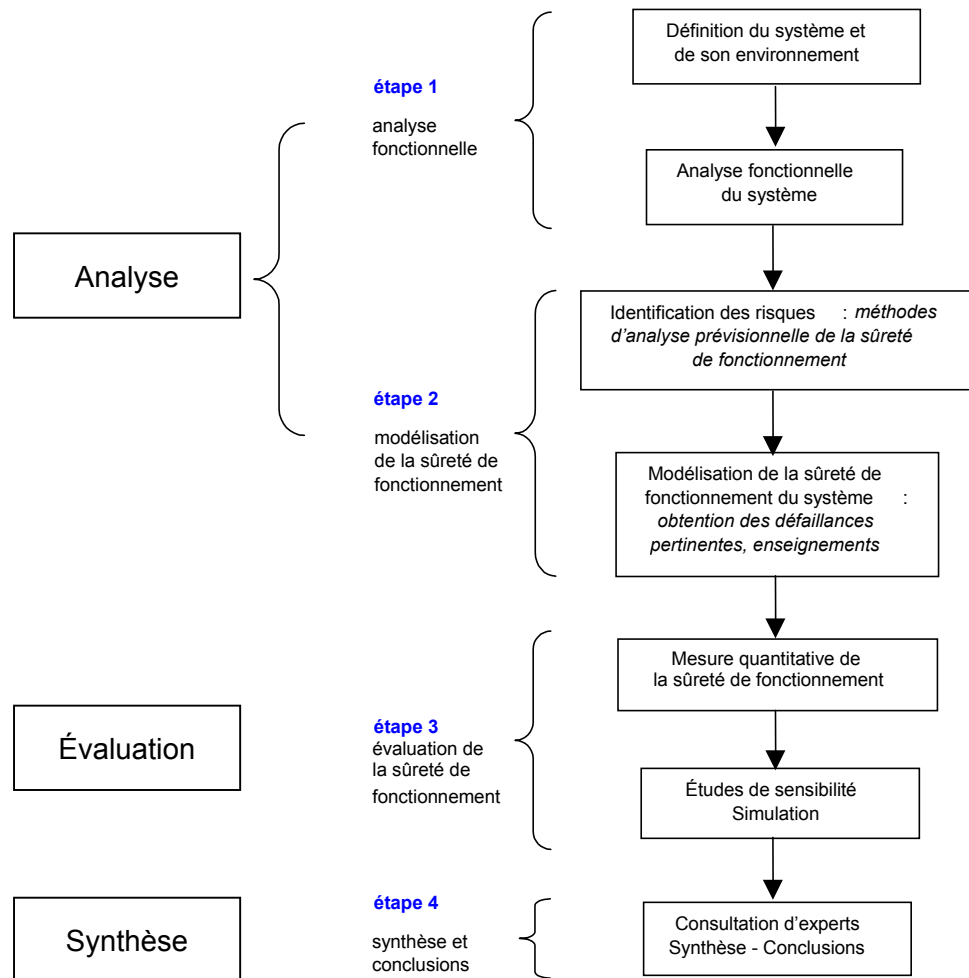


figure 23. Démarche générale de l'étude de sûreté de fonctionnement

Pour conduire une étude de sûreté de fonctionnement, un panel d'experts est constitué, dirigé par un animateur en sûreté de fonctionnement et regroupant des ingénieurs des différentes disciplines concernées (hydrologie, hydraulique, génie civil, mécanique des sols, etc.). Ce panel d'experts est sollicité aux différentes étapes de l'étude et plus particulièrement lors de l'évaluation des mesures quantitatives.

D.2 ANALYSE DES SITUATIONS DE DANGER (ÉTAPES 1 ET 2)

Il s'agit d'identifier les situations de danger et les scénarios pouvant conduire à ces situations de danger (ou événements indésirables) qui pourraient mettre en péril les personnes ou les biens : la rupture, le lâcher incontrôlé d'un volume d'eau important, la défaillance d'un élément de sécurité, etc.

L'ensemble des défaillances doit être étudié : défaillance de l'ouvrage, défaillance d'un de ses composants, défaillance d'un des équipements annexes ou de dérivation..., les aléas extérieurs (crue supérieure à la crue de projet, séismes, vandalisme...), l'erreur humaine...

Une description précise de chaque scénario doit être établie. Une représentation sous forme de successions d'événements conduisant à la situation de danger ou à l'événement final indésirable est le plus souvent proposée.

Les études de sûreté de fonctionnement sont conduites généralement à deux échelles spatiales. Tout d'abord, une analyse à l'échelle du bassin versant examine les interactions de l'aménagement hydraulique avec son environnement. Les résultats de cette première étape sont des scénarios « macroscopiques » à l'échelle de l'aménagement. Ensuite, une deuxième étape raffine l'analyse à l'échelle de l'aménagement proprement dit et recherche les défaillances au sein du système hydraulique, au niveau de chaque ouvrage constituant l'aménagement.

L'analyse des situations de danger débute par l'**analyse fonctionnelle des aménagements hydrauliques (étape 1)**. Par cette analyse, on recherche toutes les fonctions accomplies par l'ouvrage et ses composants, pour ensuite identifier leurs modes de défaillances, leurs causes et leurs effets. Elle comporte l'*analyse fonctionnelle externe* et l'*analyse fonctionnelle interne*.

L'analyse fonctionnelle externe s'intéresse aux interactions entre l'aménagement hydraulique et son environnement (cf figure 24 ci-après). Elle permet de déterminer les causes possibles des défaillances de l'aménagement liées aux éléments extérieurs : flux hydrauliques (transfert, dérivation, interaction...), sollicitations mécaniques (séisme, ...), erreur humaine, etc.

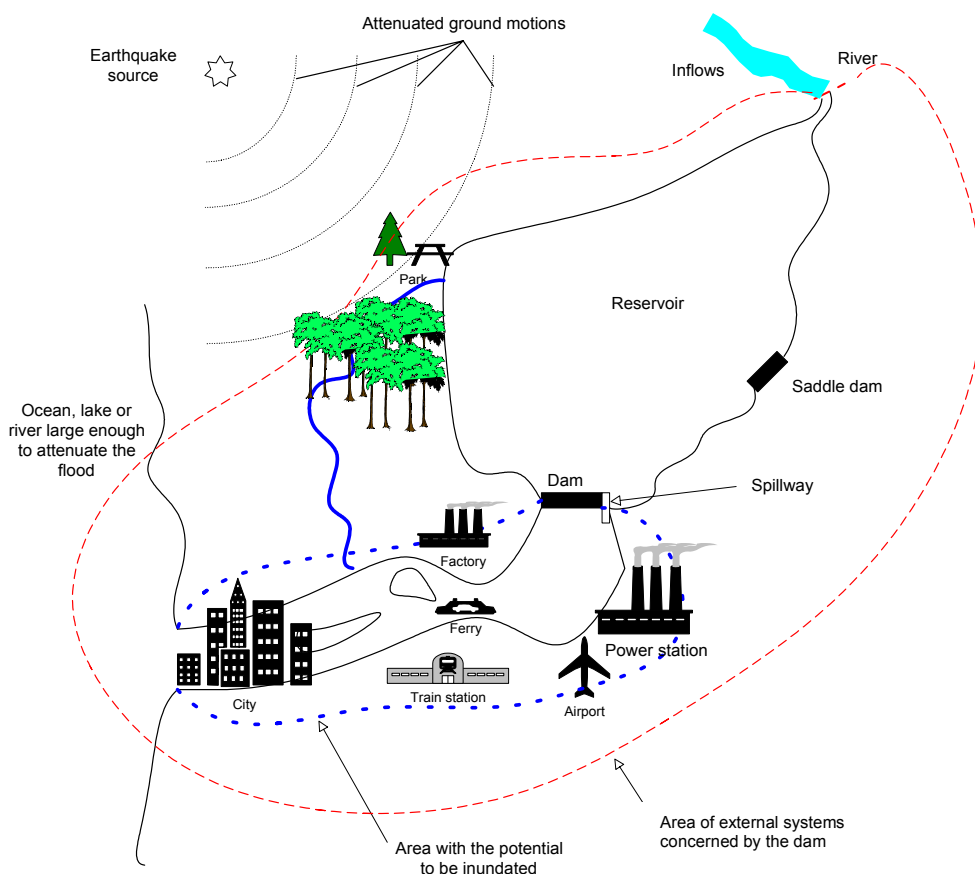


figure 24. Analyse fonctionnelle externe d'un barrage : exemple d'analyse de l'environnement [CEA, 2000]

Ensuite, l'analyse fonctionnelle interne recherche les défaillances au sein des ouvrages constituant l'aménagement hydraulique. Pour cela, une analyse structurale de chaque ouvrage est conduite et liste tous leurs composants constitutifs, repère leur position au sein des structures et détermine les interactions avec les autres composants.

Après l'analyse fonctionnelle, l'analyse des situations de danger se poursuit par la **modélisation de la sûreté de fonctionnement de l'aménagement hydraulique (étape 2)**. Deux principales techniques de modélisation de la Sûreté de Fonctionnement sont utilisées :

- La méthode AMDE (Analyse des Modes de Défaillances et de leurs Effets) permet de déterminer de façon structurée et exhaustive les informations sur les modes de défaillances possibles de l'aménagement : leurs causes, leurs effets et leurs symptômes.
- La méthode des Arbres d'Événements est mise en œuvre pour modéliser les différents scénarios conduisant aux défaillances du système : un scénario est constitué de séquences d'événements s'enchaînant à partir d'un événement initiateur jusqu'aux événements finaux (la défaillance, la rupture). La figure 25 illustre la modélisation de l'arbre d'événements correspondant au scénario de rupture d'un remblai en terre par renard hydraulique.

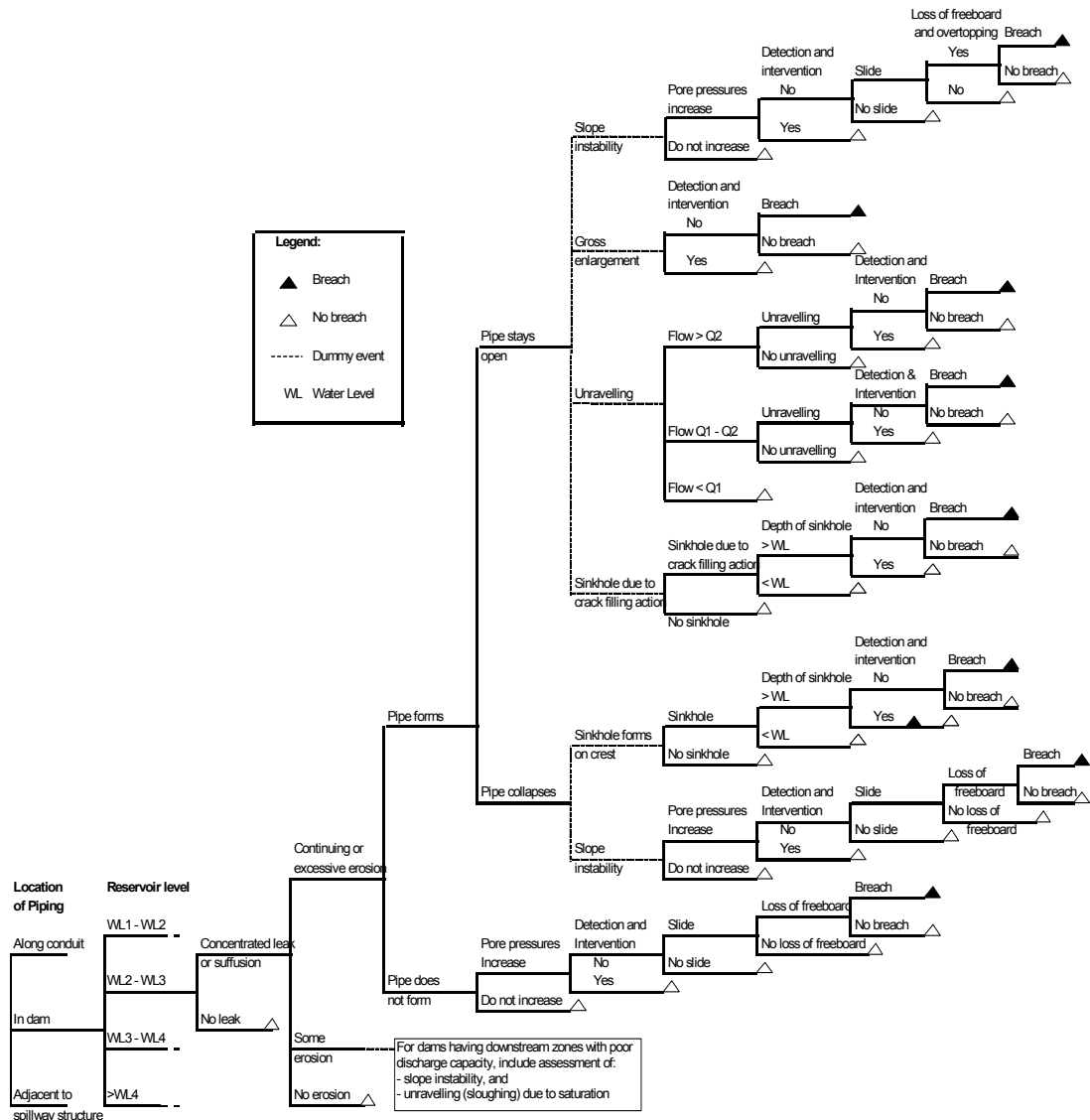


figure 25. la méthode de l'Arbre d'Evénements appliquée au scénario d'érosion interne [ICOLD, 2001]

Au final de la modélisation de la sûreté de fonctionnement, on dispose d'une analyse des possibilités de défaillance de l'aménagement hydraulique sous forme d'arbres d'événements en détaillant les différentes étapes successives.

D.3 EVALUATION DE LA SÛRETÉ DE FONCTIONNEMENT (ÉTAPE 3)

Il s'agit là d'évaluer la sûreté de fonctionnement, c'est-à-dire la probabilité d'occurrence des scénarios conduisant à une situation de danger.

L'expérience des études d'analyse de risques met en évidence la difficulté de mesurer la sûreté de fonctionnement des ouvrages hydrauliques et de leurs organes : mécanismes en

jeu divers et complexes, caractère unique de chaque ouvrage, informations sur les incidents et les défaillances pas nécessairement disponibles... Dans ces conditions, la sûreté de fonctionnement est évaluée au travers d'une approche probabiliste de l'occurrence des différents événements répertoriés (voir la figure 26 ci-après). Le travail d'évaluation des probabilités est réalisé dans le cadre d'équipes pluridisciplinaires constituées par des experts des domaines concernés et animées par un spécialiste de la Sûreté de Fonctionnement.

Les analyses quantitatives sont le plus souvent proposées à partir de la méthode des Arbres d'Evénements déjà citée. Les probabilités de transition associées à chaque séquence de l'arbre proviendront du jugement des experts et, lorsque le mécanisme étudié le permet, la probabilité d'occurrence de l'événement initiateur (P_1 au premier nœud de l'arbre) est obtenue à partir d'un modèle probabiliste de l'aléa (par exemple, la méthode du Gradex pour l'hydrologie). La probabilité totale associée au scénario résulte ensuite du calcul des probabilités rattachées à chaque événement de l'arbre. Ces probabilités d'occurrence de scénarios sont subjectives puisque les probabilités de chaque séquence sont souvent simplement estimées à dire d'expert.

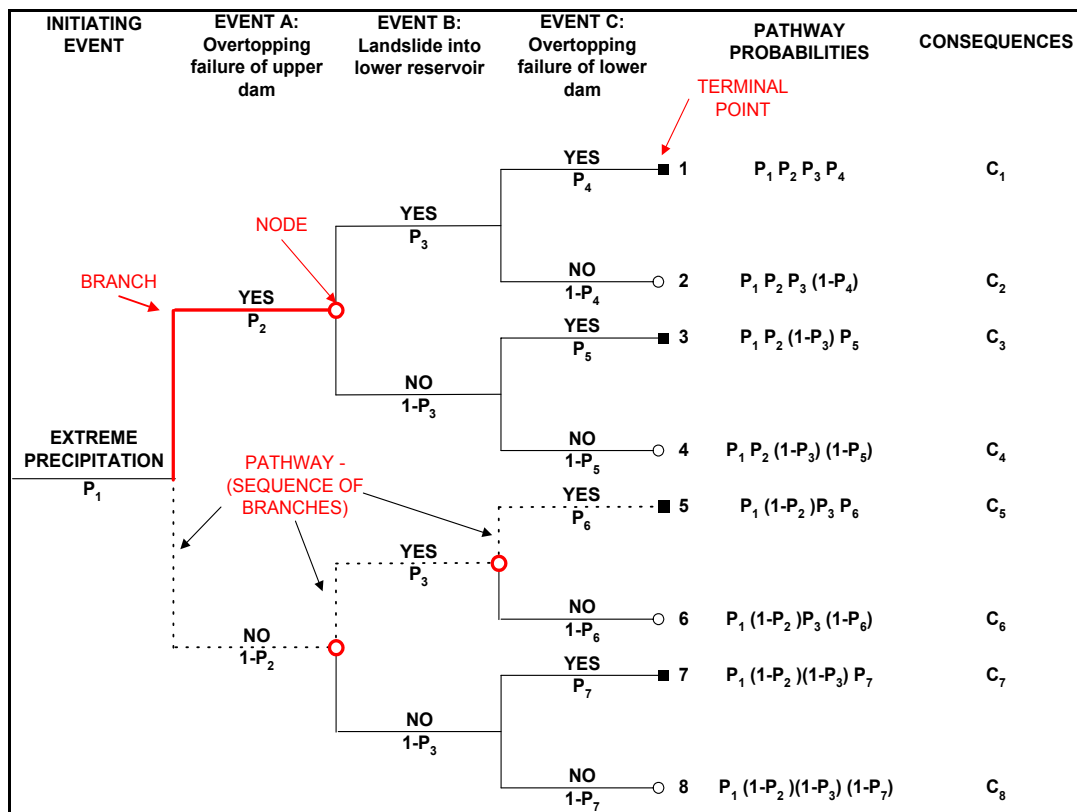


figure 26. Etape 3 : évaluation de la probabilité d'occurrence d'un scénario [ICOLD, 2001]

Enfin, l'analyse des conséquences de chacun des scénarios (C_1 à C_8 sur l'exemple ci-avant) peut être plus ou moins approfondie selon les besoins. Il est possible d'engager des études fines à partir de modèles hydrauliques (modèle d'onde d'effacement par exemple) afin d'apprécier les conséquences de la rupture d'un ouvrage hydraulique (zone submergée

ou inondée, population concernée, hauteur et vitesse de l'eau). On peut également se limiter à une analyse qualitative des conséquences sur les personnes et les biens.

Au final, ces analyses permettent de **hiérarchiser les risques** et d'évaluer la sûreté de fonctionnement de l'aménagement hydraulique. Elles déterminent les scénarios de rupture et les ouvrages les plus critiques, leurs organes et les ouvrages annexes les plus dangereux.

Toutefois, il est utopique de prétendre obtenir des mesures absolues de la sûreté de fonctionnement, compte tenu de la nécessaire implication de l'expertise dans l'analyse quantitative. Ainsi, les mesures peuvent être difficilement déplacées du contexte de l'aménagement hydraulique étudié, pour établir des comparaisons de risques avec d'autres ouvrages hydrauliques, voire d'autres risques industriels.

D.4 SYNTHÈSE ET CONCLUSIONS (ÉTAPE 4)

Une étude de sûreté de fonctionnement met en évidence les défaillances et leurs combinaisons qui compromettent la sécurité de l'aménagement hydraulique, ainsi que les ouvrages et leurs composants les plus critiques et les scénarios dans lesquels ils sont impliqués. Elle propose des techniques susceptibles d'améliorer la sûreté de fonctionnement de l'aménagement hydraulique.

Une étude de sûreté de fonctionnement permet de connaître les scénarios les plus critiques et les ouvrages et leurs composants les plus dangereux, là où les efforts d'amélioration doivent être portés en priorité. Elle permet de dégager des valeurs quantitatives de sûreté de fonctionnement (ou tout au moins des ordres de grandeur de celles-ci) et de conclure sur les probabilités de défaillance de l'aménagement hydraulique et les risques encourus par les personnes et les biens.

Elle permet d'améliorer la connaissance de l'aménagement et de ses ouvrages les plus faibles, afin de prioriser le cas échéant des programmes de travaux ou d'optimiser la maintenance (optimisation de la surveillance et des réparations). On peut aussi estimer un ordre de grandeur de l'amélioration quantitative de la sûreté, apportée par ces interventions.

On trouvera des éléments plus détaillés sur les études de sûreté de fonctionnement et les analyses de risques, notamment dédiées aux barrages, dans les références bibliographiques [CEA, 2000], [ICOLD, 2001], [Modarres, 1993], [Peyras, 2003], et [Villemeur, 1988].

COMPOSITION DU GROUPE DE TRAVAIL

Le guide a été réalisé à l'initiative du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (Direction de l'Eau, sous-direction de la protection et de la gestion des eaux, bureau de la prévention des inondations et du domaine public fluvial) par un groupe de travail placé sous la présidence de Jean Dunglas ; la rédaction, coordonnée par Bernard Chastan, a été confiée à un sous groupe comprenant également Michel Lang et Paul Royet.

- Jean Abèle CETMEF
- André Bachoc DIREN Franche-Comté
- Marcel Basso CETE Méditerranée
- Daniel Berthery Entente Oise-Aisne
- Bernard Chastan Cemagref, UR Hydrologie Hydraulique
- Gérard Degoutte Engref, Directeur Adjoint
- Patrick Deronzier MEDD, Direction des Etudes Economiques et de l'Evaluation Environnementale

- Jean Dunglas Président du groupe de travail
- Pierre-Yves Durand Grands Lacs de Seine
- Claire-Cécile Garnier MEDD, Direction de l'Eau
- Jean Gaber MEDD, DPPR
- Noël Godard MEDD, Direction de l'eau
- Philippe Huet MEDD, Inspection générale de l'environnement
- Michel Lang Cemagref, UR Hydrologie Hydraulique
- Xavier Martin MEDD, Inspection générale de l'environnement
- Philippe Orignac MEDD, Direction de l'eau
- Xavier Pin Conseil Général du GREF
- Paul Royet Cemagref, UR Ouvrages Hydrauliques
- Jean-Louis Rizzoli Grands Lacs de Seine
- Guy Rouas EPAMA
- Jean-Luc Roy Etablissement Public Loire
- Yves Le Trionnaire MEDD, Direction de l'Eau

Outre les contributions écrites et relectures des membres du groupe de travail, le guide a bénéficié du concours de nombreux contributeurs externes, notamment du Cemagref (Lyon et Aix en Provence), du CETMEF et du CETE Méditerranée

