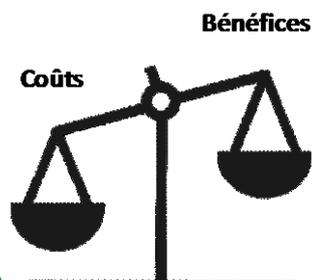


Dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage par les dommages incrémentaux ou différentiels :

Recommandations pour la mise en œuvre d'une méthode applicable aux barrages en France



Recommandations provisoires
octobre 2017



Edition Cfbr - 2017

www.barrages-cfbr.eu

Recommandations pour la justification de la stabilité des barrages poids

Recommendations for the justification of the stability of gravity dams

ISBN 979-10-96371-05-1 – dépôt légal 4^{ème} trimestre 2017



Cette œuvre est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale – Pas de Modification 3.0 France. Pour accéder à une copie de cette licence, merci de vous rendre à l'adresse suivante <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr>.

En couverture : Evacuateur de crue, Barrage de Chardes

© EDF

Dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage par les dommages *incrémentaux* ou *différentiels* :

Recommandations pour la mise en œuvre d'une méthode applicable aux barrages en France

Recommandations provisoires

Version Finale – Octobre 2017

Approuvée par la Commission Exécutive du CFBR du 13/10/2017

Avertissement

Les présentes recommandations sont issues des travaux d'un Groupe de Travail (GT) du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR), menés de septembre 2013 à décembre 2016. Elles ne préjugent pas des décisions que l'Administration Française pourra adopter dans le cadre de l'application de la réglementation actuelle ou à venir.

La présente version de guide constitue des recommandations provisoires du CFBR. La profession est à ce titre invitée à tester et utiliser ces recommandations. Le CFBR prévoit, dans un délai de quelques années (3 à 5 ans en général), et sur la base du retour d'expérience et de la pratique de la profession, de transformer ce guide en recommandations définitives du CFBR.

Mots-clés

Évacuateurs de crue, sûreté, risques, dommages, incrément, analyse coûts-bénéfices (ACB)

Résumé

Fin 2013, le Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) a lancé un nouveau Groupe de Travail (GT) avec pour objectif de développer et, si possible, tester une méthode transposant le concept des « dommages incrémentaux » dans le contexte Français pour le dimensionnement ou la vérification des évacuateurs de crue de barrages. Le présent guide de recommandations constitue la proposition méthodologique traduisant concrètement cet objectif. La méthode repose sur la comparaison de deux situations de dimensionnement (D_0 : dimensionnement actuel ; D_{reg} : dimensionnement de mise en conformité à des critères de référence), et sur le comptage différentiel, intégré sur l'échelle de probabilité, des dommages entre ces deux situations. Cela a conduit le CFBR à introduire le vocable de dommages « *différentiels* » pour décrire cette méthode. Les principales étapes méthodologiques sont décrites, en insistant sur la référence à des guides, référentiels ou pratiques déjà existants, notamment en matière d'analyses coûts-bénéfices et d'évaluation de la proportionnalité des coûts. Trois études pilotes ont permis de tester les options méthodologiques et d'en démontrer le caractère opératoire. Les bases de possibles critères d'acceptabilité, permettant de démontrer le caractère proportionné ou disproportionné d'un investissement au regard du gain en sûreté réellement apporté, sont posées. La profession est invitée à s'approprier, tester et éprouver ces recommandations sur d'autres cas d'application. Le CFBR prévoit dans quelques années (3 à 4 ans), et sur la base du retour d'expériences et de la pratique de la profession, de transformer ce guide en recommandations définitives.

Abstract

At the end of 2013, the French Committee on Dams and Reservoirs (CFBR or French-COLD) launched a new Working Group (WG) with the objective of developing an incremental damage-based analysis framework for the safe design of dam spillways in France, and testing the method on real-life cases if possible. Present guidelines gather the results of this WG through the proposition of recommendations and methodological steps. The method is based on the comparison between two dam spillway design configurations (D_0 : present design ; D_{reg} : updated design in compliance with new criteria), and on differential accounting of damages between these two design conditions, covering the full range of flood occurrence probability. The main steps of the methods are described, with an emphasis on the use of pre-existing guidelines and state-of-the-art practice, specifically on cost-benefit analysis approaches in a safety context. Three pilot case studies have been performed to test the applicability of the method, and the conclusions are drawn in the present guide as well. Some possible acceptability / tolerability criteria have been advanced, that would reflect the balance or unbalance between spillway upgrade investment costs on one hand, versus real gain on safety conditions on the other hand. The profession is invited to practice and use these guidelines, and to test the method on other real-life case studies. CFBR plans to get lessons learned from an extended practice, before issuing an update of the present guidelines in a revised version in the next few years.

Termes de Référence fixés par la Commission Exécutive du CFBR (Mars 2013)

Le document « *Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crue de barrages* » publié par le CFBR en juin 2013, introduit dans son chapitre 5.6 l'approche par les « dommages incrémentaux ». Cette approche vise à déterminer, par une méthode prenant en considération les risques à l'aval, un niveau de situation extrême, en-deçà duquel les conditions de stabilité ultime du barrage devront être justifiées. Ce niveau est déterminé en examinant, pour différentes situations hydrologiques (crues), l'aggravation ou ***l'incrément des dommages*** associé à une rupture du barrage considéré (à l'aval voire aussi à l'amont le cas échéant), par rapport au cas sans rupture de l'ouvrage.

Au niveau international, plusieurs guides de dimensionnement ou de recommandations font référence à ce type d'approche (principalement aux Etats-Unis, au Canada, en Australie, ...). Au Québec, la méthode est partie intégrante de la loi et du règlement sur la sécurité des barrages depuis 2002, qui fixent un cadre d'application spécifique à la détermination d'une « crue de sécurité » pour chaque barrage. Ce cadre méthodologique a été récemment révisé en 2011-2012 sur certains points essentiels de la méthode jugés insatisfaisants (en particulier la sélection de la « crue de sécurité » retenue *in fine* en fonction des dommages incrémentaux maxima déterminés).

La transposition de cette approche au contexte français soulève des questions de fond, du fait de la typologie des ouvrages concernés et du mode d'occupation du territoire (densité de population, vulnérabilités particulières, ...). Le CFBR souhaite donc compléter les travaux du GT sur le dimensionnement des évacuateurs de crues de barrages, par le lancement d'un GT spécifique à la méthode des dommages incrémentaux. L'objectif de ce GT sera d'évaluer la faisabilité d'une telle transposition au contexte français, et de proposer un cadre méthodologique précis sur les étapes clés de la méthode.

Le GT approfondira en particulier les points méthodologiques suivants, d'ores et déjà identifiés par le GT « crue » comme soulevant des questions de fond :

- Hypothèses de rupture en crue des barrages :
 - Géométrie et cinétique de formation des brèches, en fonction des types de barrage (remblai, béton) et des modes de défaillance envisagés ;
 - Conditions hydrauliques associées à la rupture : cote au barrage, calculs de l'hydrogramme de rupture, effet de noyage aval, ... ;
 - Comportement des barrages et autres ouvrages (ponts, digues, ...) situés à l'aval du barrage considéré ;
 - Cas de plusieurs barrages ceinturant le même réservoir.
- Détermination de l'incrément d'aléa d'inondation imputable, lors d'un épisode de crue, à la seule rupture du barrage :
 - Conditions de fonctionnement de l'organe d'évacuation des crues ;
 - Conditions hydrologiques de référence pour la détermination de l'aléa inondation sans rupture ;
 - Evaluation de l'aléa, et de l'incrément d'aléa induit par la rupture, en termes de hauteur d'eau, et le cas échéant de vitesse de l'écoulement (cf. référentiels PPRI) ;
 - Modélisation hydraulique requise : processus physiques à représenter, précision attendue, ... ;
 - Seuils de prise en compte de l'aléa et de l'incrément d'aléa.
- Détermination et typologie des dommages subis par cet incrément d'inondation et sa gradation :
 - Typologie des zones du territoire affectées par l'aléa et l'incrément d'aléa ;
 - Sensibilité de certaines vulnérabilités du territoire à des seuils d'incrément d'aléa ;
 - Méthode de comptabilisation des dommages incrémentaux.

- In fine, détermination des critères de dimensionnement en situations extrêmes des évacuateurs de crues en fonction des niveaux de dommages incrémentaux caractérisés pour les différents scénarios hydrologiques.

Les membres du GT devront veiller, à travers les propositions méthodologiques qui seront élaborées sur les étapes clés de l'approche, à rechercher une cohérence avec les référentiels de pratiques existantes, en particulier celles résultant des recommandations du CFBR publiées en 2013, celles relatives aux études PPI, aux Etudes de Dangers (EDD) et aux Plans de Prévention du Risque d'Inondation (PPRI). Ces propositions méthodologiques devront couvrir les différents types de comportements hydrauliques de barrages (capacitif vs barrages mobiles en rivières).

Le GT appréciera le besoin d'applications sur des ouvrages et vallées pilotes pour tester et conforter les options méthodologiques qui seront discutées et élaborées.

La forme des livrables et le calendrier de production des livrables intermédiaires et du document de synthèse du GT seront précisés par la Commission Exécutive du CFBR.

Composition du Groupe de Travail CFBR « Dommages incrémentaux »

Ce guide a été élaboré par un groupe de travail (GT) du Comité Français des Barrages et Réservoirs (CFBR) qui a mené cette tâche de septembre 2013 à décembre 2016, et à travers 12 réunions plénières, de nombreuses réunions de travail en sous-groupes, de nombreuses heures de travail personnel des membres du GT à titre bénévole, et un séminaire de deux jours avec des experts (notamment) économistes externes au GT (en mai 2016).

Le groupe, volontairement compact, était composé de personnalités désignées en fonction de leurs compétences et expériences dans le domaine de la sûreté des barrages, du dimensionnement des évacuateurs de crues, des ruptures de barrages, et de l'évaluation des risques d'inondation en lien avec les politiques de gestion du risque inondation sur le territoire français :

Thomas ADELINÉ	ISL ingénierie et Consultant
Denis AELBRECHT – pilote et animateur	EDF
Benoît BLANCHER – secrétaire	EDF
Claudio CARVAJAL	IRSTEA
Etienne FROSSARD puis Didier MAZEL	Tractebel Engineering
Claude GUILBAUD	ARTELIA
Patrick LE DELLIOU	ex. BETCGB, désormais CTPBOH
Jacques de SAINT-SEINE	CNR
David OUF	CNR

Ont également contribué partiellement à ce groupe de travail :

Ahmed KHALADI	CNR
Vincent LEFEBVRE	ex. ARTELIA

Remerciements

Le pilote du GT (D. Aelbrecht) tient à remercier l'ensemble des membres du GT pour leur contribution et leur implication tout au long des 3 années de travaux du GT. Les réflexions ont abouti à des résultats concrets, avec mise en œuvre de plusieurs études pilotes produisant des résultats et des conclusions au-delà des attentes fixées initialement par la Commission Exécutive du CFBR. Cela n'aurait pas été possible sans un engagement marqué, un goût pour l'innovation et une réelle volonté d'aboutir, sur un sujet nouveau réputé difficile, complexe et notoirement multi-métiers.

Nous remercions également le CFBR pour son soutien logistique continu, en particulier de la part d'Isabelle DEJUSSEL (Assistante).

SOMMAIRE

1. Introduction : motivations de la démarche du CFBR.....	12
1.1. Recommandations CFBR 2013.....	12
1.2. Introduction générale au concept des approches incrémentales.....	12
1.3. Perspective d'évolution réglementaire.....	13
1.4. Objectifs et limites des recommandations.....	14
1.5. Démarches voisines.....	15
2. Cadre méthodologique d'ensemble	16
2.1. Principes directeurs de la méthode.....	16
2.2. Séquence méthodologique globale.....	17
3. Collecte des données nécessaires (Etape A).....	18
3.1. Données hydrologiques et hydrauliques.....	18
3.2. Données concernant le barrage de retenue.....	18
3.3. Données liées aux enjeux et vulnérabilités du territoire.....	18
3.3.1 Les enjeux humains à considérer.....	18
3.3.2 Les enjeux matériels relatifs aux biens et aux activités.....	19
3.3.3 Les dispositifs de prévention des crues.....	20
3.4. Approche sommaire pour évaluer l'opportunité d'une approche incrémentale.....	20
4. Simulation des scénarios de rupture et non rupture.....	23
4.1. Définition des hypothèses de rupture en crue des ouvrages (Etape B).....	23
4.1.1 Mécanisme de rupture du barrage.....	23
4.1.2 Conditions hydrauliques associées à la rupture.....	24
4.1.3 Comportement des ouvrages situés à l'aval.....	24
4.1.4 Cas de plusieurs barrages ceinturant le même réservoir.....	25
4.2. Définition des scénarios hydrologiques de référence (Etape C).....	25
4.3. Probabilisation des scénarios de rupture (Etape D1).....	25
4.4. Modélisation hydraulique des scénarios d'inondation, sans et avec rupture (Etape D2).....	26
5. Détermination des dommages aux personnes (Etape D3).....	29
5.1. Périmètre géographique de comptabilisation : périmètre de base, périmètre réduit. Evolution dans le temps.....	29
5.2. Principes de l'évaluation des dommages aux personnes.....	30
5.3. Estimation des dangers pour les personnes.....	31
6. Détermination des dommages aux biens (Etape D4).....	34
6.1. Périmètre typologique et géographique de comptabilisation : périmètres de base et réduit. Evolution dans le temps.....	34
6.2. Principes de l'évaluation économique des dommages aux biens.....	35
6.3. Calculs (économiques) des dommages aux biens.....	37
6.4. Cohérence avec les outils de gestion territoriale du risque inondation.....	37
7. Critères d'acceptabilité (Etapas D5 et D6).....	39
7.1. Critères pour les dommages aux personnes : étape D5 et critère(s) associé(s).....	39
7.2. Critères pour les dommages aux biens : étape D6 et critère(s) associés.....	41
8. Applications sur des études pilotes et enseignements.....	42

8.1. Concernant les critères de dommages aux biens (DEMA, ...)	42
8.2. Concernant les critères de dommages aux personnes (NEMA, ...)	45
8.3. Critères de proportionnalité	48
8.3.1 Ratios de proportionnalité R1 et R2 (cf. option 3)	48
8.3.2 Ratio DEM A / DEM A*	49
8.3.3 Ratio B / C	50
8.4. Valorisation de l'alerte	50
8.5. Scénarios nocturne / diurne	51
8.6. Intérêt d'une étude de sensibilité	52
9. Conclusions	53
10. Références	55
11. Terminologie – Glossaire	57
12. Annexe : questions débattues avec des experts économistes externes	61

Liste des Figures

Figure 1 – Séquence méthodologique d'ensemble	17
Figure 2 – Illustration schématique des modèles de probabilité conditionnelle de rupture en période de crue (modèles discret et continu)	26
Figure 3 – Exemple de modèle 1D filaire avec niveau d'eau et vitesse dans un profil en travers	27
Figure 4 – Exemple de modèle 1D à casier avec niveau d'eau et volume dans un casier.....	27
Figure 5 - Modèle 2D avec champs de vitesse	28
Figure 6 – Exemple de cartographie de la frange incrémentale en plan (zone orange foncé entourant la zone orange clair), dans laquelle l'approche Québécoise restreint l'évaluation des incréments de dommages.....	29
Figure 7 – Evaluation des dommages aux personnes pour chaque période de retour des crues, et détermination du NEMA.....	31
Figure 8 – Evaluation des dommages aux biens pour chaque période de retour des crues et détermination du DEMA.....	36
Figure 9 – Exemple de rendu cartographique (ISL, d'après étude de cas).....	38
Figure 10 – Exemples de courbes de tolérabilité – tirées de [12], [16], [17].....	40
Figure 11 – Etude pilote n°1 : estimation des dommages aux biens pour chaque scénario simulé, et du DEMA (en vert : D_reg ; en rouge : D0 ; en bleu : delta entre D0 et D_reg)	42
Figure 12 – Etude pilote n°2 : estimation des dommages aux biens pour chaque scénario simulé, et du DEMA (en vert : D_reg ; en rouge : D0 ; en bleu : delta entre D0 et D_reg)	43
Figure 13 – Etude pilote n°3 : estimation des dommages aux biens pour chaque scénario simulé, et du DEMA (en vert : D_reg ; en rouge : D0 ; en bleu : delta entre D0 et D_reg)	43
Figure 14 – Exemple d'évolution de la V.A.N. en fonction du temps pour l'étude pilote 3.....	44
Figure 15 – Estimation des victimes et incréments de victimes pour chaque scénario simulé des 3 études pilotes (condition nocturne) - en vert : D_reg ; en rouge : D0 ; en bleu : delta entre D0 et D_reg.....	47
Figure 16 – Synthèse des résultats de comptabilisation des dommages aux personnes des 3 études pilotes dans un repère F- Δ N	48
Figure 17 – Sensibilité de l'évaluation des dommages aux personnes selon méthode Flood Risk-to-People aux paramètres nocturne/diurne et sans/avec alerte, illustrée pour l'étude pilote 3 dans un repère F- Δ N.....	51
Figure 18 – Etude pilote 2 : sensibilité du coût proportionné d'un nouvel EVC à différents paramètres	52

Liste des Tableaux

Tableau 1 – Valeurs du facteur de débris Fd.....	32
Tableau 2 – Tableau de détermination du facteur Z (zone de danger).....	33
Tableau 3 – Exemple de présentation des dommages pour un barrage dans son état actuel (étude pilote 2)	37
Tableau 4 – Synthèse des évaluations des DEMA et des VAN à 50 ans pour les 3 études pilotes	44
Tableau 5 – Synthèse des évaluations des NEMA pour les 3 études pilotes	45
Tableau 6 – Synthèse des évaluations des VAN sans et avec intégration de la VVS.....	46
Tableau 7 – Evaluations des ratios de proportionnalité R1 et R2 pour les 3 études pilotes	48
Tableau 8 – Evaluations du ratio DEMA (sans VVS) / DEMA* pour les 3 études pilotes	49
Tableau 9 – Evaluations du ratio DEMA (avec VVS) / DEMA* pour les 3 études pilotes.....	49
Tableau 10 – Evaluations du ratio B / C pour les 3 études pilotes (sans et avec inclusion de la VVS).....	50
Tableau 11 – Evaluations des NEMA avec prise en compte de l'alerte pour les 3 études pilotes.....	50

1. Introduction : motivations de la démarche du CFBR

1.1. Recommandations CFBR 2013

Le CFBR a publié en juin 2013 des recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crues [1]. Ces recommandations proposent notamment, pour le contexte français, des critères de dimensionnement vis-à-vis :

- des situations exceptionnelles pour lesquelles la cote de retenue atteint la cote des plus hautes eaux (PHE) ;
- des situations dites *extrêmes* pour lesquelles la cote de retenue ne dépasse pas les conditions (cote) de danger, en tenant compte des risques de dysfonctionnement de l'évacuateur de crues.

Si le premier type de justification est classique pour les barrages français (crue de projet, notion anglo-saxonne de « design flood »), le deuxième est moins courant et rejoint la notion anglo-saxonne de « safety check flood » (crue de vérification de sûreté) dans les cas où il n'y a pas de dysfonctionnement des évacuateurs de crues. La probabilité annuelle associée aux événements permettant à la cote de retenue d'atteindre la cote de danger est fixée pour les barrages des classes A et B [2], respectivement à 10^{-5} et 3.10^{-5} . Les recommandations proposent d'estimer la crue de probabilité annuelle 10^{-5} (de période de retour 100 000 ans) en majorant la crue décennale par un coefficient multiplicateur sur les débits de l'ordre de 1,3, et d'estimer la crue de probabilité annuelle 3.10^{-5} (de période de retour 33 000 ans) en majorant cette même crue décennale par un coefficient multiplicateur sur les débits de l'ordre de 1,15.

On note d'ailleurs que certains pays associent les crues de vérification de sûreté à des crues de type CMP (crue maximale probable), généralement au-delà des crues envisagées par les recommandations du CFBR.

En outre, un des paramètres clés de la vérification de sûreté est la cote de danger du barrage qui est définie par les recommandations comme la cote au-delà de laquelle on ne sait plus garantir la stabilité de l'ouvrage. La détermination ou l'estimation de cette cote est une étape délicate mais fondamentale. A défaut de pouvoir établir cette cote de danger, il est équivalent de vérifier que la stabilité de l'ouvrage est garantie dans les situations de crues extrêmes. Les recommandations de 2013 insistent en outre sur la qualité indispensable des études hydrologiques.

Le chapitre 5.6 des recommandations du CFBR expose une méthode de détermination des crues de dimensionnement, par la méthode des dommages incrémentaux directement inspirée de la réglementation québécoise [3] et [4]. Ce chapitre encourage le CFBR à poursuivre ses réflexions sur ce type de méthode, et les présentes recommandations concrétisent cette proposition.

1.2. Introduction générale au concept des approches incrémentales

Les conséquences d'une rupture de barrage peuvent être évaluées de deux façons différentes :

- en ne tenant pas compte des éventuels effets directs du phénomène (naturel) initiateur. Les conséquences imputées à la rupture du barrage sont évaluées sur l'ensemble du périmètre de l'onde de submersion. Dans certains cas, les effets directs du phénomène initiateur sont nuls (par exemple, en cas de rupture d'un barrage en remblai sur fond « sec » sous l'effet de l'érosion interne, la totalité des conséquences sont imputables à la rupture proprement dite) ;
- en tenant compte du fait que le phénomène (naturel) initiant la rupture du barrage est susceptible à lui seul de provoquer des dommages significatifs en aval du barrage (inondations). On ne comptabilise dans ce cas que la différence entre les conséquences avec la rupture du barrage et les conséquences sans la rupture du barrage. Dans ce cas, on raisonne sur des *incréments* ou des *différences de dommages* (imputables à la rupture) et

non sur la globalité des dommages (qui comptabilisent à la fois les effets induits par la rupture et les effets directs de l'initiateur, ici la crue naturelle).

La méthode **incrémentale** ou **différentielle** adopte le deuxième point de vue ; elle renvoie à des notions de responsabilité du maître d'ouvrage (qui inversement ne pourrait être tenu pour responsable de l'existence même d'une crue de très grande période de retour).

La méthode incrémentale constitue ainsi un champ particulier parmi l'ensemble des approches de dimensionnement par les risques (approches dites « *risk-based* » en termes anglo-saxons), cherchant à adapter les exigences de dimensionnement pour la sûreté au niveau des risques (incrémentaux ou non) effectivement encourus. Ces approches « *risk-based* » se distinguent ainsi des approches normatives historiques, qui fixent usuellement des critères de dimensionnement, en général adaptés aux caractéristiques des ouvrages, mais indépendamment des risques encourus.

Le GT-CFBR mentionne à ce titre une publication intéressante très récente (2016) de l'ASDSO [22], dans laquelle l'Autorité de contrôle de l'état du Montana aux USA dresse un bilan de presque trente années d'utilisation des approches « *risk-based* » pour la vérification et le re-dimensionnement des évacuateurs de crue de barrages dans cet état, notamment en conditionnant le niveau d'exigences au niveau d'acceptation du risque pour les vies humaines (« *Loss-of-Life* » ou *LOL*).

1.3. Perspective d'évolution réglementaire

Depuis quelques années, les pouvoirs publics travaillent à une possible évolution de la réglementation qui s'agissant des crues, pourrait s'inspirer des recommandations du CFBR citées au §. 1.1 en modulant les deux types de critères (vérification au niveau des PHE et vérification à la cote de danger) en fonction de la classe du barrage. On rappelle que la classe du barrage, définie par l'article R214-112 du code de l'environnement, est fixée à partir de critères géométriques (la hauteur H du barrage et le volume V de la retenue) sans faire appel directement au risque aval, sauf, si nécessaire et au cas par cas, pour réviser le classement d'un barrage. Dans le contexte français, le critère global en $H^2.V^{1/2}$ qui intervient dans la définition des classes, est considéré comme représentatif de la dangerosité moyenne de l'ouvrage.

Parallèlement, les études de dangers exigées au titre des articles R214-115 et R214-116 du même code pour les barrages des classes A et B précisent les risques (au sens de la probabilité des scénarios et de leurs conséquences, notamment vis-à-vis des avalisants) ; toutefois la réglementation ne définit pas à ce jour des critères d'acceptabilité des risques.

Cette perspective d'évolution réglementaire, au-delà de nouveaux critères et exigences de référence à vérifier pour le dimensionnement des ouvrages, laisse entrevoir la possibilité de dispositions dérogatoires permettant de moduler le niveau d'exigences de dimensionnement des évacuateurs de crue, comme suggéré par le guide CFBR de juin 2013. Cette possibilité serait ouverte dès lors qu'il serait montré que la mise en conformité nécessite des travaux disproportionnés par rapport aux gains prévisibles en matière de sécurité et que les enjeux exposés à l'aval, susceptibles d'être mis en danger en cas de rupture de l'ouvrage, sont suffisamment réduits,

Cette possibilité a orienté fortement les axes de réflexion pris en considération par les présentes recommandations :

- comparaison d'une situation existante à une situation de conformité réglementaire ;
- intérêt d'une approche socio-économique intégrant les coûts pour le responsable de l'ouvrage (mais aussi pour la collectivité) et les bénéfices en termes de sécurité publique (mais aussi, le cas échéant, pour l'exploitation du barrage) ;
- notion de « proportionnalité », ou de « disproportionnalité », des coûts de mise en conformité ;
- notion de « gains prévisibles » (certaines évolutions de l'aménagement et de l'occupation du territoire ne peuvent être anticipées et une réflexion sur la maîtrise de ces évolutions et la fréquence de mise à jour des études semble nécessaire) ;
- notion de risques résiduels admissibles ;
- valorisation de l'alerte.

1.4. Objectifs et limites des recommandations

Les présentes recommandations fournissent un cadre méthodologique de modulation des exigences de dimensionnement des évacuateurs de crues, inspiré de la possibilité d'un recours à de possibles dispositions dérogatoires qu'une éventuelle future évolution réglementaire pourrait induire. Elles proposent des éléments méthodologiques de l'étude comparative entre la capacité des évacuateurs de crues d'un barrage existant (qu'on désignera par la suite dimensionnement D_0) et celle respectant de critères de référence existants ou futurs (dimensionnement D_{reg}).

Les présentes recommandations traduisent ainsi en termes concrets une « équation de la sûreté », cherchant à mesurer l'équilibre - ou la disproportion - entre (i) le coût/l'effort d'un renforcement du dimensionnement des ouvrages d'évacuation des crues d'une part, et (ii) le gain effectif obtenu en matière de sûreté pour les biens et les personnes d'autre part (i.e. le bénéfice).

En revanche, bien que nécessaire par ailleurs, le guide ne traite pas d'une autre « équation » qui traduirait l'équilibre financier - ou le déséquilibre – du bilan économique d'un aménagement (au regard des recettes qu'il génère par son activité économique) du fait d'exigences nouvelles.

Par ailleurs, les restrictions d'emploi de la méthode sont les suivantes :

- l'approche développée dans le présent guide ne couvrent que les cas de dimensionnement vis-à-vis des crues ;
- ne sont pas a priori pris en compte les cas pour lesquels le sous-dimensionnement résulte uniquement d'une insuffisance en situation de crue exceptionnelle (aux PHE), ce qui signifie que, en première intention, les présentes recommandations visent à traiter la justification éventuelle d'une insuffisance vis-à-vis des situations extrêmes (dépassement de la cote de danger). L'approche s'intéresse aux différentiels de dommages dus à la rupture du barrage, ce qui est associé à un dépassement d'état-limite ultime ; or un sous-dimensionnement aux PHE sans dépassement de la cote de danger ne conduirait pas à un dépassement d'état-limite ultime. A noter que pour un certain nombre d'ouvrages, une mise en conformité en situation extrême permet de résoudre aussi un sous-dimensionnement éventuel en situation exceptionnelle (cf. critère PHE) ;
- ne sont pas couverts par la méthode les cas pour lesquels les évacuateurs de crues fonctionnant de façon nominale sont suffisamment dimensionnés mais où le critère d'atteinte de la cote de danger suppose un dysfonctionnement des évacuateurs de crues avec un niveau de probabilité jugé trop important (cf. [1]). Dans ce cas, une fiabilisation des évacuateurs de crues est recommandée.

Les recommandations proposent une méthode de démonstration, des critères de jugement mais ne présupposent pas, à ce stade, de leur acceptabilité au niveau ministériel ; ce dernier point pourra être précisé en fonction des suites qui seront données aux éventuelles demandes de dérogation, notamment en fonction des avis que pourrait être amené à donner le CTPBOH.

De même, la question de la communication publique des résultats des études des dommages incrémentaux (position et cohérence avec les documents administratifs liés aux risques d'inondation) et des décisions de dérogation éventuelles est hors du champ traité par les présentes recommandations.

En outre et bien que les recommandations soient rédigées dans la perspective de dispositions dérogatoires à de possibles futures exigences réglementaires non encore établies à ce jour, la méthodologie développée ici peut être tout à fait utilisée dans le cadre de la comparaison entre deux solutions de dimensionnement d'évacuateurs de crues. De ce fait, l'intérêt intrinsèque des présentes recommandations demeure quelle que soit l'évolution réglementaire à venir.

Le groupe de travail insiste également sur la quantité et surtout la qualité des données qui sont nécessaires, sur le caractère itératif de la méthode (intérêt d'une première approche enveloppe sommaire avant de lancer des études plus détaillées) et sur le coût non négligeable de telles études. Bien qu'elle soit ouverte à tout type d'aménagement, elle paraît plus directement destinée aux cas où le volume libéré par la rupture éventuelle du barrage est relativement faible par rapport à celui des

crues envisagées ; on pense en particulier au cas des barrages mobiles en rivière (ou fleuve) peu capacitifs.

Enfin, le groupe de travail insiste sur les précautions nécessaires relatives à l'utilisation des cartographies d'inondation et d'incrément d'inondation produites dans le cadre des études. Il s'agit d'objets d'étude et non des outils à valeur administrative ou réglementaire.

1.5. Démarches voisines

Il s'agit d'une démarche originale pour la profession en France, même si elle a pu s'appuyer sur des réflexions antérieures et sur l'existence de référentiels et pratiques éprouvées dans d'autres domaines d'application (infrastructures routières par exemple). Outre la pratique québécoise à l'origine de la démarche, on pense ici à la définition de risques acceptables (voir par exemple les publications australiennes, américaines ou hollandaises, le bulletin 130 de la CIGB [6]), à la définition du principe ALARP¹ de réduction des risques « autant que raisonnablement possible » très proche de l'approche dérogatoire autorisée par la future réglementation.

On a ainsi également bénéficié des concepts, méthodologies et référentiels pratiqués et reconnus en France, notamment dans le domaine de la prévention du risque inondation (guides de la Direction Générale de la Prévention des Risques, DGPR – cf. [8]), et de l'évaluation socio-économique des investissements publics (Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective, CGSP – cf. [7]), qui font explicitement appel à des analyses coûts-bénéfices (ACB).

Le groupe de travail s'est aussi largement appuyé sur les méthodologies recommandées pour l'établissement des Plans de Prévention des Risques Inondations (PPRI) et des Programmes d'Action de Prévention des Inondations (PAPI) qui font largement appel aux analyses coûts-bénéfices, même si les investissements sont ici généralement publics et les bénéfices plutôt individuels.

¹ ALARP : As Low As Reasonably Practicable

2. Cadre méthodologique d'ensemble

2.1. Principes directeurs de la méthode

Les principes qui ont prévalu à l'élaboration du cadre méthodologique présenté ci-après sont les suivants :

Principe 1 : S'appuyer sur des approches intégrant des critères de proportionnalité entre coûts de renforcement et gains en sécurité

Il s'agit d'élaborer une méthode s'inspirant d'approches permettant d'apprécier le caractère proportionné ou disproportionné entre l'effort de renforcement d'un système et les gains en sécurité effectivement dégagés par ce renforcement, et en premier lieu des approches de type Analyses Coûts-bénéfices (ou ACB), souvent utilisées pour comparer différents scénarios de projet, y compris dans le domaine de la sûreté (cf. infrastructures routières), pour tester et quantifier des critères de proportionnalité et in fine d'acceptabilité.

Principe 2 : S'appuyer sur des référentiels existants

Une attention particulière est portée à l'utilisation de guides et référentiels existants, français pour la plupart, en particulier des guides d'évaluation économique des politiques publiques, qui proposent une méthodologie de base pour les ACB² [7]. Si une approche ACB n'est pas adaptée, le recours à une Analyse Multi-Critères (AMC), qui constitue une généralisation des ACB fondée sur des critères à échelles multi-métriques, pourra être envisagé [8].

De même, les services de l'Etat ont élaboré des guides de référence en matière d'évaluation économique des dommages occasionnés par des inondations, auxquels il a été jugé nécessaire et pertinent de se référer, notamment les Annexes Techniques de la référence [8].

Enfin, les scénarios de rupture de barrages pourront faire référence aux informations disponibles concernant la stabilité des ouvrages : conclusions des Etudes de Dangers (EDD), conclusions des études de stabilité, d'expertises disponibles, etc ...

Principe 3 : Proposer une méthode offrant des réponses concrètes pour le Maître d'Ouvrage

En pratique, le gestionnaire d'un ouvrage se pose la question suivante :

« faut-il mettre en conformité le dimensionnement des évacuateurs de crue du barrage avec de nouvelles exigences de référence ? »

ou

« est-ce que le ou les évacuateurs de crue actuels ont un dimensionnement jugé acceptable au regard des dommages incrémentaux ou différentiels qu'ils pourraient induire en cas de défaillance du barrage au-delà du niveau de crue que leur dimensionnement actuel autorise ? »

L'évaluation du gain de sécurité se fait en considérant :

- i. la situation actuelle de l'ouvrage : dimensionnement des évacuateurs de crue que l'on désignera par **D₀** et qui recouvre la capacité des évacuateurs de crue (EVC), les PHE, la revanche, ... ;
- ii. la situation de mise en conformité (adjonction d'un nouvel EVC, laminage complémentaire suite à rehausse des PHE, ...) à de nouvelles exigences de référence ou réglementaires : on désignera ce dimensionnement par **D_{reg}**, et sera retenu comme **situation de référence** pour toute la suite du document.

Le cas échéant, on peut être amené à rechercher la pertinence d'un dimensionnement intermédiaire **D_i**, entre les situations **D₀** et **D_{reg}**, car jugé acceptable au regard des dommages incrémentaux.

Principe 4 : Distinguer les dommages aux personnes et aux biens

La quantification des dommages se fait en distinguant les dommages aux personnes et les dommages aux biens, pour chaque scénario étudié (avec et sans rupture d'ouvrage ; pour les

² ACB : Analyses Coûts-Bénéfices

dimensionnements D0 et D_{reg}), puis calcul des « incréments » en recherchant toujours à s'appuyer sur des référentiels et méthodes existants.

Les critères d'acceptabilité, qu'ils soient à base de métriques économiques ou non économiques, pour juger du caractère « suffisamment réduit » des dommages incrémentaux aux personnes et aux biens, et du caractère « disproportionné » des coûts des travaux de mise en conformité, constituent en eux-mêmes une question essentielle, qui est largement abordée dans les présentes recommandations. A noter toutefois que certains des critères proposés combinent l'évaluation des dommages aux biens et aux personnes de manière intégrée.

Principe 5 : Elaborer une approche graduelle et progressive, adaptée à la complexité des situations

Dans les situations particulières où les enjeux sont nuls ou quasi-nuls en raison d'une absence de vulnérabilités sur le territoire, l'approche doit pouvoir être facilement mise en œuvre sans rentrer dans la comptabilisation détaillée des dommages, qui deviennent *de facto* sans objet.

2.2. Séquence méthodologique globale

On décrit dans le logigramme de la Figure 1 la séquence des principales étapes de la méthode proposée à ce jour. L'enchaînement des étapes conduit *in fine* à l'examen d'un ensemble de critères issus de l'évaluation des dommages aux biens et aux personnes. Ce jeu de critères doit permettre de juger de la possibilité de déroger ou non aux futures règles nominales de dimensionnement, dans les conditions décrites en introduction.

Note importante : le schéma séquentiel d'étude décrit sur la Figure 1 ne préjuge pas, bien évidemment, de la possibilité de boucles de retour entre étapes, notamment le besoin d'acquisition de données supplémentaires (Etape A) ou de nouvelles simulations hydrauliques (Etape D2) en fonction des résultats obtenus lors des étapes D3 à D6.

Chaque étape de la méthode est décrite de manière détaillée dans les paragraphes suivants.

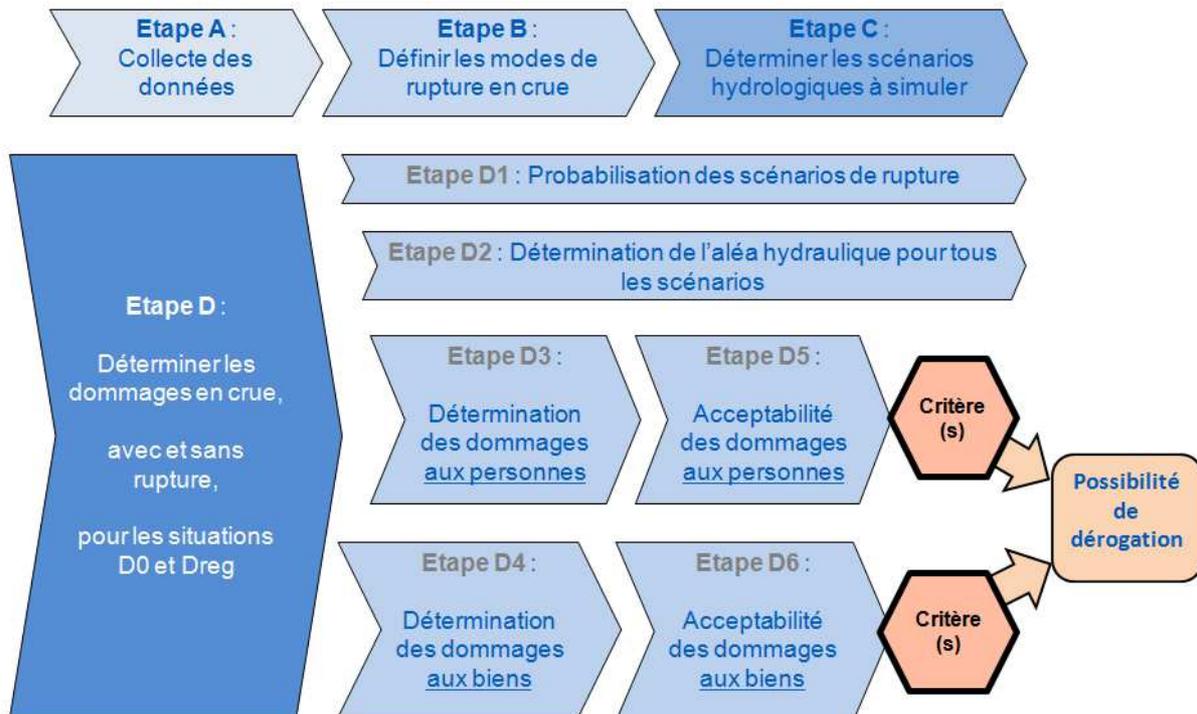


Figure 1 – Séquence méthodologique d'ensemble

3. Collecte des données nécessaires (Etape A)

3.1. Données hydrologiques et hydrauliques

La compréhension globale du fonctionnement des cours d'eau et de leurs zones inondables nécessite un jeu de données élargi prenant en compte l'ensemble du bassin versant dans lequel ils s'inscrivent de même que l'historique des événements passés.

D'un point de vue pratique, les données de base incontournables de l'étude sont :

- l'évaluation hydrologique des débits des crues extrêmes, éventuellement saisonnalisés en cas de corrélation marquée entre présence humaine et saisons, y compris des principaux affluents ;
- l'évaluation des caractéristiques hydrauliques des écoulements des crues dans la plaine alluviale, qui nécessite le recueil des données topographiques de la plaine alluviale et des ouvrages anthropiques qui la traversent ainsi que l'ensemble des données nécessaires au calage des modèles de simulation des écoulements des crues. La précision et la résolution des données topographiques doit être cohérente avec la précision recherchée pour les caractéristiques hydrauliques des écoulements en crue. En la matière, la pratique usuelle de modélisation hydraulique pour les études du risque inondation est recommandée.

La collecte et l'exploitation des dossiers administratifs officiels afférents au risque d'inondation de la vallée (PPRI, dossier communal d'information, ...), ainsi que celles des études des projets de lutte contre les inondations (PAPI, contrat de rivière, SAGE,...), permettront d'assurer une cohérence d'ensemble de ces évaluations.

Une visite de terrain, agrémentée de son rapport photographique et d'une évaluation préliminaire des caractéristiques hydrauliques du cours d'eau (coefficients de Strickler) et de ses ouvrages (singularités hydrauliques), pourra avantageusement compléter et valider les données collectées.

3.2. Données concernant le barrage de retenue

Il sera constitué une base documentaire de l'ouvrage qui comprendra en particulier :

- l'évaluation hydraulique des débits d'évacuation actuels des organes du barrage, y compris le déversement par-dessus la crête du barrage le cas échéant, en veillant à considérer l'influence du noyage aval, ;
- l'évaluation sommaire du projet de mise en conformité jugé le plus pertinent, les débits d'évacuation des organes du barrage associés à ce projet, de même que son coût approximatif ;
- l'évaluation structurelle de la stabilité du barrage dans ces deux situations (cote de danger, ...).

3.3. Données liées aux enjeux et vulnérabilités du territoire

3.3.1 Les enjeux humains à considérer

Les populations à considérer sont celles susceptibles d'être présentes dans la vallée impactée par la rupture du barrage. Cela comprend :

- la population résidente : faute de répartition plus précise (base de données MAJIC³), il est recommandé d'estimer la population résidente en distribuant la population communale dans les logements recensés ;
- le personnel des entreprises implantées en zone inondable ou en zones susceptibles d'être inondées par les crues extrêmes considérées ou par la rupture du barrage ;
- le public dans les ERP⁴ ;
- la population saisonnière (population de passage, emplois saisonniers) ou temporaire le cas échéant.

Le cumul de ces catégories de personnes conduirait à une surestimation de la population exposée. En effet le risque de doublon est important entre les résidents, les actifs et le public des ERP (typiquement : un couple résident peut travailler dans la zone inondable et inscrire ses enfants à l'école locale).

Il convient donc d'élaborer un ou deux scénarios supposés réalistes de répartition de la population dans les logements, les entreprises et les ERP. Par exemple, un scénario diurne et un scénario nocturne permettent de distinguer deux situations bien tranchées :

- scénario diurne : la plupart des personnes sont sur leur lieu de travail ou dans les ERP (écoles, ...);
- scénario nocturne : les personnes sont majoritairement dans leurs logements et les entreprises et ERP sont pratiquement tous inoccupés.

Sources d'information : services déconcentrés du ministère (DDT/DDTM), des communes, des chambres de commerce et d'industrie, des chambres des métiers, des offices du tourisme ; des ERP, des entreprises, ... (portail du ministère : <http://geoidd.developpement-durable.gouv.fr>).

3.3.2 Les enjeux matériels relatifs aux biens et aux activités

Les informations relatives aux enjeux matériels à collecter doivent avant tout permettre l'application des « fonctions de dommages » (évaluations des coûts des dommages en fonction des différents types de bien et en fonction de paramètres hydrauliques tels que la hauteur d'inondation ou la vitesse de l'écoulement), telles que définies par [8]. Il convient de signaler que les « fonctions de dommages » aux entreprises font l'objet d'un important travail de mise à jour par l'IRSTEA, à la date de rédaction du présent guide.

Ces informations couvrent les segments suivants :

- **Les logements**

Sources d'information : cadastre, fichiers fonciers de la base MAJIC, base de données de l'IGN BD TOPO®, enquête de terrain.

Les dommages aux logements peuvent se calculer selon deux formules : au m² au sol ou bien à l'unité, en différenciant les habitations à étages ou de plain-pied avec la présence ou non d'un sous-sol.

- **Les établissements publics**

Sources d'information : cadastre, base de données de l'IGN BD TOPO®, enquête de terrain.

Le calcul se fait au m² au sol du bâti ou groupe de bâti considéré. Les catégories d'établissements publics sont données dans le guide DGPR relatif à l'Analyse Multi-Critères.

³ La base MAJIC (Mise À Jour des Informations Cadastreales : parcelles, locaux, propriétaires) est produite et gérée par la Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP) du Ministère des Finances. C'est d'abord un outil à vocation fiscale à usage interne des services de l'Etat dont l'accès requiert une autorisation spécifique.

⁴ ERP : Etablissements Recevant du Public

- **Les entreprises**

Sources d'information : chambres de commerce et d'industrie, chambres des métiers, enquête de terrain.

Le calcul des dommages aux entreprises se fait en fonction du type d'activité (code NAF), soit à l'unité soit par employé si cette information est connue.

- **Les ouvrages d'art et remblais divers**

Sources d'information : SNCF, DDT, Directions des routes, Syndicats intercommunaux de gestion de cours d'eau, enquête de terrain, ...

Les ouvrages anthropiques existants dans la vallée du type ponts, remblais routiers ou remblais ferroviaires, digues de protection... ayant une incidence sur les écoulements des crues doivent être recensés. Leurs éventuelles destructions au cours de la crue ou sous l'effet de l'onde de rupture du barrage sont à envisager avec attention car, non seulement cela peut constituer un dommage matériel non négligeable mais cela peut également provoquer des dommages collatéraux du fait de leur propre onde de rupture. Concernant les ouvrages franchissant le cours d'eau (ponts), il n'est pas possible de supposer le caractère sécuritaire ou non de la considération de leur tenue ou de leur rupture (fonction des enjeux en amont et en aval du pont). Le critère le plus simple pour la ruine d'un ouvrage d'art est la charge maximale au-dessus du tablier. On admet communément que, à défaut d'information technique plus précise, pour un pont transversal à la vallée comme pour une digue conçue pour la protection contre les inondations, si cette charge maximale dépasse durablement 0,2 à 0,3 m, alors la ruine peut être envisagée.

- **Les autres infrastructures**

Sources d'information : EDF, ErDF/ENEDIS, RTE, GrTGaz, régies, ...

Les stations de pompage, usines d'eau potable, stations d'épuration, transformateurs électriques, détendeurs de gaz, boîtiers Télécom, ... peuvent être fortement endommagées par l'onde de rupture. Leurs gestionnaires peuvent fournir des indications de valeur de construction et/ou de remplacement des bâtiments et équipements impactés.

3.3.3 Les dispositifs de prévention des crues

Afin d'évaluer les possibilités de réduire l'évaluation des dommages aux biens et aux personnes, on recensera les dispositifs de prévention des crues existants sur la zone impactée par l'onde de rupture du barrage, et plus particulièrement les Plans Communaux de Sauvegarde, les systèmes d'alerte ou de prévision des crues, les plans ORSEC ainsi que les Plans Particuliers d'Intervention (PPI). On pourra également référencer et exploiter les exercices de sécurité civile réalisées par certaines communes ou préfectures (mise en œuvre de sirènes, évacuation des écoles, ...).

3.4. Approche sommaire pour évaluer l'opportunité d'une approche incrémentale

Avant d'engager une étude incrémentale complète, il semble opportun pour un Maître d'Ouvrage de pouvoir disposer d'une première évaluation sommaire de l'intérêt *a priori* d'une telle approche.

L'évaluation sommaire peut ou doit sur le principe reposer sur l'examen de trois volets :

- volet 1 : Evaluation de l'importance de l'incrément d'aléa (débit) induit par la rupture du barrage par rapport à une crue initiale (crue centennale ou plus rare) ;
- volet 2 : Evaluation de l'importance des vulnérabilités ou des enjeux exposés dans la zone d'influence de cet incrément d'aléa ;
- volet 3 : Coût de l'étude (vs.) coût de la mise en conformité (ne pas se lancer dans ce type d'étude si les travaux de mise en conformité n'excède pas le montant de l'étude, typiquement 50 à 100 kEUR).

Pour le volet 1 :

Les indicateurs suivants peuvent servir à apprécier l'importance de l'incrément d'aléa :

$$\begin{aligned} R &= Q_{\text{rupture_max}} / Q_{100} & ; & & \text{ou} & & R = Q_{\text{rupture_max}} / Q_{1000} \\ R &= V_{\text{rupture}} / V_{Q100} & ; & & \text{ou} & & R = V_{\text{rupture}} / V_{Q1000} \end{aligned}$$

où Q et V désignent respectivement les débits maxima et les volumes associés soit à la rupture ⁵, soit à la crue centennale (Q100) ou millénale Q1000.

A titre de points de référence, on indique ci-après les valeurs de ces ratios pour deux barrages très différents positionnés sur le bassin de la Vienne : Vassivière sur la Mauldes (réservoir capacitif) et La Roche sur la Vienne (barrage mobile en rivière) :

Barrage	$Q_{\text{rupture_max}} / Q_{100}$	$Q_{\text{rupture_max}} / Q_{1000}$	$V_{\text{rupture}} / V_{Q1000}$
Vassivière	300	200	50
La Roche	2	1,2	0,01

Ces indicateurs permettent d'apprécier en première approximation l'ampleur de l'incrément d'aléa induit par la rupture en comparaison de l'aléa induit naturellement par les crues seules, sans faire de simulations hydrauliques poussées.

Pour le volet 2 :

L'examen doit porter sur l'existence d'enjeux présents sur le territoire dans une zone d'influence de l'incrément d'aléa. Concernant l'extension latérale de l'aléa et de l'incrément d'aléa, il peut être utile d'examiner, si elles existent, les données et cartes des PPRI (généralement établies pour la crue centennale ou la crue historique). Croisées avec les indicateurs précédents pour le volet 1, ils doivent permettre une première appréciation sommaire des zones potentiellement concernées par l'incrément d'aléa.

Concernant l'extension longitudinale de l'incrément d'aléa, plusieurs estimations sommaires peuvent être préconisées par des bureaux d'étude en hydraulique. Une proposition consiste à quantifier une longueur d'influence L, en s'inspirant de la méthode de calcul simplifié d'onde de submersion sur fond sec anciennement proposé par le GTGREF à l'époque (cf. [23]),, mais en l'adaptant empiriquement au cas d'une propagation d'onde sur un fond mouillé (crue initiale déjà présente) :

$$L = \frac{2 \cdot \Delta H \cdot V_{\Delta H}^{0,33}}{Q_{100}^{0,25}}$$

avec :

L	: Linéaire aval étudié	[km]
ΔH	: Différence de niveau amont-aval au barrage à Q100	[m]
$V_{\Delta H}$: Volume libérable en cas de rupture à Q ₁₀₀ (fonction de ΔH)	[hm ³]
Q ₁₀₀	: Débit de pointe d'une crue de temps de retour 100 ans	[m ³ /s]

La référence à Q100 peut être modifiée en Q1000.

Cette relation totalement empirique fait cependant apparaître :

- un numérateur qui reprend le « scaling » du Cemagref en fonction de $V^{1/3}$;
- un dénominateur qui dimensionne la crue initialement présente

Elle a été testée avec une performance assez satisfaisante sur plusieurs ouvrages en France.

⁵ On renvoie le lecteur à la nombreuse littérature disponible au sein de la profession permettant d'estimer le débit de rupture d'un barrage

Les indicateurs précédents pour les volets 1 et 2 ne constituent que des propositions. Les maîtres d'ouvrage et les bureaux pourront développer des approches alternatives pour établir un premier jugement sommaire de l'intérêt d'engager une étude incrémentale, selon les recommandations du présent guide. Ces nouvelles pratiques pourront compléter ce chapitre lors de la révision des présentes recommandations dans leur version définitive.

4. Simulation des scénarios de rupture et non rupture

4.1. Définition des hypothèses de rupture en crue des ouvrages (Etape B)

4.1.1 Mécanisme de rupture du barrage

Le mécanisme de rupture d'un barrage joue un rôle important sur la zone potentiellement inondée car il conditionne la géométrie et la cinétique de la brèche ou zone effacée de l'ouvrage.

Barrages en béton

Pour les barrages voûtes, l'hypothèse de rupture la plus probable est l'effacement complet et quasi-instantané (quelques secondes) de la voûte suite à une déstabilisation des appuis.

Pour les barrages à contreforts, on peut imaginer l'effacement instantané d'un premier plot suivi probablement de l'effacement successif des autres plots.

Pour les barrages poids (en béton ou en maçonnerie), la rupture serait quasi-instantanée (quelques minutes) par glissement ou basculement d'un ou plusieurs plots, et conduisant à des brèches de largeur potentiellement plus limitée.

En conclusion : en première approche, on peut considérer de manière sécuritaire (approche forfaitaire) une rupture complète et instantanée pour le cas des barrages en béton (barrages rigides).

Une approche spécifique plus réaliste pourra être proposée (en alternative à l'approche forfaitaire) sur la base d'une étude ou expertise spécifique relative à la stabilité des sections d'ouvrages, en particulier pour des barrages à fort rapport L/H ou pour les barrages avec des plots singuliers.

Barrages en remblai

Pour les barrages en remblai, en l'absence d'étude spécifique, le mode de rupture en crue le plus vraisemblable est la surverse (érosion externe). Pour ce mécanisme, la rupture d'un barrage en remblai est partielle et progressive.

De manière forfaitaire, on peut donc considérer en première approche un scénario de rupture progressive par surverse, avec formation d'une brèche de forme rectangulaire, limitée au-dessus du pied du talus amont, sur une durée d'ouverture de 30 minutes, et une largeur de 2 à 3 fois la hauteur du remblai.

Une approche spécifique plus réaliste pourra être proposée (en alternative à l'approche forfaitaire) pour estimer la géométrie et la cinétique de formation de la brèche. Cette approche pourra se baser sur une modélisation numérique où les paramètres définissant l'ouverture de la brèche nécessiteront une justification par avis d'expert et/ou par caractérisation de propriétés des matériaux constitutifs de l'ouvrage.

Ouvrages à grand linéaire

Il s'agit de barrages latéraux au sens du décret de Décembre 2007 [2] ou d'endigements (assimilables à des barrages en remblai) correspondant en général aux remblais des canaux.

De manière analogue aux barrages en remblai, on peut considérer pour les ouvrages en remblai à grand linéaire une rupture partielle et progressive. En revanche, compte-tenu de la section réduite des ouvrages à grand linéaire (en comparaison à celle des barrages en remblai), la largeur de la brèche peut être nettement plus importante, pouvant atteindre quelques dizaines, voire une centaine de mètres.

Toutefois, la question essentielle concerne la position de la brèche :

- la plus vraisemblable, déterminée à partir d'une analyse des lignes d'eau et du premier déversement ou d'une étude des points de fragilité ;
- ou la plus défavorable, choisie pour maximiser l'impact aval (en fonction des vulnérabilités exposées).

Plusieurs scénarii pourront examiner les conséquences de tel ou tel choix.

4.1.2 Conditions hydrauliques associées à la rupture

Pour chacun des événements hydrologiques considérés, sont déterminées les niveaux d'eau amont et aval du barrage au moment de la rupture, afin de déterminer ensuite l'hydrogramme de rupture du barrage qui est propagé en aval.

Le niveau amont du barrage est déterminé comme la cote maximale obtenue après laminage par la retenue pour chaque hydrogramme de crue considéré.

Le niveau aval est déterminé pour la crue considérée juste avant la rupture à partir d'un modèle hydraulique 1D ou 2D.

Dans le cas d'un barrage en béton, l'hydrogramme de rupture au niveau de la brèche est, dans le cas général, calculé directement par le modèle numérique hydraulique 1D ou 2D.

Dans le cas d'un barrage en remblai, l'hydrogramme de rupture peut être prescrit comme une condition limite amont (à partir d'un modèle numérique ou à dire d'expert), ou bien, il peut être simulé dans le modèle hydraulique 1D ou 2D via une loi d'ouverture de brèche paramétrée.

Le ou les évacuateur(s) de crues du barrage sont modélisés selon leur mode de fonctionnement nominal et en cohérence avec les consignes en période de crue. Dans certaines situations, et si le niveau de probabilité d'un dysfonctionnement des évacuateurs (vannés notamment) n'est pas jugé trop important (cf. [1]), une étude de sensibilité pourra être réalisée en considérant un dysfonctionnement des organes d'évacuation de crues, et en intégrant la probabilité associée à ce dysfonctionnement à la probabilité d'ensemble du scénario considéré.

4.1.3 Comportement des ouvrages situés à l'aval

Le comportement des barrages et autres ouvrages (ponts, digues...) situés à l'aval du barrage considéré joue aussi un rôle important sur la zone potentiellement inondée. En effet, supposer la rupture de ces ouvrages surestime l'inondation des zones en aval, mais sous-estime l'inondation des zones en amont (et vice-versa si on suppose leur tenue).

Pour un nombre « n » d'ouvrages en aval du barrage considéré, le nombre de scénarii possibles selon la rupture/tenue de ces ouvrages est « $2^{\text{puissance } n}$ ». Comme tous ces scénarii ne sont pas forcément réalistes, et compte-tenu du temps nécessaire à l'analyse de chaque simulation hydraulique, il convient d'éviter un nombre déraisonnable de scénarii multiples à étudier.

Dans un premier temps, il est nécessaire de sélectionner les ouvrages à prendre en compte dans le modèle numérique (justification du ressort de l'hydraulicien) et de distinguer les différentes catégories d'ouvrages : remblais de protection contre les crues, remblais d'infrastructures, ponts, barrages, ... Ensuite, sont associées à chaque ouvrage, au cas par cas, des conditions de rupture particulières définies par des paramètres hydrauliques déterminés en régime dynamique (niveau d'eau, vitesse...). Enfin, il conviendra de limiter les études de sensibilité aux cas pour lesquels les enjeux sont forts et les conditions de rupture incertaines.

On peut considérer les critères les suivants :

- remblais instables si la surverse dépasse des conditions limites (hauteur, durée) dont le caractère admissible est à justifier ;
- pont instable si la cote maximale dépasse le niveau du tablier (>0,2 m classiquement) ;
- barrages-poids stables si la cote maximale est inférieure à la cote de danger ;
- barrages voûtes stables ;

- ...

Il est important de souligner que les hypothèses adoptées pour le comportement des ouvrages situés en aval ne sont valables que dans le cadre de l'étude incrémentale pour le dimensionnement ou la vérification des évacuateurs de crue, et ne peuvent en aucun cas être exploitées pour d'autres applications (stratégie de maintenance des ouvrages en question, sécurité publique, ...).

4.1.4 Cas de plusieurs barrages ceinturant le même réservoir

Le cas particulier de plusieurs barrages ceinturant le même réservoir n'a pas été abordé dans le détail. Pour ce cas, le présent guide se limite à signaler que, comme il ne semble pas y avoir de règle générale pour la maximisation de l'incrément de l'aléa d'inondation, il faudra examiner le cas où chacun des barrages pris séparément rompt seul, et le cas d'un mode de défaillance commun en crue (ruptures simultanées), y compris pour les barrages en amont (par dénoyage du pied aval).

4.2. Définition des scénarios hydrologiques de référence (Etape C)

Les crues de référence retenues pour déterminer l'aléa d'inondation sont celles associées aux classes réglementaires des ouvrages selon les recommandations du CFBR de 2013 – cf. [1] :

- Classe A : 100, 300, 1 000, 3 000, 10 000, 30 000, et 100 000 ans.
- Classe B : 100, 300, 1 000, 3 000, 10 000, 30 000 ans,
- Classe C : 100, 300, 1 000, 3 000, 10 000 ans.

Mais il est également possible d'ajouter d'autres crues que celles préconisées ici, si elles permettent d'établir des courbes dommages-fréquence plus représentatives de la vulnérabilité de la vallée (comme par exemple une crue de période de retour de 4 000 ans correspondant à la crue faisant atteindre la cote de danger d'un barrage de classe B), ou si elles correspondent à seuils de défaillance présumés d'ouvrages aval.

Les crues sont caractérisées, selon les méthodes de référence reconnues au sein de la profession, par leur hydrogramme dont le débit maximum et le volume auront des niveaux d'occurrence cohérents. En l'absence d'étude hydrologique spécifique des concomitances entre les différents bassins versants de la zone, il est recommandé en première approche que les crues des affluents situés en aval de l'ouvrage soient caractérisées par une fréquence dix fois supérieure (par exemple une crue de période de retour de 300 ans pour l'affluent si la crue considérée pour la rupture du barrage est de période de retour de 3 000 ans). Le degré de concomitance de ces apports avec la crue du cours d'eau principal doit être justifié.

La question de l'influence de l'évolution climatique sur la détermination des quantiles extrêmes de crue n'est pas considérée dans le présent guide, et on considérera les évaluations des quantiles extrêmes de crue comme stabilisées et non évolutives dans le temps. Le GT rappelle à ce titre que des travaux de recherche récents de Grenoble-INP (LTHE) et IRSTEA (ex. Cemagref), menés en coopération avec Météo-France et EDF, ont montré que, en France métropolitaine (l'analyse ne porte que sur les bassins de cette zone), il n'y a avait globalement pas de mise en évidence statistique significative d'une influence de l'évolution climatique détectable à partir des observations de crues passées [14]. Par ailleurs, on peut mentionner que les révisions d'analyses de risques réalisées dans le cadre de révisions des EDD (à fréquence décennale en générale) peuvent intégrer une révision des études hydrologiques, permettant de prendre en compte une éventuelle évolution de l'estimation des quantiles extrêmes de crue. Cela ne préjuge cependant pas d'une évolution possible ultérieure à long terme, et notamment pour des bassins hydrographiques d'autres régions du monde.

4.3. Probabilisation des scénarios de rupture (Etape D1)

La probabilisation des scénarios analysés nécessite d'affecter une probabilité au cas de rupture de l'ouvrage, conditionné par l'occurrence de l'événement hydrologique.

En première approche, on peut supposer la probabilité conditionnelle de rupture du barrage en période de crue égale à 1 si la cote de la retenue est supérieure à la cote de danger, et égale à 0 dans le cas contraire – cela correspond au modèle « discret » sur le schéma de la Figure 2.

Toutefois, il est rappelé que la cote de danger est définie comme la cote de la retenue qui pourrait être à l'origine d'un scénario de rupture du barrage lors d'une crue extrême ou tout au moins la cote au-dessus de laquelle la stabilité de l'ouvrage n'est plus garantie. D'une part, on peut commenter que, comme la cote de danger est associée à une période de crue, elle n'exclut pas la possibilité d'une rupture de barrage pour une cote inférieure en situation hors crue (par érosion interne par exemple). D'autre part, on peut commenter également que le dépassement de la cote de danger n'entraîne pas forcément la rupture du barrage. De manière plus générale, on peut commenter finalement que la détermination de la cote de danger est entachée de nombreuses incertitudes plus ou moins significatives (propriétés des matériaux du barrage, de la fondation ; modélisation de la stabilité du barrage ; ...).

Une approche plus approfondie pourra être mise en œuvre par le responsable d'étude de manière à prendre en compte notamment des incertitudes associées à la détermination de la cote de danger, pour aboutir à une distribution *continue* de la probabilité conditionnelle de rupture, comme illustré schématiquement sur la Figure 2. Une possibilité consiste à utiliser des valeurs ou classes de probabilité traduisant des jugements à dire d'expert (certain, peu probable, probable, ...) sur la tenue du barrage en situation de crue, en s'appuyant notamment sur les résultats des études de dangers. L'intérêt de cette possibilité est limité par le caractère subjectif du jugement à dire d'expert. Une autre possibilité consiste à déployer des méthodes d'analyse de fiabilité des structures pour l'évaluation probabiliste de la stabilité du barrage en situation de crue et pour l'obtention d'une distribution continue de la probabilité conditionnelle de rupture (avec des courbes de fragilité par exemple). L'intérêt de cette possibilité est limité par la lourdeur de certaines méthodes d'analyse de fiabilité (comme les simulations de Monte Carlo). Compte-tenu des limites mentionnées ici, il n'est pas recommandé de mener une approche plus approfondie sans réaliser au préalable l'analyse simplifiée mentionnée en première approche (i.e. selon le modèle « discret »).

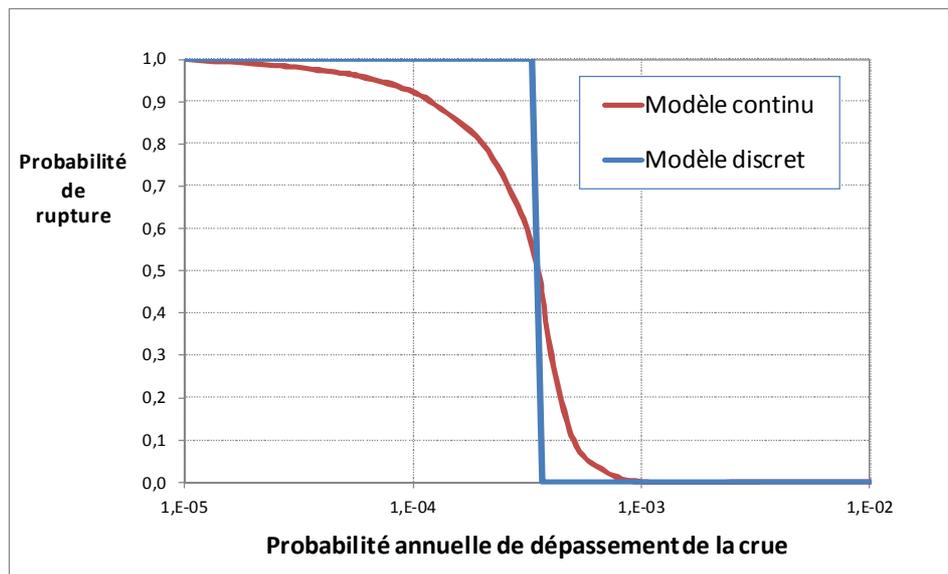


Figure 2 – Illustration schématique des modèles de probabilité conditionnelle de rupture en période de crue (modèles discret et continu)

4.4. Modélisation hydraulique des scénarios d'inondation, sans et avec rupture (Etape D2)

L'impact d'une crue sur la zone qu'elle inonde, ses habitants, ses bâtiments, ses infrastructures et autres biens est caractérisé en particulier par des paramètres hydrauliques comme :

- L'étendue maximale de l'inondation ;
- La durée de l'inondation ;
- La hauteur locale de l'inondation ;
- La vitesse de montée de l'eau ;
- La vitesse locale de l'écoulement ;
- Les sédiments et embâcles transportés par l'écoulement ;
- Les temps disponibles (entre la détection et les actions) pour gérer les plans de mise en sécurité des biens et des personnes.

La caractérisation de ces paramètres est fournie par une modélisation mathématique de simulation des écoulements en régime transitoire. Le type de modèle à mettre en œuvre est fonction des données disponibles et de leur précision, de la complexité des écoulements à simuler et du type de dommage (matériels,...).

Les différents types de modèle usuellement utilisés en hydraulique fluviale sont les suivants :

- Le modèle 1D filaire pour modéliser un grand linéaire de vallée avec un écoulement qui suit une direction privilégiée le long de la vallée (écoulement unidimensionnel). La vallée est représentée par des profils en travers et le niveau d'eau est uniforme dans un profil en travers (même niveau d'eau dans le lit mineur et le lit majeur en cas de crue débordante mais hauteur d'eau différente). Le basculement du plan d'eau dans les courbes peut être calculé dans un deuxième temps pour évaluer les niveaux maxima en extrados.

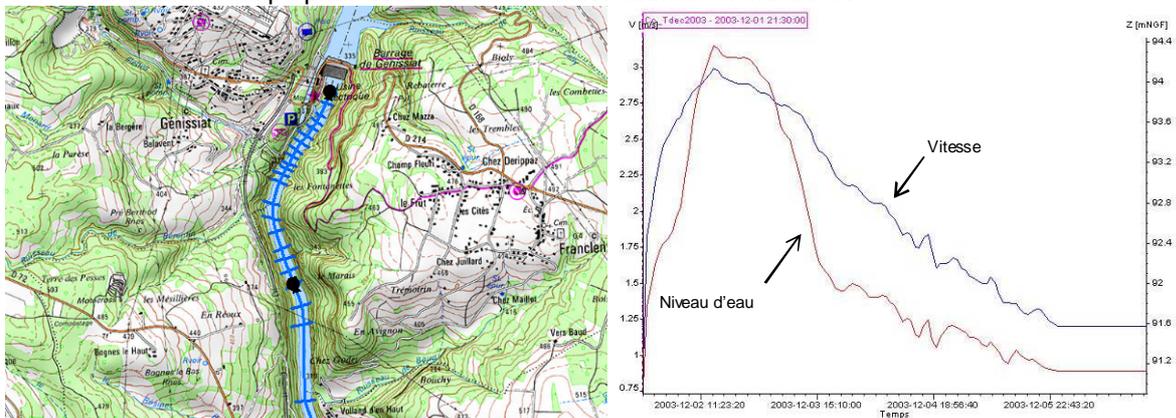


Figure 3 – Exemple de modèle 1D filaire avec niveau d'eau et vitesse dans un profil en travers

- Le modèle 1D à casier (ou pseudo modèle 2D) pour modéliser un grand linéaire de vallée avec un écoulement multidirectionnel dans le lit majeur de la vallée du fait de la présence d'obstacles transversaux ou longitudinaux (remblais, digues, ...). Le lit majeur est représenté par des casiers communiquant entre eux par des liaisons hydrauliques de diverses natures : loi de type frottement et lois d'ouvrage (seuil, orifice, ...).

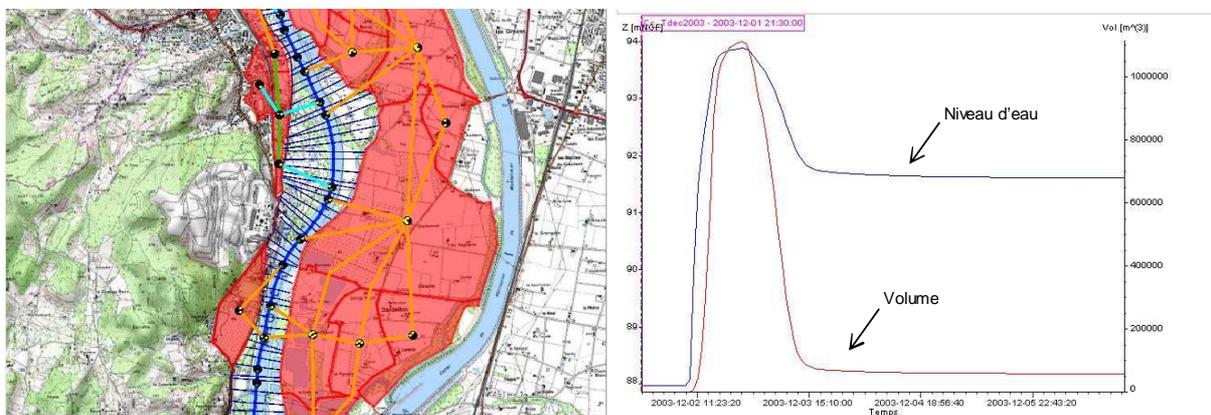


Figure 4 – Exemple de modèle 1D à casier avec niveau d'eau et volume dans un casier

- Le modèle 2D pour modéliser finement des écoulements complexes sur des longueurs de vallée plus réduites. La vallée est représentée par un maillage fin qui permet de restituer des champs de vitesse et de hauteur d'eau au droit de chaque maille. Le modèle 2D est adapté à l'étude des géométries plus complexes (par exemple : présence de plusieurs bras d'écoulement dans le lit majeur ou écoulement en zone fortement urbanisée). Il s'avère aussi relativement facile à mettre en œuvre lorsqu'un MNT précis est disponible (LIDAR) en permettant alors de s'affranchir des hypothèses (et donc des incertitudes) sur les liaisons d'un modèle à casiers. Le modèle 2D est parfois utilisé en complément des deux premiers types de modèle.

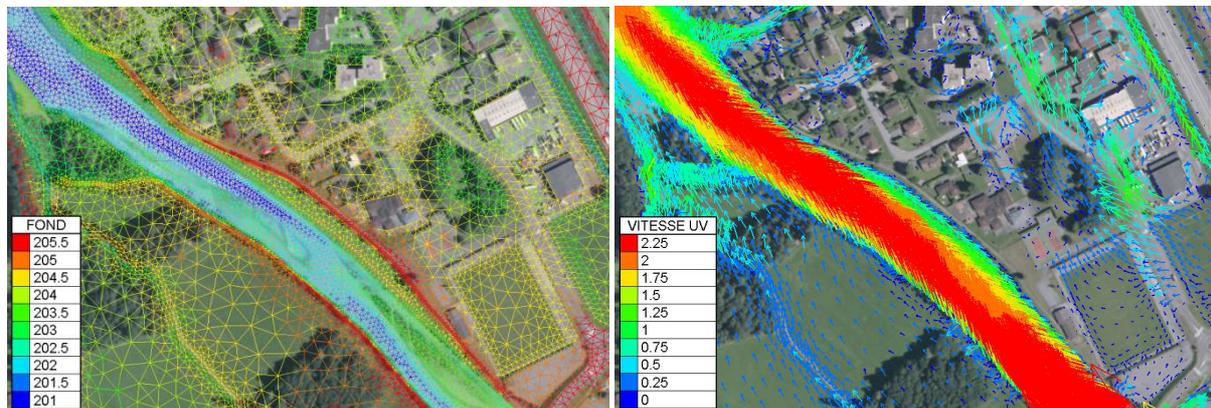


Figure 5 - Modèle 2D avec champs de vitesse

Les dommages aux biens dépendent essentiellement de la hauteur d'eau et plus rarement de la vitesse d'écoulement. De ce fait, les résultats d'un modèle 1D filaire ou à casiers suffisent généralement pour évaluer les dommages matériels. Par contre, l'évaluation des dommages aux personnes étant sensible aux paramètres hydrauliques (hauteur d'eau, vitesse d'écoulement,...), un modèle 2D peut s'avérer nécessaire avec un Modèle Numérique de Terrain (MNT) d'une précision suffisante et adaptée à la précision de l'évaluation des dommages aux enjeux humains.

En contrepartie, les crues de référence étant des crues fortes à très fortes, la prise en compte, dans la modélisation hydraulique, des ouvrages anthropiques situés dans la vallée alluviale tels que les ponts, les remblais ferroviaires, les routes, les digues de protection,... rend nécessaire la définition des modes de rupture de ces ouvrages (cf. § 4.1.3). Ces ouvrages sont en effet dimensionnés pour résister à des crues de période de retour d'occurrence inférieure, en général, à la plus faible des crues de référence (à l'exception des ouvrages historiques ayant démontré leur résistance au fil des siècles). La topologie du modèle peut, de fait, être sensiblement simplifiée en rendant totalement transparent ces ouvrages dans le cas où leur rupture au cours de la crue n'engendre pas d'incrément de dommages importants par rapport à un ouvrage totalement transparent.

Ce sujet de la précision attendue des résultats est cependant à tempérer du fait que l'usage de ces résultats s'inscrit dans une analyse *incrémentale* qui, par différence, en lisse leurs imprécisions. De fait, on se contentera le plus souvent d'un modèle de simulation du type 1D, le modèle 2D pouvant être mis en œuvre localement pour affiner, si besoin, les résultats.

Enfin, comme déjà évoqué, l'hydrogramme de rupture de l'ouvrage est issu, soit du modèle hydraulique mis en œuvre, soit d'un modèle spécifique en fonction du type de l'ouvrage (ouvrage béton, ouvrage en terre,...) pour lequel la rupture à modéliser est plus ou moins brutale et instantanée.

Il est important de souligner que la cartographie des zones inondées est destinée à l'évaluation des dommages. Les cartes des zones inondées sont des objets d'étude, et n'ont donc aucune valeur réglementaire ou administrative. En particulier, elles ne doivent pas être utilisées pour réglementer l'occupation des sols (PPRI) et préparer l'organisation des secours (PPI, PCS).

5. Détermination des dommages aux personnes (Etape D3)

5.1. Périmètre géographique de comptabilisation : périmètre de base, périmètre réduit. Evolution dans le temps

Les enjeux humains à considérer sont ceux répertoriés au § 3.3.1. Le périmètre géographique de base pour cette comptabilisation est l'ensemble des tronçons de vallées impactées par l'onde de rupture du barrage pour le scénario le plus défavorable (c'est-à-dire pour lequel la configuration du barrage aura le plus d'impact sur la ligne d'eau).

Une réduction du périmètre d'étude peut être obtenue en ne considérant que les tronçons de vallées pour lesquels l'incrément d'aléa inondation ou aléa hydraulique (différence entre crue sans rupture et crue avec rupture) est influencé par le dimensionnement du barrage (actuel ou mis en conformité).

Il est important de rappeler que la comptabilisation des dommages, aux personnes ou aux biens, ne se restreint pas uniquement, comme dans les applications rencontrées de la législation en vigueur au Québec, à l'évaluation dans la zone ou frange d'incrément d'aléa inondation en plan (X, Y) – cf. [4] [5] et Figure 6. Dit autrement, un enjeu déjà impacté lors d'une crue naturelle sans rupture, c'est-à-dire inclus dans la zone orange clair de la Figure 6, pourra constituer un incrément de dommages induit par la rupture, si l'incrément d'aléa inondation (en hauteur, en vitesse) modifie les conditions de dangerosité affectant cet enjeu.

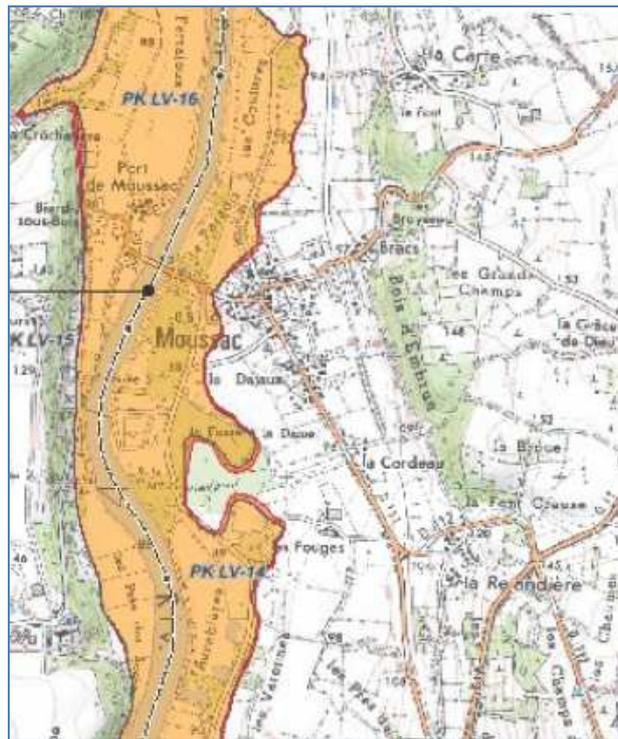


Figure 6 – Exemple de cartographie de la frange incrémentale en plan (zone orange foncé entourant la zone orange clair), dans laquelle l'approche Québécoise restreint l'évaluation des incréments de dommages

Enfin, on précise que l'évaluation est conduite pour la situation actuelle d'occupation du territoire, correspondant aux données disponibles. Sauf cas très particulier qui le justifierait, on n'intègre pas d'hypothèses ou de scénario d'évolution de l'occupation du territoire. On estime que la fréquence des révisions d'analyse de risque (typiquement, rythme décennal des études de dangers) est compatible avec la prise en compte d'évolution significative de l'occupation du territoire, qui justifierait une remise en cause des évaluations de dommages réalisées précédemment.

5.2. Principes de l'évaluation des dommages aux personnes

L'objectif est de déterminer les niveaux de danger aux personnes pour chaque cas de dimensionnement (D0 et D_reg), pour des cas réalistes de comportement (avec ou sans rupture) et pour l'ensemble des simulations de passage des crues à examiner.

A travers des fonctions qui expriment les dangers aux personnes (population exposée, blessés, décès) en fonction des caractéristiques de l'aléa hydraulique (hauteur, vitesse...), des populations présentes (scénarios diurne ou nocturne, alerte et secours, ...) et des systèmes d'alerte existants, le calcul des dommages doit aboutir à un **Nombre Evité Moyen Annuel** ou **NEMA**, qui exprime l'impact des scénarios considérés sur l'ensemble des enjeux du périmètre touché par les ondes de rupture. L'intégration sur l'échelle de probabilité annuelle, et les comparaisons entre les scénarios D0 et D_reg, permettent alors d'évaluer le NEMA - voir la Figure 7.

Le NMA_ref décrit sur cette figure correspond à l'évaluation du Nombre Moyen Annuel de victimes dans la situation de référence telle que décrite au principe 3 (cf. § 2.1), c'est-à-dire pour un dimensionnement d'ouvrage en conformité D_reg.

On précise que l'évaluation ne prend pas en compte les comportements « à risque » de certaines personnes lors des épisodes de crue (comme par exemple aller « sauver » sa voiture dans un garage en sous-sol, se rendre sur un barrage par temps de crue, chantier temporaire en bordure de cours d'eau, comportements extrêmes...).

Il est donc essentiel de garder à l'esprit que les **indicateurs de danger aux personnes recherchés ici sont utilisés davantage pour les différentiels entre scénarios que pour leur valeur absolue**. Il en résulte par exemple que pour deux scénarios dont les lignes d'eau sont très proches (selon un ou des critères hydrauliques à adapter au cas par cas), on peut considérer que leurs dommages sont quasi-égaux. Dans ce cas, il est inutile de mener deux calculs de dommages. Le maître d'ouvrage, appuyé le cas échéant de son bureau d'étude, est donc fortement incité à mener préalablement une analyse fine des résultats de l'étude hydraulique avant de se lancer dans le calcul des dommages aux personnes.

A noter qu'il peut être recommandé, lorsque cela est possible, de calibrer la précision du modèle employé en utilisant le modèle sur des cas historiques réels éventuels disposant de données fiables, et en se rapprochant idéalement du cas étudié (cas similaire de cours d'eau, vulnérabilité sensiblement identique à grosses mailles...).

En première approche, la traduction de l'évaluation des dommages aux personnes en termes économiques n'est pas considérée. Toutefois, l'examen de certains critères de proportionnalité repose sur la quantification d'indicateurs traduisant ces dommages en termes économiques, notamment en introduisant des notions comme la *Valeur de Vie Statistique* ou *VVS* – voir chapitres suivants pour les développements correspondants.

Nota : on précise que le GT n'a pas retenu plus la comptabilisation des risques d'accidents ou de victimes qui pourraient être induits par les chantiers de mise en conformité, et qui pourraient de ce fait, moyennant une pondération par une probabilité issue du Rex d'accidentologie de chantiers, s'ajouter aux dommages aux victimes dans la situation D_reg., et en cas de valorisation économique aux "coûts" de la mise en conformité. Cette option repose sur un principe sécuritaire, même si l'accidentologie des chantiers constitue malheureusement une réalité démontrée par le retour d'expérience de ce type de travaux.

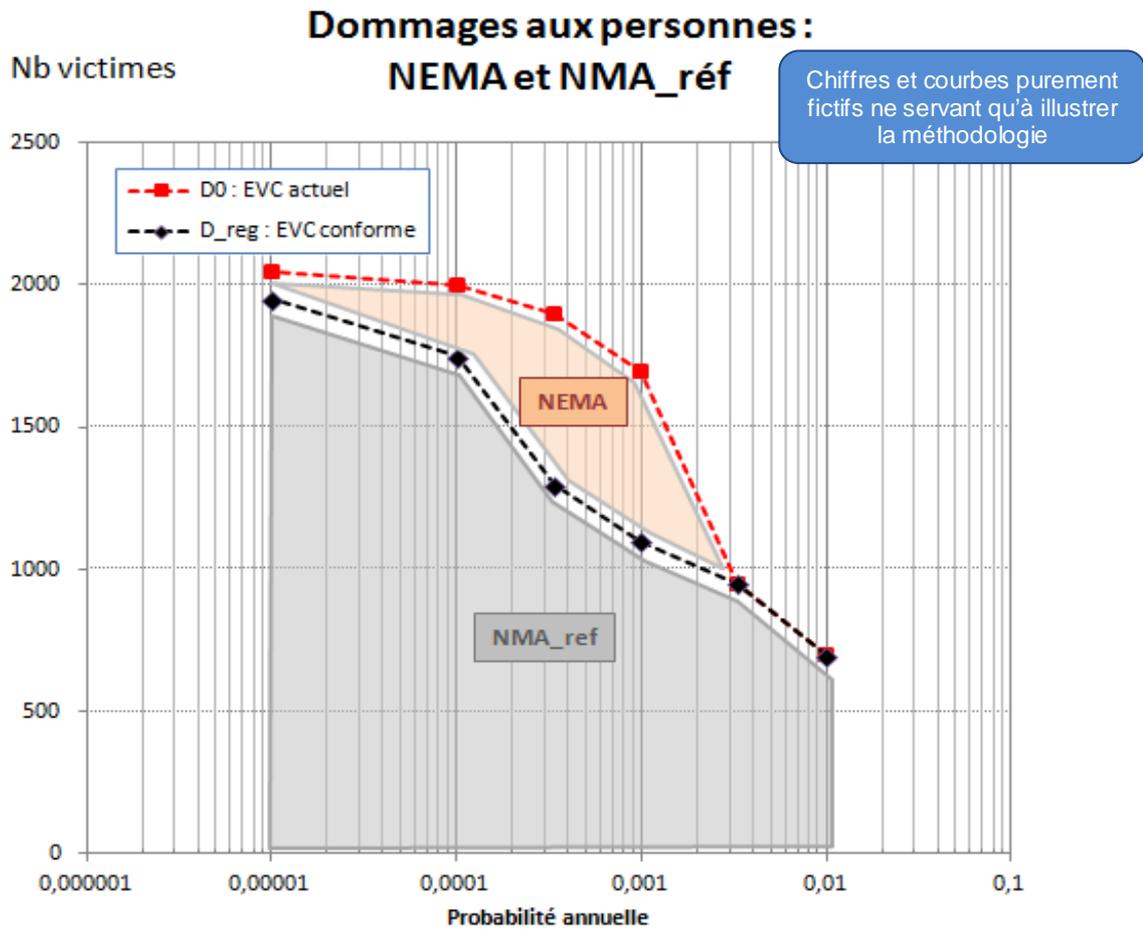


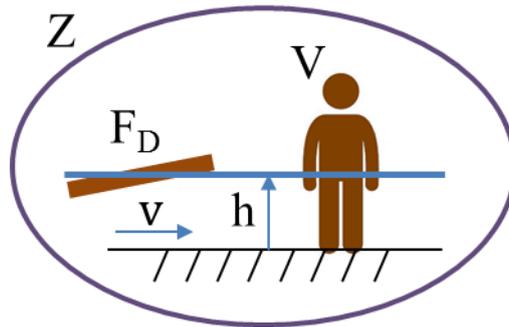
Figure 7 – Evaluation des dommages aux personnes pour chaque période de retour des crues, et détermination du NEMA

5.3. Estimation des dangers pour les personnes

Une méthode qui peut être recommandée parmi d'autres pour l'évaluation des dangers aux personnes, est la méthode *Flood Risk-to-People* ou encore méthode de Ramsbottom développée par le DEFRA (Royaume-Uni), en précisant que cette méthode a a priori été développée pour l'étude des risques d'inondation hors effets de rupture barrage. Cette méthode se positionne à mi-chemin entre les méthodes les plus globales et empiriques (méthodes de Graham et de Dekay & McClelland⁶ développées par l'USBR depuis les années 80), et des méthodes plus sophistiquées récentes à base de simulation dynamique du comportement des personnes (comme les méthodes *Life_Sim* et *Life_Safety_Model* développées respectivement par l'USACE et BC-Hydro / HR-Wallingford). On pourra se référer à [9] pour une description synthétique de l'ensemble de ces méthodes, à [10] et [11] pour des détails sur la méthode *Flood Risk-to-People*.

La méthode *Flood Risk-to-People* vise à calculer parmi une population exposée (P), le nombre de blessés et de décès en fonction de quelques paramètres décrivant le comportement des personnes (capacités de réaction), leur environnement (occupation du sol, système d'alerte, ...) et l'intensité de l'inondation (conditions hydrauliques), comme le décrit la figure suivante :

⁶ Ces méthodes ne tiennent pas compte des paramètres hydrauliques locaux (hauteur et vitesse), ce qui ne permet pas d'évaluer finement l'effet d'un nouvel évacuateur conforme à l'arrêté



avec :

- h : hauteur d'eau (m)
- v : vitesse de l'écoulement (m/s)
- F_d : facteur de débris, compris entre 0 et 1, et fonction de la hauteur d'eau et du potentiel de production d'embâcles du bassin (cf. Tableau 1).
- Z (zone de danger), délimitée par : cinétique d'apparition du scénario d'inondation + occupation du sol + système d'alerte (cf. Tableau 2)
- V : % de personnes âgées de plus de 75 ans + % de personnes handicapées ou ayant une maladie grave

L'évaluation des victimes passe par la quantification d'un indicateur d'aléa ou de danger D :

$$D = h \cdot (v + 0,5) + F_d \quad (\text{Équation 1})$$

et les conséquences sur une population P exposée à l'onde de submersion (occupants des lieux considérés) s'expriment en fonction de D, Z et V par :

$$N_{\text{blessés}} = P \cdot D \cdot 2V \cdot Z / 100 \quad (\text{Équation 2})$$

$$N_{\text{décès}} = N_{\text{blessés}} \cdot 2D / 100 \quad (\text{Équation 3})$$

P peut représenter les occupants d'un bâti donné (logement, ERP, entreprises) soumis à un ensemble homogène de conditions hydrauliques et d'environnement. Cela peut par exemple correspondre au nombre moyen de résidents par logements selon les données INSEE communales ou infra-communales (zones IRIS). Dans ce cas, P prend des valeurs non entières qu'il convient de conserver telles quelles, sans arrondis : la somme des résultats sur un grand nombre de logements donnera un total cohérent qui lui pourra être arrondi.

Ces mêmes données INSEE peuvent également fournir des valeurs communales pour le paramètre V. D'autres sources d'informations peuvent être utilisées à condition d'être correctement référencées.

Hauteur d'eau	Pâturages / terres arables	Forêt	Urbain
0 à 0,25 m	0	0	0
0,25 à 0,75 m	0	0,5	1
h > 0,75 m et/ou v > 2 m/s	0,5	1	1

Tableau 1 – Valeurs du facteur de débris F_d

Certaines des méthodes, dont la méthode *Risk-to-People*, peuvent tenir compte de la possibilité d'une alerte aux populations. Les résultats peuvent en effet différer considérablement suivant qu'une anticipation et une alerte sont possibles.

	zone de risque faible	zone de risque moyen	zone de risque fort
	1	2	3
Cinétique d'apparition	très graduelle (plusieurs heures)	graduelle (autour d'1h)	rapide
Occupation du sol	appartements sur plusieurs étages	zone résidentielle (maison à deux étages), commerces et industrie	bungalows, mobile homes, routes à fort trafic, parcs, écoles de plain-pied, campings...
Système d'alerte	système d'alerte inondation et plans d'évacuation testés et éprouvés	système d'alerte inondation limité	aucun système d'alerte inondation

Tableau 2 – Tableau de détermination du facteur Z (zone de danger)

Dans le cadre des études pilotes restituées dans le présent guide (cf. § suivants), seuls les résultats obtenus avec la méthode *Flood Risk-to-People* ont été analysés. Comme déjà indiqué, d'autres méthodes d'évaluation des dommages aux personnes peuvent être testées (USBR-RCEM, Jonkman, ... - voir [20] et [21]), et la sensibilité des résultats au choix de la méthode constituera un élément de retour d'expérience à intégrer dans une version ultérieure de ce guide.

6. Détermination des dommages aux biens (Etape D4)

6.1. Périmètre typologique et géographique de comptabilisation : périmètres de base et réduit. Evolution dans le temps

Les enjeux matériels relatifs aux biens à considérer sont ceux répertoriés au § 3.3.2. Concernant le périmètre géographique des enjeux, les mêmes éléments que ceux développés au § 5.1 peuvent être utilisés pour définir puis réduire le périmètre de comptabilisation des dommages, lorsque l'influence de l'incrément d'aléa devient insignifiante.

Les dommages à ces enjeux matériels doivent suffire à pouvoir justifier ou non l'investissement nécessaire pour une mise en conformité du barrage.

Sont *a priori* exclus des dommages à comptabiliser :

- Les dommages au barrage lui-même ;
- Les dommages aux surfaces cultivées ;
- Les dommages à l'environnement ;
- Les dommages au patrimoine culturel.

En effet, concernant les dommages au barrage lui-même, le but de la présente analyse est de s'assurer que les maîtres d'ouvrage des barrages garantissent un niveau de sécurité satisfaisant vis-à-vis des tiers. L'analyse doit rester ciblée sur un périmètre de comptabilité des enjeux "sûreté" (cf. §.1.4).. La méthode doit donc révéler l'équilibre, ou le déséquilibre, d'une « équation de la sûreté » mesurant, d'une part les gains en sécurité induits par une mise en conformité à de nouveaux critères de référence, et d'autre part le coût et l'effort de cette mise en conformité. Inclure le coût des dommages au barrage lui-même (coût de réparation ou de reconstruction) ouvre l'analyse sur un champ de comptabilité élargi au-delà de l'équation de la sûreté » précitée, et pose alors la question de l'équilibre économique de l'aménagement.

Cette question du bouleversement potentiel de l'équilibre économique d'un aménagement induit par la nécessité d'une mise en conformité est un vrai sujet en soi, mais qui sort de l'analyse de sûreté. Elle relève d'un autre débat, complémentaire, pour évaluer la pertinence d'un investissement au titre de la sûreté au regard de la viabilité de l'activité économique que l'ouvrage dégage. On précise aussi que le coût de réparation ou de reconstruction peut être très complexe à évaluer, ou très variable selon la réalité du mode de rupture de l'ouvrage en cas de défaillance en crue.

En conséquence, les dommages au barrage lui-même, dus à une perte totale ou partielle de l'ouvrage en cas de ruine, ne sont donc pas intégrés à l'analyse.

Selon les méthodes nationales en vigueur, les dommages aux surfaces cultivées supposent des calculs complexes faisant intervenir une cartographie spécifique à la parcelle et de nombreux paramètres hydrauliques (hauteur d'eau, vitesse de courant, durée de submersion) à des résolutions exigeantes (vitesses par tranche de 0,5 m/s, durée à la journée près, ...). C'est pourquoi dans une première approche il n'est pas recommandé d'inclure les surfaces cultivées dans le calcul. Seuls des cas très spécifiques, où l'agriculture joue un rôle particulièrement prépondérant dans l'économie de la vallée impactée par la rupture du barrage (en particuliers pour les vignes, les arbres fruitiers, les maraîchages et les cultures sous serres), peuvent conduire à intégrer les surfaces cultivées dans l'évaluation des dommages, en simplifiant si besoin la méthode.

Le milieu naturel et le patrimoine culturel n'ont pas fait jusqu'alors l'objet de méthodes éprouvées de monétarisation des dommages en crue. Ces enjeux doivent toutefois être cités dans l'analyse pour une bonne compréhension d'ensemble des impacts d'une rupture du barrage. De façon générale, l'ensemble des enjeux non monétarisés peut être intégré à l'analyse si cela permet une compréhension plus fine du territoire impacté.

Lorsque les dommages sont fortement portés par un ou deux biens singuliers du territoire, il est important de le faire apparaître, voire de présenter des évaluations des critères d'acceptabilité (cf. § suivants) avec et sans prise en compte de ces biens spécifiques, pour en révéler leur importance.

Enfin, on précise, comme pour l'évaluation des dommages aux personnes, que l'évaluation est conduite pour la situation actuelle d'occupation du territoire, correspondant aux données disponibles.

Sauf cas très particulier qui le justifierait, on n'intègre pas d'hypothèses ou de scénario d'évolution de l'occupation du territoire. On estime que la fréquence des révisions d'analyse de risque (typiquement, rythme décennal des études de dangers) est compatible avec la prise en compte d'évolution significative de l'occupation du territoire, qui justifierait une remise en cause des évaluations de dommages réalisées précédemment. De même, les valeurs unitaires servant à l'évaluation économique sont jugées constantes. Ils pourraient si nécessaire être révisés lors d'une mise à jour des études.

6.2. Principes de l'évaluation économique des dommages aux biens

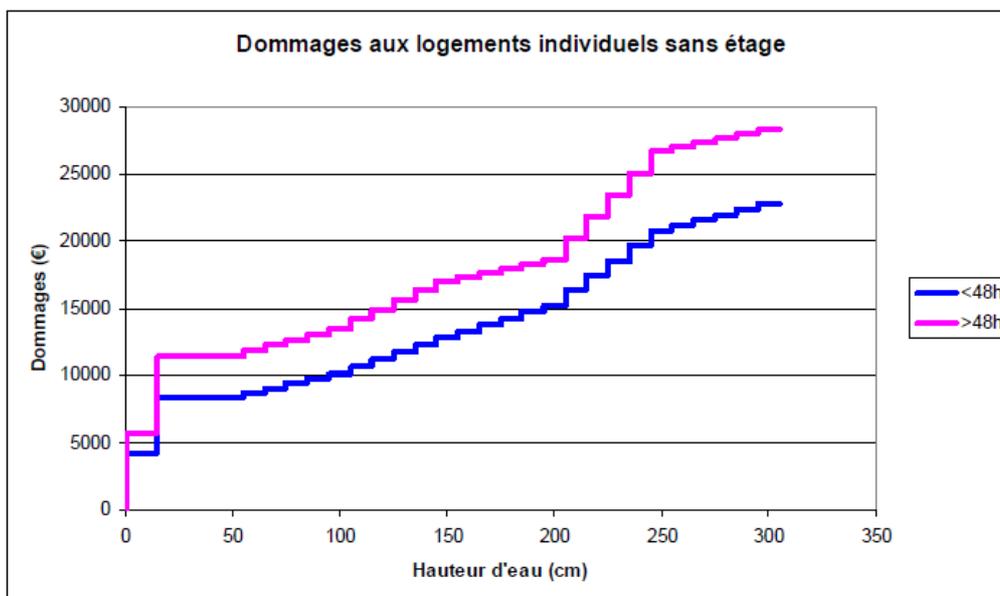
L'objectif ici est de déterminer, selon une approche explicitement économique, les dommages *monétaires* aux biens pour chaque cas de dimensionnement (dimensionnement actuel D0, ou dimensionnement mis en conformité D_reg), pour des cas réalistes de comportement (avec ou sans rupture) et pour l'ensemble des crues définies par ailleurs.

Comme précisé au § 2.1, la présente approche incite prioritairement à employer les méthodes de calculs des dommages déjà préconisées au plan national dans le domaine de la gestion du risque inondation. En particulier le guide [8] du CGDD fournit un ensemble de recommandations sur l'identification des enjeux et le calcul des dommages en crue à travers des *fonctions de dommages*.

Une fonction de dommages, telle que définie par le guide [8], est « définie pour un enjeu (logement, entreprise, établissement public, activité agricoles,... - cf. §.6.1), qui associe aux paramètres hydrologiques et/ou hydrauliques de l'inondation le montant en valeur absolue induits par l'inondation de l'enjeu. » Les paramètres les plus fréquents sont la hauteur maximale de submersion et dans une moindre mesure la saisonnalité, la durée de submersion, la vitesse des écoulements, la cinétique de l'inondation (rapide ou lente).

Le guide [8] définit quatre catégories de fonctions de dommages moyennes nationales : les logements, les entreprises, les établissements publics et les activités agricoles.

On donne à titre d'exemple sur le graphique suivant la fonction de dommages économiques aux logements individuels sans étage, exprimée en €₂₀₁₁/logement :



Certaines fonctions sont typiquement exprimées par unité d'enjeu (cas de catégories de logements individuels), ou par unité de surface d'enjeu (cas d'autres catégories de logements individuels, ou des établissements publics).

Ces fonctions de dommages sont disponibles pour les inondations (et les submersions marines, non concernées ici) sous la forme de fichiers EXCEL pour les quatre classes d'enjeux, sur le site du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable via le lien suivant (à la date de rédaction du présent guide) : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Analyse-multicriteres-des-projets.html>.

La dernière mise à jour date du mois de novembre 2014. Ces fonctions ont vocation à être actualisées régulièrement pour tenir compte de l'évolution de la valeur des enjeux.

À travers ces *fonctions de dommages* qui expriment le montant des pertes en €HT en fonction des caractéristiques de l'aléa hydraulique (hauteur, vitesse, ...) et des propriétés de l'enjeu (type et taille du logement, de l'entreprise, ...), le calcul des dommages permet d'aboutir à la quantification d'un **Damage Evité Moyen Annuel** (DEMA) qui exprime l'impact du scénario considéré sur l'ensemble des enjeux du périmètre touché par l'onde de rupture (voir Figure 8). L'intégration sur l'échelle de probabilité annuelle, et les comparaisons entre cas de dimensionnement et de comportement du barrage, permettent alors de mener l'ACB complète.

Par symétrie avec l'évaluation des dommages aux personnes, le *DMA_ref* correspond à l'évaluation économique des dommages (*Dommages Moyens Annuels*) dans la situation de référence telle que décrite au principe 3 (cf. § 2.1), c'est-à-dire avec un dimensionnement d'ouvrage *D_reg* conforme aux exigences nominales.

De même que pour l'évaluation des dommages aux personnes, on considérera des évaluations identiques de dommages pour des crues dont les lignes d'eau sont très proches.

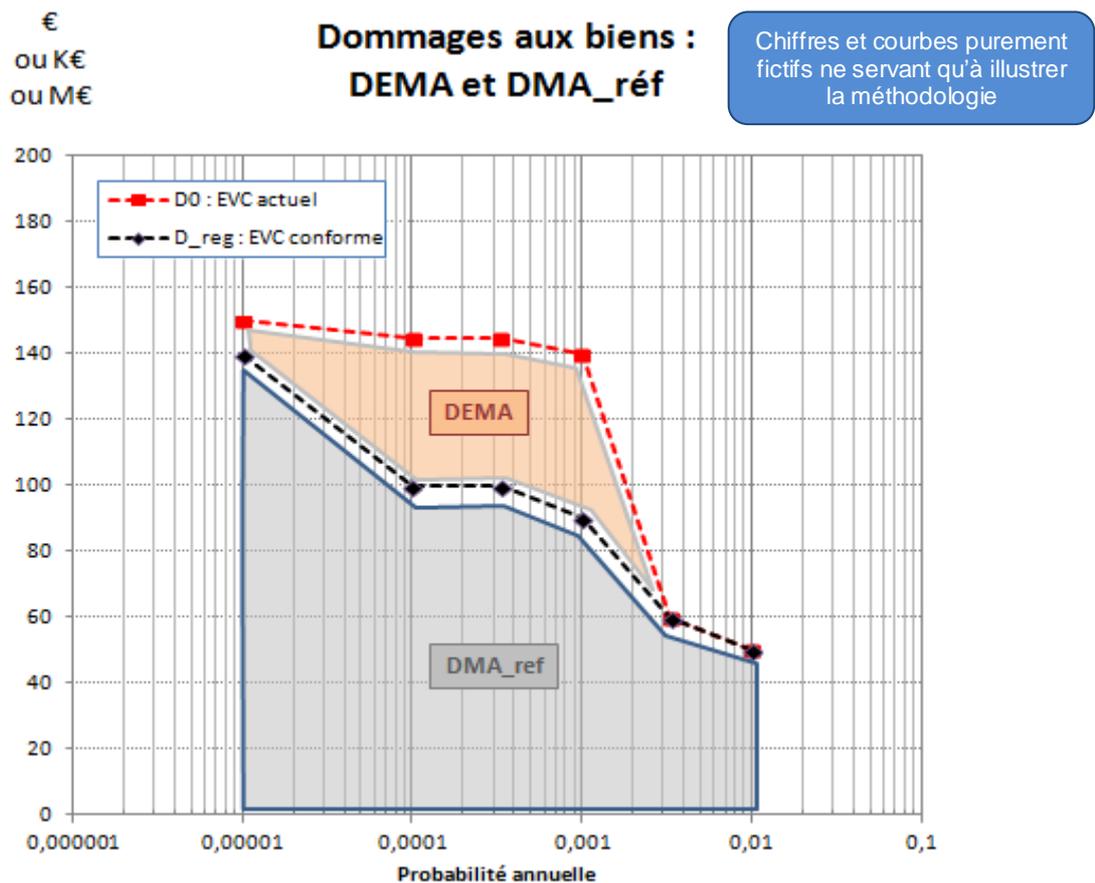


Figure 8 – Evaluation des dommages aux biens pour chaque période de retour des crues et détermination du DEMA

6.3. Calculs (économiques) des dommages aux biens

L'application des fonctions de dommages issues de [8] doit déboucher sur un montant qui doit être livré pour chaque scénario (crue/dimensionnement/comportement) et par catégorie d'enjeux.

Le Tableau 3 et la Figure 9 qui suivent, donnent une présentation type qui facilite la suite de la méthode. Une cartographie des enjeux impactés par le scénario le plus défavorable illustre le niveau de vulnérabilité de la vallée impactée. Cette cartographie est réalisée à l'échelle 1/25.000^{ème} ou plus précise.

Les enjeux mis hors d'eau sont mis en évidence (entourés d'un cercle, d'un triangle ou d'un carré) et les dommages évités grâce à la mise en conformité sont représentés par un dégradé de couleurs. Le maître d'ouvrage reste libre de proposer toute autre représentation iconographique plus adaptée aux vallées étudiées.

Pour les études pilotes réalisées dans le cadre des travaux du GT, le recours aux outils SIG⁷ a été quasi-systématique, chaque responsable d'étude ayant développé ses propres algorithmes de post-traitement.

Crue (T, ans)	hypothèse sur le barrage	Logements	Entreprises	Usines AEP	Total
100	sans rupture	3 348 228 €	17 921 978 €	0 €	21 270 206 €
300	rupture	7 478 060 €	51 047 920 €	3 550 000 €	62 075 979 €
500	rupture	9 347 637 €	53 877 782 €	3 550 000 €	66 775 419 €
1000	rupture	11 094 896 €	60 073 443 €	3 550 000 €	74 718 339 €
3000	rupture	14 558 874 €	65 974 511 €	3 550 000 €	84 083 385 €
10000	rupture	16 020 763 €	68 624 199 €	3 550 000 €	88 194 962 €
33333	rupture	22 358 491 €	75 178 506 €	3 550 000 €	101 086 996 €

Tableau 3 – Exemple de présentation des dommages⁸ pour un barrage dans son état actuel (étude pilote 2)

6.4. Cohérence avec les outils de gestion territoriale du risque inondation

Le maître d'ouvrage du barrage peut trouver des éléments sur les enjeux vulnérables dans les différents outils de gestion du risque utilisés par les services de l'Etat et les collectivités territoriales, comme les PPRI, TRI, PAPI, PCS et plans ORSEC - voir glossaire en fin de document. Toutefois les périmètres de ces outils couvrent rarement l'enveloppe des crues extrêmes considérées ou des ondes de rupture du barrage. Les PPRI sont basés sur une crue centennale, ou sur une crue plus importante si elle s'est déjà produite. Les TRI fournissent une analyse de vulnérabilité jusqu'à la crue millénaire. Les PAPI visent des niveaux de protection pour des crues souvent moins importantes que la crue centennale.

Les Plans Particuliers d'Intervention (PPI) des barrages dont les zones recouvrent celles de la vallée étudiée sont bien entendu une autre source d'information précieuse quand ils existent.

⁷ SIG : Systèmes d'Information Géographique

⁸ La colonne « établissements publics » a été ici remplacée par « usines AEP » pour s'adapter au contexte local

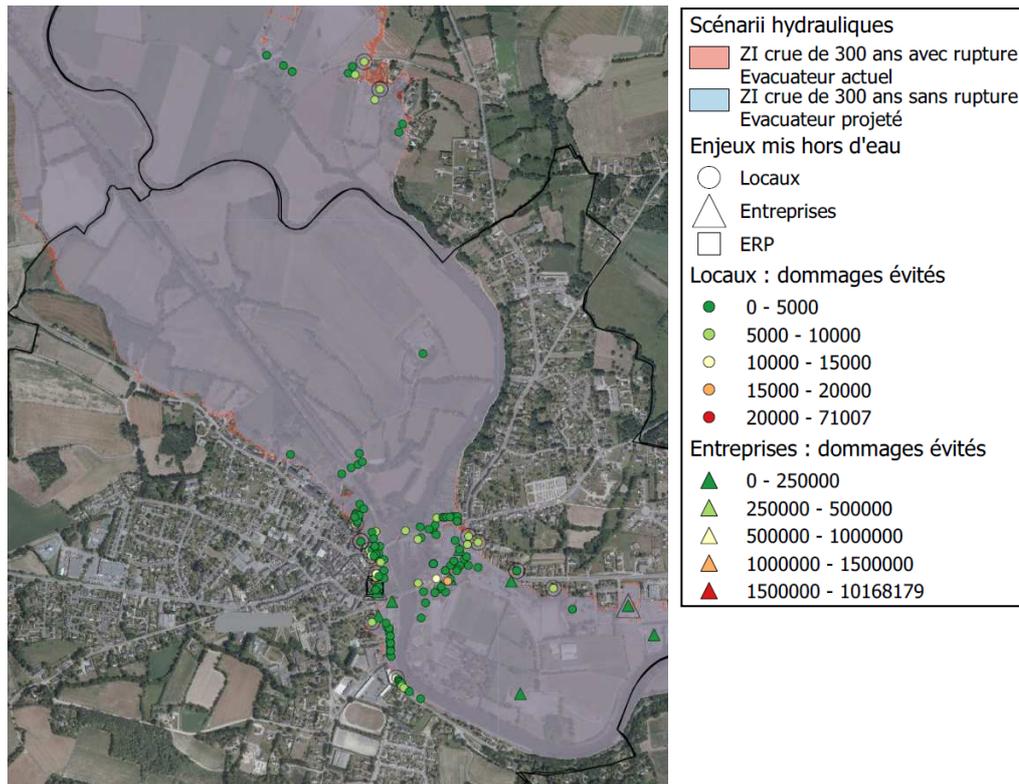


Figure 9 – Exemple de rendu cartographique (ISL, d'après étude de cas)

7. Critères d'acceptabilité (Étapes D5 et D6)

Au vu des conclusions obtenues à l'issue des travaux et des résultats des études pilotes (voir chapitre 8), il est apparu difficile, pour un sujet aussi novateur, aussi complexe et potentiellement sensible et clivant que celui traité dans le présent guide, d'imposer *de facto* des critères arrêtés et figés pour juger de l'importance des dommages (incrémentaux), et de la disproportion entre les coûts de mise en conformité des ouvrages d'une part, et les bénéfices pour la sûreté (dommages évités) d'autre part.

C'est pourquoi la présente version du guide se fixe comme objectif de proposer un ensemble de critères, dont la vision d'ensemble devra dégager la possibilité d'une dérogation.

7.1. Critères pour les dommages aux personnes : étape D5 et critère(s) associé(s)

Trois options sont identifiées et ont été testées pour la détermination de critères d'acceptabilité ou de tolérabilité associés à l'évaluation des dommages aux personnes :

Option 1 : comparer, pour chaque probabilité de scénario simulé, les valeurs d'incrément de dommages aux personnes ΔN (incréments de victimes), à des valeurs / courbes seuils de tolérabilité F - N issues de références (tirées par exemple de [6] ou [12]) – voir courbes F-N sur la Figure 10 à titre d'exemple. Ces courbes font généralement apparaître :

- un domaine de risque acceptable (bas-gauche de la Figure 10)
- un domaine de risque jugé non-acceptable (haut-droite de la Figure 10)
- un domaine dit ALARP, où l'acceptabilité est à apprécier au regard d'autres critères, par exemple des critères de proportionnalité (selon approches ACB).

Il est également important de mentionner que :

- (i) L'élaboration de ces courbes de tolérabilité correspond aux risques de rupture d'ouvrage sans référence à un initiateur « crue » ; en ce sens, l'applicabilité de ces courbes de référence à l'appréciation de risques *incrémentaux* est questionnable ;
- (ii) Le groupe de travail auteur du présent guide n'a pas pu retrouver d'applications opérationnelles de ces références internationales, qui aient par exemple conduit à adapter le niveau de dimensionnement de l'ouvrage – et de l'évacuateur de crue – à la réalité du risque encouru en cas de rupture.

Option 2 : convertir économiquement les NEMA en DEMA, en attribuant une valeur économique à la perte de vie humaine, via le concept de *Valeur de Vie Statistique* (VVS, cf. glossaire) ou encore *Valeur Statistique de Vie Humaine*. La VVS est estimée de l'ordre de 3 millions d'euros actuellement en France - cf. [7]. Cette option correspond à la pratique déjà ancienne dans certains secteurs, notamment les décisions d'investissement relatives aux infrastructures de transport routier, ou encore dans le domaine de la santé publique [15]. Malgré son caractère un peu « froid », elle présente l'avantage de pouvoir comparer des scénarios entre eux sur une base claire et homogène. Le GT-CFBR a d'ailleurs échangé avec des experts économistes externes – cf. Annexe, pour confirmer la pertinence du recours à la VVS dans le cadre d'application qui nous concerne. C'est pourquoi les études pilotes dont la synthèse des résultats est produite au chapitre suivant, fournissent :

- une évaluation du DEMA sans intégrer la VVS ;
- une évaluation du DEMA avec intégration de la VVS : le DEMA s'ajoute au NEMA convertit en euros par l'utilisation de la VVS.

Le test de cette option dans le cadre des études pilotes a concerné la valorisation économique des victimes (décès), mais pas des blessés.

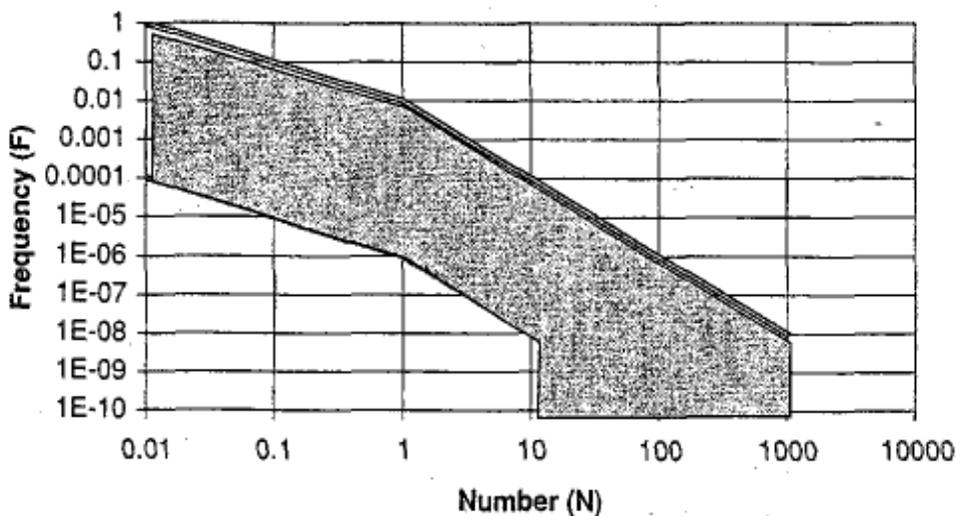
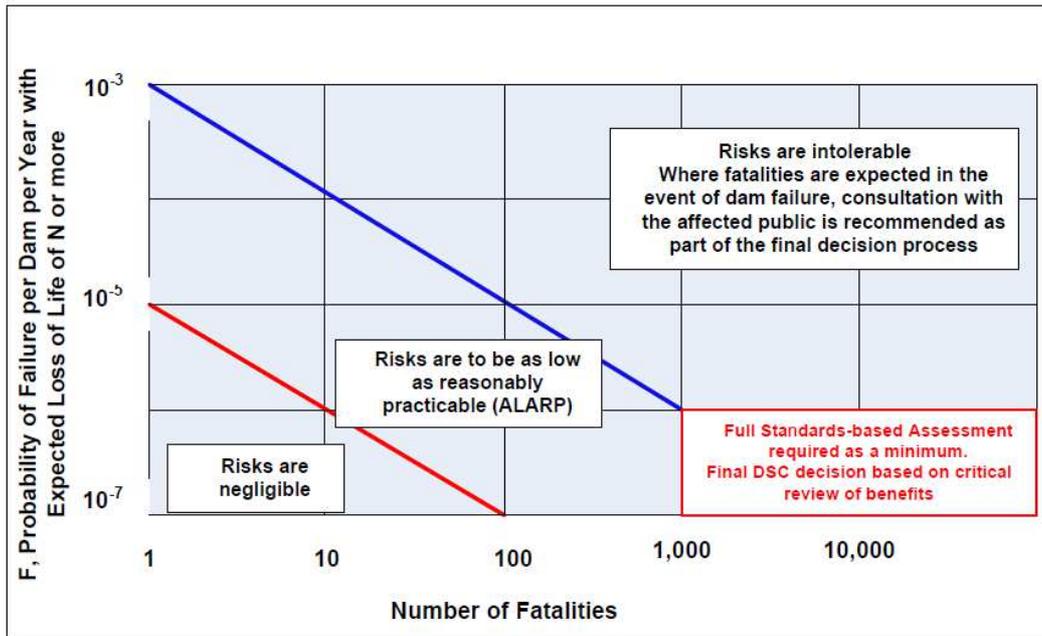


Figure 10 – Exemples de courbes de tolérabilité – tirées de [12], [16], [17]

Option 3 : à mi-chemin entre l'option 1 et l'option 2, le critère correspondant à cette option s'exprime via un ratio de coût d'investissement annualisé par vie humaine sauvée (en moyenne annuelle). Dit autrement, il s'agit de rapporter le coût d'investissement par vie sauvée, en moyenne annuelle. Il s'agit à ce stade d'un critère de proportionnalité.

$$R_1 = \frac{C_a}{NEMA} \quad (\text{Équation 4})$$

avec :

- C_a : coût annualisé de la mise en conformité (investissement et maintenance compris) – c'est-à-dire le coût actualisé sur la durée 50 ans, divisé par 50.

Une variante consiste à remplacer C_a par le coût net ($C_a - B_a$), où B_a est le bénéfice annualisé.

Le critère R_1 s'exprime en euros / vie sauvée. Il est homogène à la VVS.

La profession du bâtiment en Suisse a proposé, dans le cadre de l'évolution de la réglementation parasismique des bâtiments existants, des valeurs guides pour ce ratio, permettant de juger du caractère disproportionné de l'investissement. Les valeurs seuils de « disproportionnalité » varient, selon les cas, entre 10 et 100 millions de francs suisses par vie sauvée (voir réf. [13]).

Le comité Australien ANCOLD a également produit des recommandations et propose les valeurs seuils pour ce critère, correspondant à différents niveaux de justification d'une mise en conformité pour le domaine ALARP :

- Mise en conformité fortement justifiée : si $0 < R_1 < 1,5$ millions \$
- Mise en conformité raisonnablement justifiée : si $1,5 < R_1 < 6,0$ millions \$
- Mise en conformité moyennement justifiée : si $6 < R_1 < 30$ millions \$
- Mise en conformité faiblement justifiée : si $R_1 > 30$ millions \$

7.2. Critères pour les dommages aux biens : étape D6 et critère(s) associés

Il a été adopté ici les principes fixés par les pouvoirs publics dans [7]. La pertinence économique de la mise en conformité, et le caractère proportionné ou disproportionné de l'investissement associé, sont évalués par la détermination d'une *Valeur Actuelle Nette* à un horizon de temps de N années (VAN_N) du « projet de mise en conformité » :

$$VAN_N = -C_0 + \sum_{i=1}^N \frac{1}{(1+r_i)^i} (DEMA - C_i) \quad (\text{Équation 5})$$

dans laquelle :

- C_0 représente le coût d'investissement initial des travaux de mise en conformité de l'EVC ;
- DEMA : représente les « bénéfices » annuels – montants annuels des dommages évités – dégagés par la mise en conformité des ouvrages ;
- C_i : représentent les éventuels surcoûts de maintenance et d'entretien de l'année i , induits par la mise en conformité ;
- N : correspond à l'horizon de temps en années pour le calcul de la V.A.N. ; le guide [7] préconise $N = 50$ ans ;
- r : le taux d'actualisation annuel ; le guide [7] préconise, pour l'objectif économique visé ici, un taux annuel d'actualisation de 2,5 %.

Le critère d'acceptabilité des dommages (incrémentaux) aux biens s'exprime alors de la façon suivante :

- si le temps T (en années) qui annule et rend positive la V.A.N. descend bien en-deçà de 50 ans, alors le projet de mise en conformité est jugé pertinent au regard de l'analyse économique des dommages aux biens : la dérogation ne serait donc pas envisageable.
- si le temps T (en années) qui annule et rend positive la VAN porte bien au-delà de 50 ans, alors le projet de mise en conformité est jugé NON pertinent ou NON « rentable » au regard de l'analyse économique des dommages aux biens et de l'« équation de la sûreté » qu'elle quantifie : la dérogation est donc envisageable.

Cette appréciation du critère à 50 ans doit être précisée et nette : on ne considérera pas qu'un projet est « rentable » parce que $T = 49$ ans (et donc pas de dérogation possible), ni a contrario qu'il devient « non rentable » si $T = 51$ ans (et donc dérogation devenue possible).

8. Applications sur des études pilotes et enseignements

Trois études pilotes ont été mises en œuvre dans le cadre des travaux du GT-CFBR, chacune présentant des caractéristiques d'ouvrages et de vallées bien distinctes, dont les noms sont volontairement omis dans le présent guide pour des raisons de confidentialité :

- Un barrage mobile en rivière de classe B sur un grand fleuve (étudié par CNR) ;
- Un barrage capacitif de classe C - voire B - sur un cours d'eau dans l'ouest de la France (étudié par ISL) ;
- Un barrage mobile en rivière de classe B sur une rivière importante (étudié par EDF).

Les détails techniques de chacune de ces études pilotes constitueraient un ensemble d'informations bien trop volumineux pour être restitué de façon digeste dans le présent document. Par ailleurs, le caractère confidentiel des informations relatives à ces études pilotes limitent, pour le CFBR, la possibilité d'en divulguer des détails. Des rapports internes à chaque organisation ayant conduit ces études pilotes ont été produits pour tracer le déroulement des études. A noter toutefois que l'étude pilote 2 ci-dessus menée par le bureau ISL a fait l'objet d'un article spécifique publié et disponible via la référence [19].

Pour autant, et avec l'accord des Maîtres d'Ouvrage concernés, il est possible de tirer de ces études pilotes, et c'était un objectif essentiel partagé par les membres du GT, des premiers enseignements génériques précieux permettant de qualifier la méthode.

8.1. Concernant les critères de dommages aux biens (DEMA, ...)

On fournit sur les graphiques des figures suivantes les courbes d'évaluation des dommages aux biens (estimation économique du DEMA), pour chaque probabilité de crue examinée, et pour chaque configuration de dimensionnement (D0 en rouge ; D_reg en vert ; et le delta entre les deux en bleu). L'intégrale de la courbe en bleu fournit le DEMA.

Détermination du DEMA de l'étude pilote 1 :

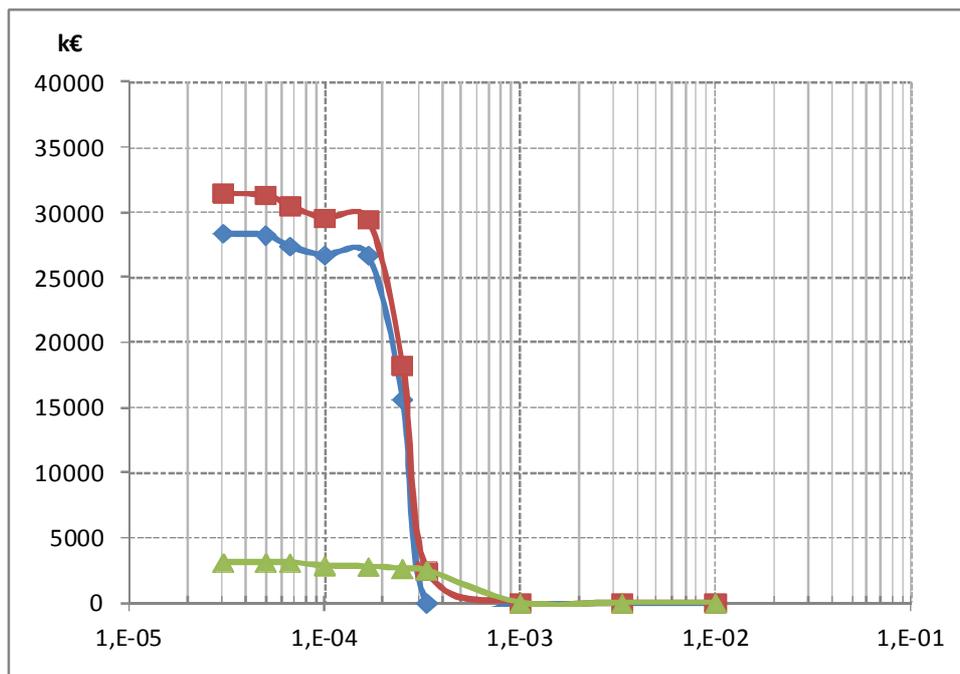


Figure 11 – Etude pilote n°1 : estimation des dommages aux biens pour chaque scénario simulé, et du DEMA (en vert : D_reg ; en rouge : D0 ; en bleu : delta entre D0 et D_reg)

Détermination du DEMA de l'étude pilote 2 :

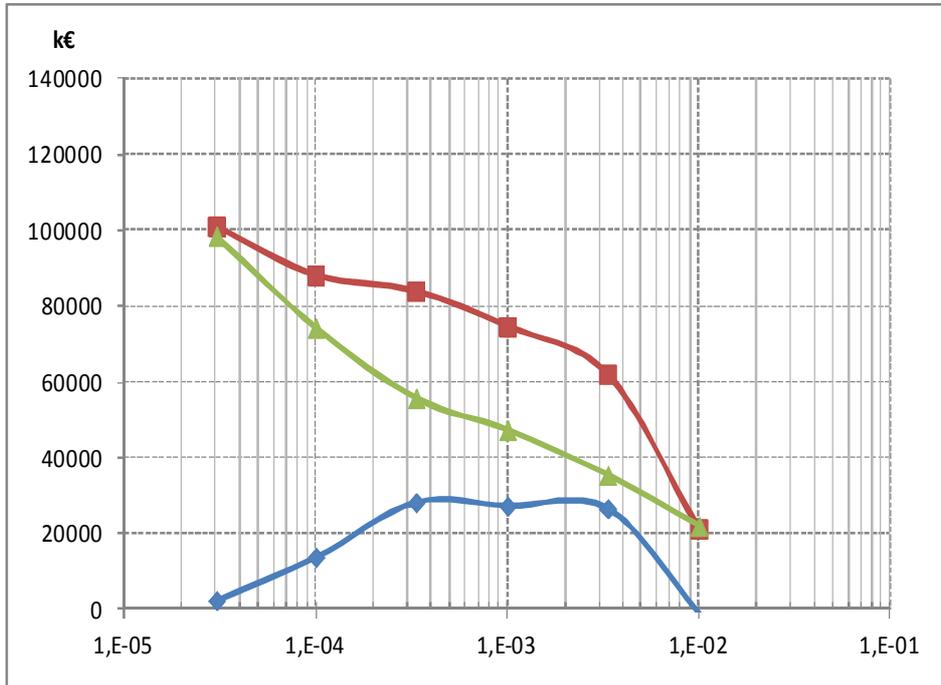


Figure 12 – Etude pilote n°2 : estimation des dommages aux biens pour chaque scénario simulé, et du DEMA (en vert : D_reg ; en rouge : D0 ; en bleu : delta entre D0 et D_reg)

Détermination du DEMA de l'étude pilote 3 :

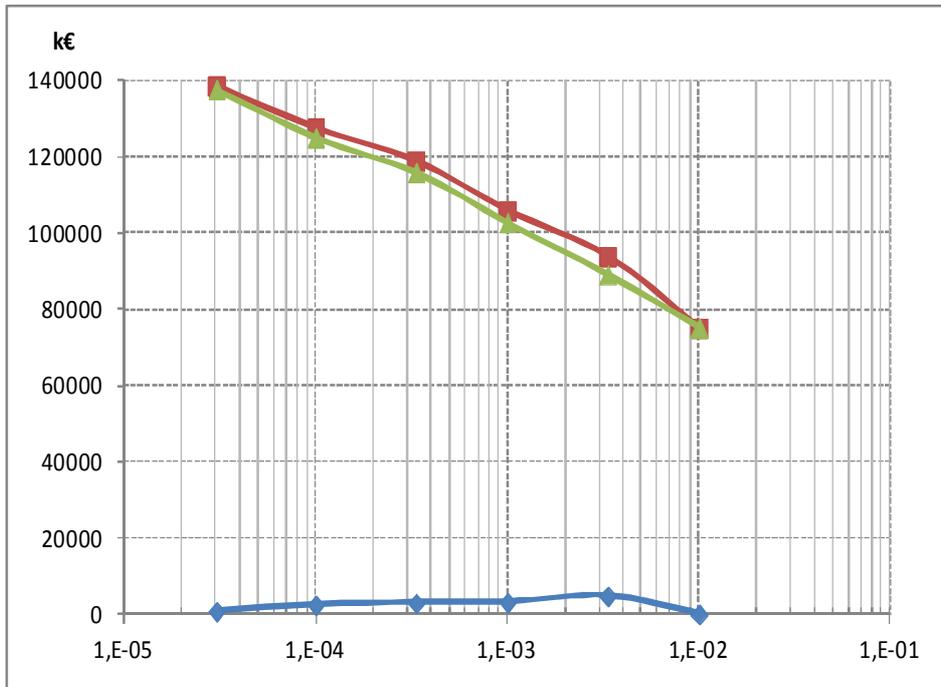


Figure 13 – Etude pilote n°3 : estimation des dommages aux biens pour chaque scénario simulé, et du DEMA (en vert : D_reg ; en rouge : D0 ; en bleu : delta entre D0 et D_reg)

Chaque étude pilote a aussi consisté à évaluer le coût d'une mise en conformité pour un dimensionnement D_reg. Ces estimations ont permis de quantifier le critère de VAN à 50 ans. Les résultats sont rassemblés dans le Tableau 4.

	DEMA (en € / an)	VAN à 50 ans (en €)
Etude pilote 1	7 000	- 73 250 000
Etude pilote 2	169 000 (*)	+ 3 650 000
Etude pilote 3	28 000	- 11 170 000

Tableau 4 – Synthèse des évaluations des DEMA et des VAN à 50 ans pour les 3 études pilotes

- les DEMA sont très différents d'une vallée à l'autre. Les résultats de calcul pour les 3 études pilotes sont respectivement de 7 000, 169 000 et 28 000 euros/an.
- (*) Pour l'étude pilote 2, un unique enjeu du territoire pèse significativement sur la valeur du DEMA ; en retirant cet enjeu, le DEMA initial de 169 000 euros/an est ramené à 109 000 euros/an. La structure des dommages évités mérite d'être commentée afin d'identifier les situations où le résultat de l'ACB est très fortement influencé par un ou plusieurs enjeux isolés.
- l'une des études pilotes (n° 2) aboutit à un critère de V.A.N. positif avant l'horizon de 50 ans, ce qui signifie que le projet de mise en conformité conduit à un gain de sécurité jugé intéressant ou « rentable » sur le plan économique, et donc que la dérogation ne serait a priori pas envisageable au regard de ce critère ;
- à l'inverse, les deux autres études pilotes présentent des V.A.N. très largement négatives à 50 ans, voire même à l'infini – cf. illustration sur la Figure 14 : la V.A.N. à l'infini pour le cas présenté est négative et vaut environ -10,850 millions d'euros. Dans ces deux cas, la possibilité de dérogation serait donc ouverte au regard de ce critère économique.

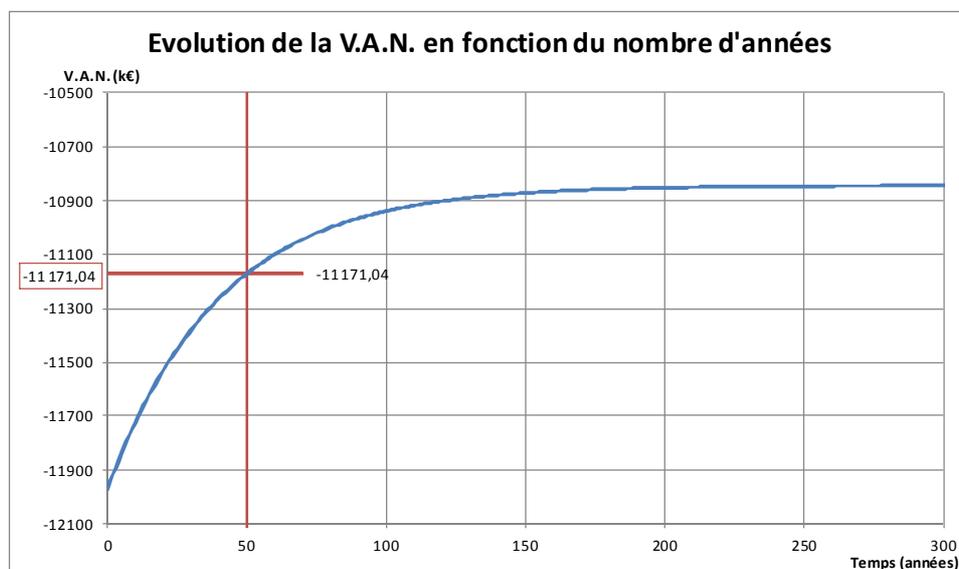


Figure 14 – Exemple d'évolution de la V.A.N. en fonction du temps pour l'étude pilote 3

8.2. Concernant les critères de dommages aux personnes (NEMA, ...)

Test de l'option 1 : comparaison à des seuils d'acceptabilité / tolérabilité

On fournit sur les figures suivantes les résultats relatifs aux évaluations des dommages aux personnes (estimation des victimes et des incréments de victimes).

En premier lieu, on donne sur la Figure 15 pour les 3 études pilotes les évaluations du nombre de victimes (en ordonnée) pour les configurations de dimensionnement D0 et D_reg, et ce en fonction du niveau de probabilité associé aux crues simulées (en abscisse) :

- D0 : courbe en rouge
- D_reg : courbe en vert
- le delta ou l'incrément entre les configurations D0 et D_reg : courbe en bleu.

L'intégrale sur l'échelle de probabilité de la courbe en bleu quantifie le NEMA.

Le comportement de ces courbes pour l'étude pilote 1 est un peu singulier. En effet, pour cet aménagement BMR d'un grand fleuve Français, la mise en conformité revient à annuler tout risque d'inondation en amont par une rehausse de digues d'encagement, les enjeux aval sous influence de l'incrément d'aléa en cas de rupture étant extrêmement limités. C'est pourquoi les courbes rouge et bleue sont confondues sur la Figure 15.

Les études pilotes 2 et 3 présentent quant à elles des comportements assez analogues, avec un maximum d'incrément de dommages aux personnes (ΔN maximal) autour de la probabilité annuelle 4.10^{-4} pour l'étude pilote 2, et 10^{-3} pour l'étude pilote 3.

Les valeurs de NEMA ainsi calculées sont résumées dans le tableau :

	NEMA <i>(scénarios sans alerte)</i>
Etude pilote 1	0,001
Etude pilote 2	0,007
Etude pilote 3	0,033

Tableau 5 – Synthèse des évaluations des NEMA pour les 3 études pilotes

Les trois études pilotes aboutissent à des NEMA compris entre 0.033 et 0.001 selon les cas (nombre de vies sauvées en moyenne annuelle). La valorisation d'une alerte peut considérablement réduire l'estimation du nombre de victimes, mais pas forcément le NEMA qui, lui, quantifie un écart entre deux situations, synthétisé sur l'échelle de probabilité annuelle.

La seule évaluation du NEMA apparaît à elle seule difficile à juger en termes d'acceptabilité.

Nous avons synthétisé sur la Figure 16 les résultats des 3 études pilotes dans un repère F- ΔN avec échelles logarithmiques, tel que celui utilisé pour la proposition des valeurs et courbes correspond aux seuils de tolérabilité identifiés dans la littérature (cf. §.7.1). L'étude pilote 1 présente la meilleure « performance » aux probabilités les plus élevées.

Après réflexion, la comparaison des valeurs de ΔN aux exemples de courbes et seuils de tolérabilité cités en référence au §.7.1 apparaît d'une application opérationnelle questionnable dans le cas présent, pour trois raisons principales :

- les valeurs et courbes de tolérabilité mentionnées en référence au §.7.1 correspondent à des situations de défaillance ou rupture d'ouvrages hors crue ; ces valeurs et courbes ciblent donc

des conséquences imputables totalement et directement à la rupture, et non des incréments de conséquences qui se superposent

- de ce fait, aucune notion d'impact relatif aux dommages déjà induits par l'inondation naturelle hors rupture n'est révélée à travers ce critère ;
- enfin, le groupe de travail n'a pas pu trouver d'utilisation opérationnelle effective de ces valeurs et courbes de référence dans une décision de dimensionnement ou redimensionnement d'un barrage en exploitation ou à l'étude.

Le groupe de travail retient de ce test de l'option 1 la difficulté opérationnelle de pouvoir établir un jugement d'acceptabilité « absolu » clair à partir d'une utilisation *ex-abrupto* de courbes de tolérabilité telles que celles mentionnées au §.7.1.

Le groupe de travail recommande également sur cette question qu'une cohérence d'approche soit *in fine* recherchée avec les évaluations des études de dangers, qui positionnent les défaillances de fonctions ou d'ouvrages - les événements redoutés centraux (ERC) - dans un cadre « occurrence-gravité » qui s'apparente aux diagrammes F-N introduits aux §.7.1.

Ce point précis pourra nécessiter un travail complémentaire au sein du CFBR, en exploitant le retour d'expérience de nouvelles futures études que la profession est invitée à engager pour consolider l'approche nouvelle décrite dans le présent guide (cf. les conclusions présentées au §.9).

Test de l'option 2 : recours à la VVS dans le calcul des DEMA et de la VAN

Dans ce cas (cf. § 7.1), on valorise les dommages évités pour les personnes en valeur monétaire, grâce à la VVS. La valeur de la VAN à 50 ans avec inclusion de la VVS est donnée pour les 3 études pilotes dans le Tableau 6.

	VAN à 50 ans <u>sans</u> la VVS (en €)	VAN à 50 ans <u>avec</u> la VVS (en €)
Etude pilote 1	- 73 250 000	- 73 070 000
Etude pilote 2	+ 3 650 000	+ 4 860 000
Etude pilote 3	- 11 170 000	- 7 210 000

Tableau 6 – Synthèse des évaluations des VAN sans et avec intégration de la VVS

Sur les 3 cas, l'inclusion de la VVS ne change pas la conclusion tirée du critère de VAN à 50 ans pour les dommages aux biens :

- pour l'étude pilote 1, l'écart est infime ;
- pour l'étude pilote 2, elle renforce la conclusion d'une VAN positive ;
- pour l'étude pilote 3, la VAN reste significativement négative.

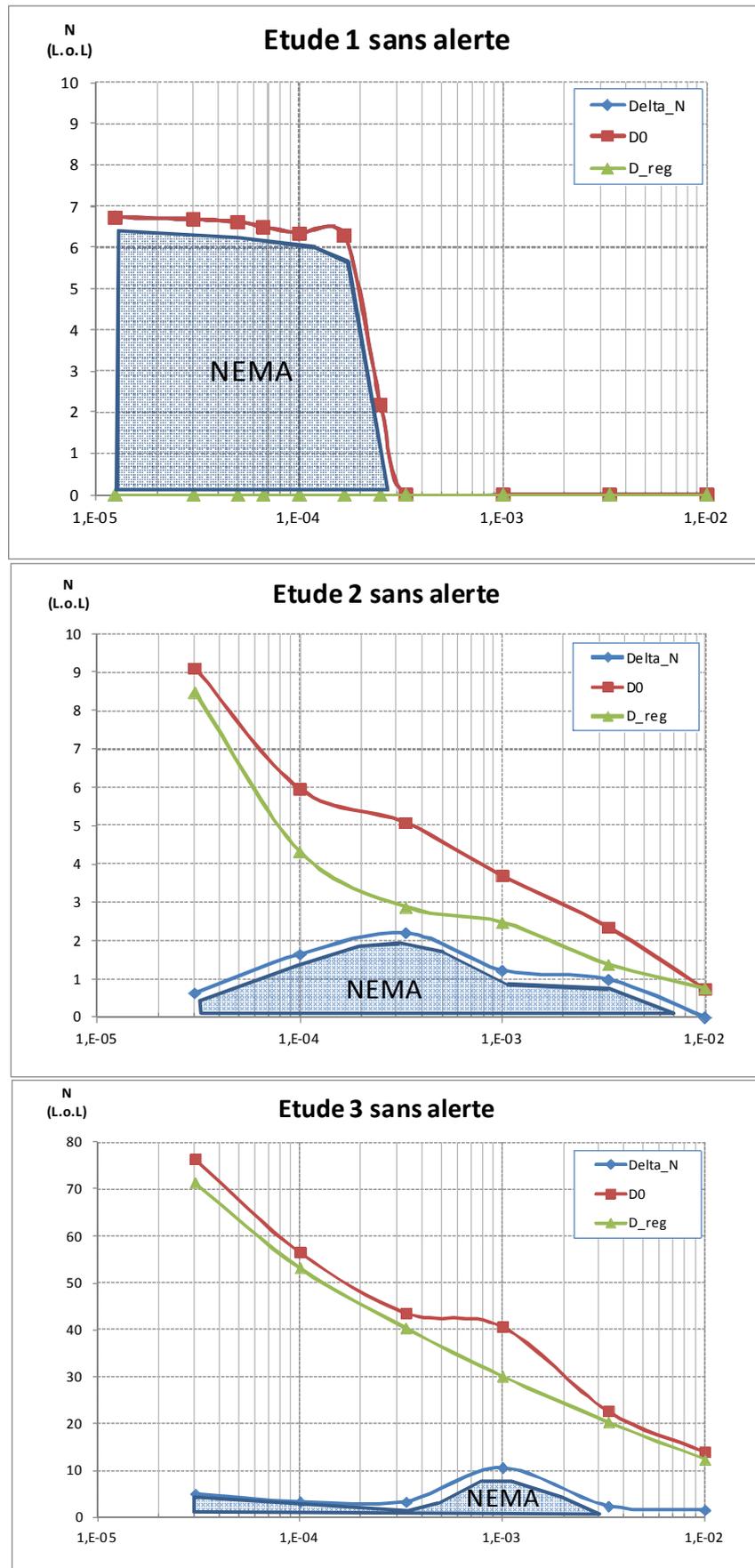


Figure 15 – Estimation des victimes et incréments de victimes pour chaque scénario simulé des 3 études pilotes (condition nocturne) - en vert : D_reg ; en rouge : D0 ; en bleu : delta entre D0 et D_reg

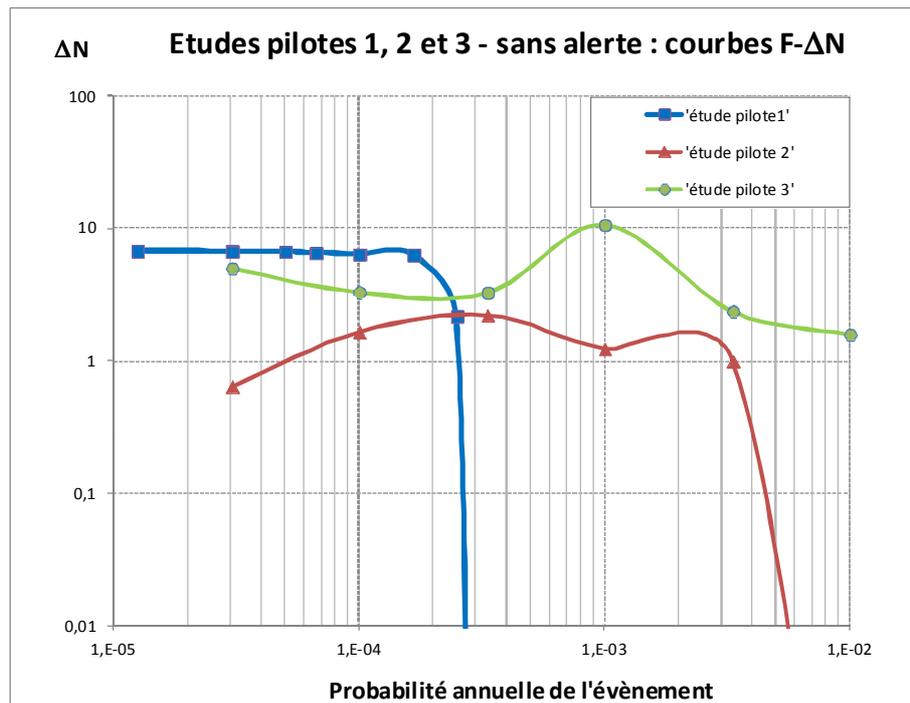


Figure 16 – Synthèse des résultats de comptabilisation des dommages aux personnes des 3 études pilotes dans un repère F- ΔN

8.3. Critères de proportionnalité

8.3.1 Ratios de proportionnalité R1 et R2 (cf. option 3)

En appliquant les principes décrits au § 7.1, et à partir des résultats des études pilotes, on peut en déduire les valeurs des ratios R1 et R2 :

	R1 : $C_{\text{annualisé}} / NEMA$ (en millions € / vie sauvée)	R2 : $(C - B)_{\text{annualisé}} / NEMA$ (en millions € / vie sauvée)
Etude pilote 1	1 390	1 387
Etude pilote 2	3	- 10
Etude pilote 3	7	6

Tableau 7 – Evaluations des ratios de proportionnalité R1 et R2 pour les 3 études pilotes

Au regard des critères utilisés dans différents référentiels mentionnés au § 7.1, il apparaît que :

- pour l'étude pilote 1 : la mise en conformité est largement non justifiée (disproportion très forte)
- pour l'étude pilote 2 : la mise en conformité apparaît raisonnablement justifiée
- pour l'étude pilote 3 : la mise en conformité apparaît moyennement justifiée

Autres critères de proportionnalité testés :

D'autres indicateurs peuvent révéler le caractère disproportionné de la situation de mise en conformité au regard du gain en sûreté effectivement obtenu. Ils sont abordés dans les paragraphes 8.3.2 et 8.3.3 suivants.

8.3.2 Ratio DEMA / DEMA*

La valeur de DEMA* est la valeur que devrait atteindre le DEMA pour annuler et rendre positive la VAN à 50 ans. L'application aux études pilotes donne les résultats suivants :

	DEMA (<u>sans</u> VVS) (en € / an)	DEMA* (en € / an)	Ratio : DEMA / DEMA*
Etude pilote 1	7 000	3 290 000	1 pour 470
Etude pilote 2	169 000	40 260	4 pour 1
Etude pilote 3	28 000	410 000	1 pour 15

Tableau 8 – Evaluations du ratio DEMA (sans VVS) / DEMA* pour les 3 études pilotes

Ici encore, les résultats aboutissent à des conclusions assez tranchées :

- pour les études pilotes 1 et 3, l'écart entre le DEMA et le DEMA* est significatif (étude pilote 3) à très significatif (étude pilote 1), traduisant une marge importante voire très importante avant de rendre la mise en conformité économiquement intéressante au regard des dommages aux biens ;
- pour l'étude pilote 2, la VAN à 50 ans étant déjà positive avec le DEMA calculé, on montre qu'il faudrait en revanche réduire le DEMA d'un facteur 3 environ pour que la VAN à 50 ans devienne négative.

On peut également quantifier cet indicateur en utilisant cette fois le DEMA avec VVS :

	DEMA (<u>avec</u> VVS) (en € / an)	DEMA* (en € / an)	Ratio : DEMA / DEMA*
Etude pilote 1	18 000	3 290 000	1 pour 180
Etude pilote 2	211 000	40 260	5 pour 1
Etude pilote 3	163 000	410 000	1 pour 2,5

Tableau 9 – Evaluations du ratio DEMA (avec VVS) / DEMA* pour les 3 études pilotes

Les conclusions à en tirer restent globalement inchangées, à quelques nuances près.

8.3.3 Ratio B / C

Le ratio B / C est souvent utilisé dans les ACB, B et C étant respectivement les bénéfices et coûts actualisés. Ici, il correspond de facto au ratio DEMA / DEMA* défini ci-avant, et on obtient logiquement pour les 3 études pilotes les résultats suivants :

	B (sans VVS) / C	B (avec VVS) / C
Etude pilote 1	2,0.10 ⁻³	5,5.10 ⁻³
Etude pilote 2	2,7	5
Etude pilote 3	6,7.10 ⁻²	3,9.10 ⁻¹

Tableau 10 – Evaluations du ratio B / C pour les 3 études pilotes (sans et avec inclusion de la VVS)

Ces ratios « Bénéfice / Coût » et leur « distance » par rapport à la valeur unité permettent d'apprécier d'une autre manière la proportion ou la disproportion entre l'effort pour la mise en conformité et le gain effectif pour la sûreté. Là encore, les résultats restent globalement tranchés et les conclusions tirées des indicateurs ou critères précédents demeurent globalement inchangées.

8.4. Valorisation de l'alerte

Il est reconnu que la mise en œuvre d'une alerte aux populations permet de réduire significativement l'exposition des personnes aux risques induits par l'aléa hydraulique considéré - autrement dit le « P.A.R. »⁹ en termes anglo-saxons. La référence [20] de l'US.B.R. décrit clairement ce constat à partir d'accidents de rupture de barrage, quoiqu'intervenues pour l'essentiel hors initiateur « crue ». Les méthodes d'évaluation des dommages aux personnes tentent de prendre en compte cette alerte. La méthode de base utilisée lors des 3 études pilotes adopte une méthode simple de prise en compte de l'alerte.

Pour autant, l'incidence de l'alerte sur les incréments de dommages aux personnes, et donc sur l'évaluation du NEMA, n'est pas forcément de la même ampleur, puisqu'on raisonne en différentiel de dommages.

La prise en compte de l'alerte via la méthode *Risk-to-People* conduit aux évolutions du NEMA suivantes pour les 3 études pilotes :

	NEMA sans alerte (en nombre pers. / an)	NEMA avec alerte (en nombre pers. / an)
Etude pilote 1	0.0014	0.0011
Etude pilote 2	0.0075	Non disponible
Etude pilote 3	0.0330	0.0280

Tableau 11 – Evaluations des NEMA avec prise en compte de l'alerte pour les 3 études pilotes

L'influence de la prise en compte de l'alerte sur l'évaluation du NEMA apparaît faible. Cependant, les membres du groupe de travail précisent que la méthode « *Flood Risk-to-People* » adopte une

⁹ P.A.R : Persons at Risk – voir lexique

approche très sommaire pour la prise en compte de l'alerte, et une approche plus précise pourrait conduire à des écarts potentiellement plus importants.

En conclusion, le GT-CFBR recommande vis-à-vis de l'alerte :

- de mener les évaluations des NEMA et DEMA sans prise en compte de l'alerte, et ce dans une logique sécuritaire *a priori* ;
- si les conclusions de l'analyse et des critères d'acceptabilité permettent d'envisager la dérogation, alors l'adjonction d'une alerte aux populations adaptée pourrait constituer un levier supplémentaire dégageant une marge de sécurité renforçant le caractère acceptable de la dérogation. La méthode d'élaboration d'une telle alerte aux populations dépasse le cadre du présent guide, mais elle pourra utilement valoriser les référentiels déjà en place dans le cadre des PPI, des PCS et autres plans de gestion du risque inondation.

8.5. Scénarios nocturne / diurne

Des méthodes d'évaluation des dommages aux personnes et aux biens peuvent distinguer les situations nocturnes et diurnes, puisque les enjeux exposés à l'aléa et aux incréments d'aléa inondation peuvent potentiellement varier selon ces situations. Dans le cas présent, toutes les évaluations menées dans le cadre des études pilotes correspondaient à une situation « diurne ».

Une étude de sensibilité est réalisable pour apprécier l'intérêt de considérer l'une ou l'autre de ces situations, et de vérifier si elles ont une influence significative sur les critères d'appréciation du risque.

A titre d'exemple, on fournit sur la Figure 17, dans un repère F- ΔN , des courbes montrant la sensibilité des résultats de l'évaluation des dommages aux personnes, pour l'étude pilote 3, aux paramètres « nocturne/diurne » et « sans / avec alerte », toujours en utilisant la méthode *Flood Risk-to-People* :

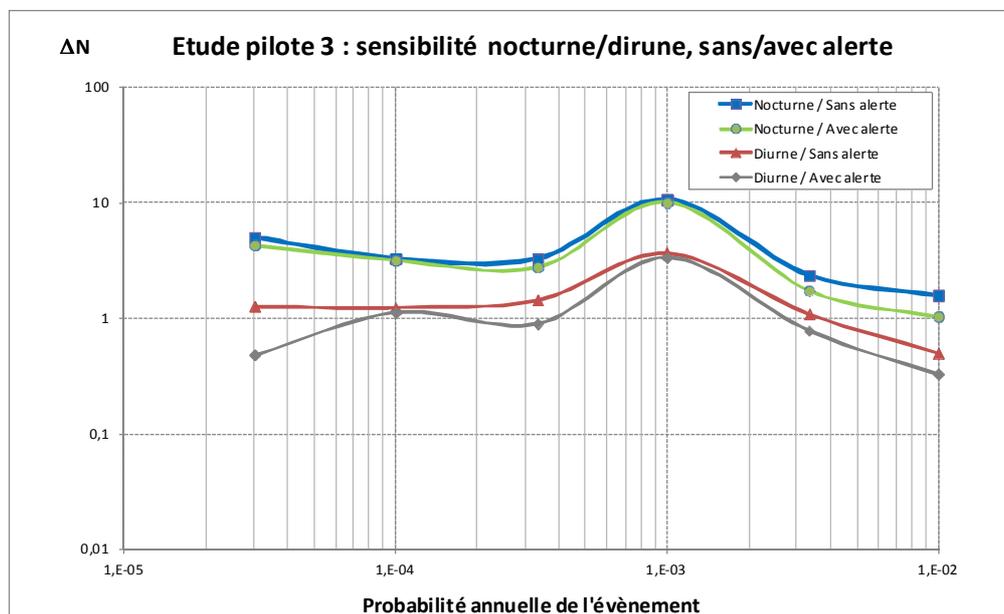


Figure 17 – Sensibilité de l'évaluation des dommages aux personnes selon méthode *Flood Risk-to-People* aux paramètres nocturne/diurne et sans/avec alerte, illustrée pour l'étude pilote 3 dans un repère F- ΔN

Nota 1 : on retrouve sur cette illustration que l'effet de prise en compte en compte de l'alerte, tel qu'évalué par la méthode *Flood Risk-to-People*, apparaît limité, et motive, à ce stade, les conclusions du groupe de travail déjà mentionnées au §.8.4.

Nota 2 : si un cas le justifie, une considération de plusieurs situations saisonnières différentes peut aussi être envisagée. Cet aspect n'a pas été examiné dans les travaux du GT-CFBR.

8.6. Intérêt d'une étude de sensibilité

Le cadre méthodologique repose à chaque étape sur une série de choix plus ou moins structurant. Une exploration exhaustive de la sensibilité des résultats à l'ensemble des incertitudes ou hypothèses de la méthode n'a pas pu être systématiquement réalisée. On a indiqué aux §. 8.4 et 8.5 des premières évaluations concernant la sensibilité des résultats des études pilotes aux paramètres nocturne/diurne, sans/avec alerte, à méthode de calcul fixée.

A titre d'illustration complémentaire de l'intérêt d'une étude de sensibilité aux paramètres clés de la méthodologie, l'étude pilote 2 a procédé au calcul – illustré sur la Figure 18 - du « coût proportionné » du nouvel EVC, c'est-à-dire le coût de la mise en conformité qui annule la V.A.N. à 50 ans et donc conduit à l'équilibre coûts-bénéfices – en fonction de divers paramètres de la méthode :

- taux d'actualisation : 2,5% (courbes rouges) ; 4% (courbes vertes) ; 8% (courbes violettes),
- situation diurne (symboles vides) / nocturne (symboles pleins),
- à l'intégration de la VVS dans le DEMA (les courbes sans symbole ne considèrent que le DEMA, sans le NEMA)

De telles appréciations de la sensibilité des résultats de la méthode apparaissent fondamentales pour consolider les conclusions qui en ressortent.

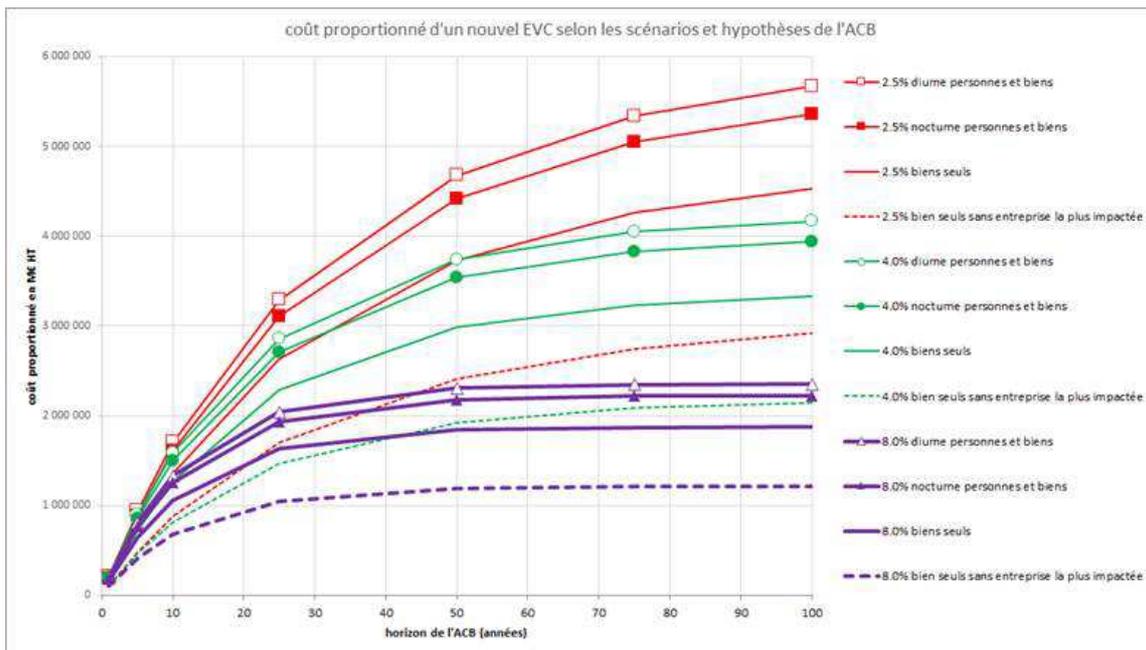


Figure 18 – Etude pilote 2 : sensibilité du coût proportionné d'un nouvel EVC à différents paramètres

9. Conclusions

Les travaux du groupe de travail CFBR « dommages incrémentaux », engagés depuis fin 2013, ont permis d'aboutir à la définition d'une méthodologie de vérification ou de dimensionnement des évacuateurs de crue de barrages par l'approche des « dommages incrémentaux », en répondant aux principes directeurs fixés, et en s'appuyant notamment sur des référentiels existants dans les domaines des analyses coûts-bénéfices ou de la quantification des dommages relevant du risque inondation.

Si la méthodologie développée dans le présent guide s'est largement inspirée de pratiques, de référentiels voire de réglementations (cas du Québec) ayant directement recours à une approche par les dommages incrémentaux, l'approche développée ici se distingue par :

- une évaluation plus intégrée des dommages (incrémentaux), notamment sous l'angle économique (intégration sur l'échelle de probabilité),
- l'évaluation d'un *différentiel* entre deux situations de dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage (D0 et D_reg ; ou Di et D_reg ; etc ...),

en comparaison des approches plus normatives et qualitatives par types de dommages, comme celle en usage au Québec, qui ne compare pas deux dimensionnements entre eux. En ce sens, notre approche mérite plus volontiers le titre d'approche par les dommages **différentiels** que par les dommages *incrémentaux*.

Ce référentiel méthodologique a été assorti de la proposition d'un ensemble de critères d'acceptabilité, y compris des critères de proportionnalité, dont la vision d'ensemble doit permettre de juger de la pertinence d'une dérogation ou non aux exigences de (re)dimensionnement de référence.

Les travaux menés ont permis de réaliser trois études pilotes, dans des conditions variées de situations (taille et fonctionnement des ouvrages, caractéristiques de la vallée).

Le bilan et les enseignements tirés de ces applications pilotes sont riches :

- la **méthode** élaborée est **faisable et applicable** dans des configurations variées de situations. A ce titre, la présente méthode pourrait constituer une réponse possible à de possibles dispositions dérogatoires d'une éventuelle future réglementation fixant de nouvelles exigences de dimensionnement de référence. Toutefois, quelque soit le devenir de cette perspective d'évolution réglementaire, la présente méthodologie conserve toute sa valeur pour chercher à proportionner le niveau de dimensionnement – ou de redimensionnement – d'un ouvrage évacuateur de crue au risque encouru en cas de défaillance de l'ouvrage ;
- l'**effort** pour mener à bien une telle étude est **significatif** : plusieurs ingénieur.mois typiquement (hydraulique, SIG, économie, ...), effort variable selon la disponibilité des données et complexité de la vallée étudiée ;
- sur la question de l'**acceptabilité des dommages aux biens**, la méthode et le critère (économique) sont jugés stabilisés, et aboutissent à des **résultats concrets** et **tranchés**, démontrés par les 3 études pilotes ;
- concernant la question de l'**acceptabilité des dommages aux personnes, plusieurs options**, qui ont été discutées et soumises à l'avis d'experts économistes externes au CFBR, **ont été testées** :
 - une option fait référence à des valeurs ou courbes seuils de tolérabilité/acceptabilité développés dans d'autres pays (Australie, USA, Canada) mais dont l'application au cas d'une rupture de barrage en crue ne peut pas être transposée simplement ;
 - les deux autres options font référence à des méthodes, guides et critères internationaux pour traiter du caractère disproportionné ou non des investissements pour la mise en conformité d'ouvrages existants, en réponse à de nouvelles exigences de sécurité ; au regard de ces options, la méthode conduit à des **résultats tangibles** au regard des critères d'acceptabilité explorés ;

Sur cette question précise, le groupe de travail recommande qu'une cohérence d'approche soit *in fine* recherchée avec les évaluations des études de dangers, qui positionnent les

défaillances de fonctions ou d'ouvrages - les événements redoutés centraux (ERC) - dans un cadre « occurrence-gravité » qui s'apparente aux diagrammes F-N introduits aux §.7.1.

- il apparaît également essentiel **d'adapter le niveau d'étude** aux critères d'acceptabilité qui seront adoptés in fine (notamment en ce qui concerne les dommages aux personnes), en appréciant le niveau de précision et d'incertitudes inhérent aux méthodes utilisées. A ce titre, il est recommandé de procéder à **des études de sensibilité** des résultats aux hypothèses ou données jugées de premier ordre pour le cas considéré. Rappelons toutefois que l'examen des incréments de dommages relativise la question des incertitudes, puisque celles-ci sont *de facto* « lissées » par différence pour le calcul des incréments ;
- la **valorisation de l'alerte** aux populations nécessite des compléments (cf. 8.4) ; pour autant, dans l'attente de ces développements futurs, il est recommandé dans un premier temps de ne pas considérer ce levier dans l'évaluation des dommages, mais d'envisager ce levier comme mesure complémentaire de sûreté dès lors qu'une dérogation aura été jugée possible au regard des critères d'acceptabilité proposés ;
- il est rappelé l'importance pour un maître d'ouvrage de pouvoir **disposer d'une première évaluation sommaire**, simple et rapide, lui permettant d'évaluer l'intérêt potentiel d'une étude incrémentale, avant de décider d'engager une étude complète. Cette première évaluation pourra consister à identifier des indicateurs relatifs à l'aléa hydraulique et aux enjeux du territoire (cf. 3.4).

Les présentes recommandations sont, dans la version du présent guide, formulées à titre de *recommandations provisoires*, en vue d'une appropriation et d'une mise en pratique au sein de la profession. Le CFBR prévoit de réaliser un bilan et un retour de cette mise en pratique au bout de quelques années, pour transformer ces recommandations provisoires en recommandations définitives.

Enfin, la méthode développée et les présentes conclusions ne préjugent pas des positions que pourront adopter les services de l'Etat dans le futur, notamment dans la perspective d'une possible évolution réglementaire comme mentionné en introduction du présent guide. Pour autant, comme déjà indiqué, la méthodologie présentée dans ce guide offre un cadre d'analyse permettant d'adapter le niveau de dimensionnement d'un ouvrage évacuateur de crue au risque incrémental ou différentiel réellement encouru en cas de défaillance, et ce quelque soit l'évolution réglementaire à venir.

10. Références

- [1] **CFBR** (2013). Recommandations pour le dimensionnement des évacuateurs de crue de barrage en France. *Juin 2013*. Téléchargeable dans la rubrique « Documentation » du site internet du CFBR (<http://barrages-cfbr.eu>).
- [2] **Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie** (2007). Décret n° 2007-1735 du 11 décembre 2007 relatif à la sécurité des ouvrages hydrauliques et au comité technique permanent des barrages et des ouvrages hydrauliques. *Journal officiel de la République Française* (13/12/2007).
- [3] **Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie** (2007). Décret n° 2015-526 du 12 mai 2015 relatif aux règles applicables aux ouvrages construits ou aménagés en vue de prévenir les inondations et aux règles de sûreté des ouvrages hydrauliques. *Journal officiel de la République Française* (14/05/2015).
- [4] **Loi sur la sécurité des barrages au Québec**, S-3.1.01 (2002). Mise à jour au 01/01/2016 disponible sur : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=2&file=/S_3_1_01/S3_1_01.htm.
- [5] **Règlement sur la sécurité des barrages au Québec**, S-3.1.01 R.1 (2002). Les mises à jour ultérieures intègrent des modifications concernant la définition de la crue de sécurité (articles 21, 21.1, 22 et 23). Mise à jour au 01/01/2016 disponible sur : http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_3_1_01/S3_1_01R1.HTM
- [6] **Commission Internationale des Grands Barrages – CIGB / ICOLD** (2005). Bulletin n° 130 – Evaluation du risque dans la gestion de la sécurité du barrage.
- [7] **Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective** (2013). Evaluation socio-économique des investissements publics. Rapport de la mission présidée par Emile Quinet (Sept. 2013). République Française, Services du Premier Ministre, pp. 351 - téléchargeable sur : www.strategie.gouv.fr.
- [8] **Commissariat Général au Développement Durable** (2014). Analyse multi-critères des projets de prévention des inondations : Guide méthodologique et Annexes Techniques (Juillet 2014). République Française, Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie - téléchargeable sur : www.developpement-durable.gouv.fr.
- [9] **INERIS** (2009). Maîtrise des Risque Accidentels sur les ouvrages hydrauliques – Opération B – Etat de l'art sur les méthodes existantes de cotation en gravité des accidents de barrages en termes de conséquences humaines – Programme 181-DRA91 – Rapport n°DRS-09-103165-05239A – 09/2009.
- [10] **DEFRA** (2006). Flood Risk to people - The flood risk methodology (FD2321/TR1) – DEFRA / Environmental Agency - Mars 2006.
- [11] **DEFRA** (2006). Flood Risk to people – guidance document (FD2321/TR2) – DEFRA / Environmental Agency - Mars 2006.
- [12] **Zielinski A.** (2014). Tolerability of societal risk criteria. *Hydropower & Dams*, Issue 4 (2014), p. 63-67

- [13] **S.I.A.** (2004). Cahier Technique 2018. Vérification de la sécurité parasismique des bâtiments existants. Société des Ingénieurs et Architectes (Suisse).
- [14] **Renard B.** (2006). Détection et prise en compte d'éventuels impacts du changement climatique sur les extrêmes hydrologiques en France. Thèse de doctorat, INP-Grenoble. 361 p.
- [15] **Baumstark L.** (2016). L'usage de la valeur statistique de vie humaine. *Colloque IFSTAAR CEREMA « Analyse des coûts sociaux de l'insécurité routières et optimisation des politiques publiques »*, Paris, 9 novembre 2016.
- [16] **ICOLD** (2016). Dam Safety Management : operational phase of the Dam Life Cycle. Voir Appendix B. *Bulletin n°154 (in press)*.
- [17] **Ale B.J.M.** (2005). Tolerable or Acceptable : a comparisons of risk regulation in the United Kingdom and in the Netherlands. In *Risk Analysis, vol. 25, N° 2*.
- [18] **ANCOLD** (2003). Australian National Committee on Large Dams: Guidelines on Risk Assessment, October 2003.
cité d'après **SPANCOLD** (2012). Technical Guides on Dam Safety. Risk analysis applied to management of dam safety - *Volume 1*.
- [19] **Adeline T., Le Gal A.** (2016). Approche synthétique des dommages incrémentaux dus à une ruoture de barrage par surverse en crue : cas du barrage du Lac au Duc (56). Actes du colloque CFBR « Sûreté des barrages et enjeux », 23-24 novembre 2016, Chambéry, France.
- [20] **U.S. Bureau of Reclamation** (2014). Reclamation consequence estimating methodology. Guidelines for estimating life loss for dam safety risk analysis. Interim report, February 2014.
- [21] **U.S. Department of Homeland Security** (2014). Dams sector. Estimating loss of life for dam failure scenarios. September 2011.
- [22] **Lemieux M., Kingery R.** (2016). Thirty Years of Spillway Reconstruction: Impacts of Moving to a Risk-Based Spillway Standard. ASDSO publications.
- [23] **CTGREF** (1978). Calcul d'onde de submersion due à la rupture d'un barrage. *Rapport n°25 – Etude*.

11. Terminologie – Glossaire

ACB (Analyse Coûts-Bénéfices) : démarche d'évaluation de la pertinence économique ou socio-économique d'un projet. Dans le domaine des risques naturels, les coûts peuvent correspondre à un ouvrage hydraulique et les bénéfices à un dommage évité (voir VAN et DEMA).

AEP : Alimentation en Eau Potable.

ALARP : acronyme anglo-saxon pour « *As Low As Reasonably Possible* ». Il s'agit d'un principe selon lequel le risque résiduel doit être réduit aussi loin que possible jusqu'à un niveau jugé « raisonnable ». Le caractère « raisonnable » résulte souvent de l'application d'analyses coûts-bénéfices.

Aléa : Phénomène d'occurrence (probabilité), de durée et cinétique, et d'intensité données ; aléa hydrologique : hydrogramme ; aléa hydraulique : hauteurs, niveaux et vitesses en fonction du temps.

AMC (Analyse Multi-critères) : démarche de comparaison de plusieurs options (ne rien faire, projet, alternative, ...) selon des critères de natures différentes. Dans le domaine des inondations, l'AMC consiste à prolonger l'ACB avec des indicateurs non monétarisés (population, emplois, patrimoine, environnement, ...).

AMDEC : Analyse des Modes de Défaillance de leurs Effets et Criticité.

Barrage : Conformément à la définition proposée par l'article R214 et suivants du code de l'environnement, il peut s'agir d'un barrage en travers d'une vallée ou d'un barrage, généralement en remblai, constituant les berges d'un canal en élévation par rapport au terrain naturel

Barrage en remblai : Type de barrage constitué de matériau meuble, qu'il soit très fin (terre) ou très grossier (enrochements). Ce peut être un matériau naturel excavé ou des résidus industriels ou miniers.

Barrage de fermeture (ou barrage de col) : Barrage de n'importe quel type construit en travers d'un col situé sur le pourtour d'une retenue.

Barrage poids : Type de barrage résistant à la poussée de l'eau par son seul poids. De profil

triangulaire, il peut être en remblais ou en béton.

Barrage voûte : Type de barrage dans lequel la plus grande partie de la poussée de l'eau est reportée sur les rives par des effets d'arc. De courbure convexe tournée vers l'amont, il est constitué exclusivement de béton.

Bassin de risque : périmètre géographique cohérent concerné par un risque donné – ici il s'agit de la (ou des) vallée(s) concernée(s) par le risque de rupture d'un barrage – stricto sensu le bassin de risque ne comprend pas les secteurs géographiques impactés indirectement par le risque (propagation des conséquences d'une rupture au-delà de la vallée inondée, comme par exemple sur la circulation autoroutière).

Batardeau : Structure temporaire permettant de mettre à sec tout ou partie d'une zone de chantier.

BETCGB (Bureau d'Etude Technique et de Contrôle des Grands Barrages) : Bureau spécialisé rattaché au ministère chargé de l'environnement.

BMR : Barrage Mobile en Rivière

Brèche : Ouverture accidentelle du corps d'un barrage qui entraîne l'écoulement partiel ou total et plus ou moins brutal du contenu du réservoir.

BV : Bassin Versant.

Cinétique de rupture : Caractérisation de l'évolution dans le temps de la rupture d'un ouvrage (délai, vitesse).

Cinétique de l'onde de rupture : Caractérisation de l'évolution dans le temps de la propagation de l'onde de rupture d'un ouvrage (délai d'arrivée à un point donné, vitesse de montée des eaux, durée de submersion...)

Classe d'un barrage : les définitions de la classe d'un barrage (A, B, C, D) sont fixées par l'article R214 du code de l'environnement. Les barrages de classes A sont les plus importantes.

Conséquences : Résultats d'une rupture de barrage, à long ou court terme et de manière directe ou indirecte sur les biens, les

personnes et les infrastructures touchée. Les conséquences peuvent être des victimes, des pertes économiques, des dégâts, des dommages environnementaux...

Cote de danger : Cote au-delà de laquelle on ne peut plus justifier la stabilité de l'ouvrage. Elle peut être atteinte suite à une crue extrême ou à cause d'un dysfonctionnement des évacuateurs de crues. Toutefois, une situation de danger peut être atteinte dans des situations de crue intermédiaires (cas des BMR notamment).

Cote de dimensionnement : Cote pour laquelle la stabilité du barrage est théoriquement assurée, correspondant à la crue de dimensionnement.

Cote des plus hautes eaux (PHE) : Cote atteinte par la retenue dans l'hypothèse du passage d'une crue de dimensionnement de période de retour donnée (laminage compris).

Cote de retenue normale (RN) : Cote maximale que la retenue peut atteindre en exploitation normale hors épisode de crue.

Cote de rupture : Cote de la retenue correspondant à l'instant de la rupture du barrage

Crue : Augmentation du débit et/ou du niveau d'un cours d'eau qui provoque éventuellement un débordement de son lit mineur.

Crue de Chantier : crue contre laquelle il est décidé de protéger le chantier durant la construction de l'ouvrage.

Crue de dimensionnement : Crue considérée pour le dimensionnement de l'évacuateur de crues en fonctionnement normal.

Crue extrême : Crue permettant à la retenue d'atteindre la cote de danger. Elle peut dépendre d'un taux de dysfonctionnement de l'évacuateur de crues.

Crue Maximale Probable : Voir PMF

Danger : Etat d'une situation qui est une source potentielle de dommages pour un enjeu identifié.

DDRM : Dossier Départemental des Risques Majeurs.

DEMA : Dommages évités moyens annuels ; le DEMA d'un projet (ici la mise en conformité de l'évacuateur de crue d'un barrage donné) est défini par la différence entre les DMA sans projet et avec projet.

DICRIM : Dossier d'Information Communal sur les Risques Majeurs.

Digue : Ouvrage sec de protection contre les inondations.

DMA : Dommages moyens annuels, définis pour une situation donnée (ou un ouvrage donné : barrage actuel ou barrage modifié) par l'intégrale de la fonction de distribution des dommages aux biens pour l'ensemble des périodes de retour.

Domage : Dégât matériel ou physique touchant un bien ou une personne (victime). On distingue les dommages corporels, matériels ou moraux.

EDD : Etude de Dangers

Effacement : Absence d'impact hydraulique d'un ouvrage sur l'écoulement d'un cours d'eau ou la propagation d'une crue.

Enjeu : Valeur matérielle ou morale que l'on risque dans une situation vis-à-vis d'un aléa. Au sens théorique des risques : personne, bien ou aménité dont la sécurité ou la valeur – morale, monétaire, patrimoniale ou environnementale – est modifiée lorsqu'il est exposé à un aléa.

Ennoiment : Submersion d'une partie d'un ouvrage normalement émergé en fonctionnement normal.

EPTB : Etablissement Public Territorial de Bassin.

Erosion : Dégradation d'une surface meuble (barrage, berges, digue...) par l'écoulement de l'eau sur celle-ci et transport des matériaux la constituant.

Evacuateur de crues : Organe hydraulique destiné à assurer le transit des crues. Il peut s'agir d'un déversoir à seuil libre fonctionnant par « trop plein », d'un organe vanné ou d'un organe mixte. Un même barrage peut avoir plusieurs organes hydrauliques destinés à l'évacuation des crues, du même type ou non.

FEMA (Federal Emergency Management Agency) : Organisme gouvernemental

américain destiné à assurer l'arrivée des secours en situation d'urgence.

ICPE : Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

Impact : Conséquence d'un phénomène ou d'un projet sur un territoire, une infrastructure, une population...

Incrément : Valeur ajoutée à une autre, en général à plusieurs reprises.

Hydrogramme de crue : Représentation graphique de l'évolution du débit d'un cours d'eau en un point donné lors d'une crue.

Hydrogramme de rupture : Représentation graphique de la variation temporelle du débit d'un cours d'eau en un point donné suite à la rupture d'un barrage.

Laminage : Transformation de l'onde de crue entre un point amont et un point aval d'un cours d'eau. Il s'agit d'une diminution du débit de pointe (modification de l'hydrogramme de crue) par la répartition du volume de la crue dans le temps (stockage dans le lit majeur ou dans la retenue d'un barrage). Pour un barrage, l'effet du laminage dépend du volume de la crue, du volume disponible dans la retenue et de la gestion des organes d'évacuation des crues.

Ligne d'eau : Ligne matérialisant l'altitude d'un plan d'eau (cours d'eau, retenue, brèche, etc.) dans le sens de l'écoulement.

LOL : Loss Of Life.

MEDDE : Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie

Mode de défaillance : Description du dysfonctionnement d'un ouvrage décrivant la manière dont celui-ci ne remplit plus sa fonction et s'exprimant en termes techniques précis.

NEMA (Nombre d'enjeux protégés moyens annuels) : indicateur d'efficacité défini par la différence entre les NMA sans projet et avec projet. Ces enjeux peuvent être les habitants ou les emplois par exemple (voir aussi DEMA).

Onde de submersion : Elévation brutale du débit du cours d'eau (niveau de l'eau et vitesse d'écoulement) se propageant à l'aval d'un ouvrage consécutivement à la rupture partielle ou totale de ce dernier.

ORSEC : Organisation de la Réponse de Sécurité Civile. Consiste en l'organisation des secours sous une direction unique pour la gestion des accidents catastrophiques. Ses principes et ses modalités ont été revus depuis la parution de la loi de modernisation de la sécurité civile du 13/08/2004 et de ses décrets d'application.

PAPI (Plan d'Actions de Prévention des Inondations) : désigne les appels à projet successifs du ministère en charge des risques naturels depuis 2002 en direction des collectivités pour des plans d'actions cohérents à l'échelle de bassins de risque.

P.A.R. : Persons At Risk. Il s'agit de la d'un indicateur de comptabilisation des personnes potentiellement exposées un aléa hydraulique considéré. On parlera en termes Français des Populations Potentiellement impactées.

PCS (Plan Communal de Sauvegarde) : Outil réalisé à l'échelle communale pour planifier les actions des acteurs communaux de la gestion en cas d'évènements majeurs naturels, technologiques ou sanitaires. Il a pour objectif l'information préventive et la protection de la population. Toute commune pour laquelle un PPRi est approuvé doit se doter d'un PCS.

PGRI (Plan de Gestion du Risque Inondation) : ensemble de la stratégie de gestion du risque à l'échelle d'un TRI.

PLU : Plan Local d'Urbanisme.

PMF (Probable Maximal Flood) : Crue maximale probable, il s'agit d'une crue extraordinaire, envisageable mais non reliée à une probabilité.

PPI (Plan Particulier d'Intervention) : Dispositif local défini en France par les préfetures pour protéger les populations, les biens et l'environnement, pour faire face aux risques particuliers liés à l'existence d'une ou de plusieurs installations industrielles.

PPRI (Plan de Prévention du Risque Inondation) : Document d'urbanisme opposable au tiers et annexé au PLU définissant des zones inondables inconstructibles et des zones inondables constructibles sous conditions. Le PPRI est prescrit et approuvé par le Préfet compétent pour le bassin de risque considéré. Un PPRI peut également comporter des préconisations pour l'adaptation de l'existant et pour la sécurité des personnes en cas de crise.

Prévention : Ensemble des mesures à prendre pour éviter qu'une situation ne se dégrade ou qu'un accident ne survienne. Pour réduire un risque donné : éviter l'apparition de dommages aux personnes et aux biens.

Probabilité : Mesure de la vraisemblance, la chance ou le degré de certitude qu'un événement particulier va se produire.

Q100 : Débit (ou hydrogramme) de crue de retour centennale (idem pour Q1000, Q10000...)

Remblai : Matériau meuble, fin ou grossier, employé pour construire des barrages poids ou des digues.

Renard hydraulique : Phénomène d'érosion interne d'un barrage en remblais qui conduit à une diminution de sa stabilité par entraînement des matériaux à l'aval et formation d'une brèche.

Revanche : Distance verticale entre un certain niveau de retenue et le couronnement ou la crête du barrage.

Risque : Relation entre les conséquences résultant d'un événement et sa probabilité d'occurrence. Le risque inondation est défini par le produit des aléas de crue et des enjeux.

Rupture : Destruction totale ou partielle de la structure d'un ouvrage.

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Déclinaison locale d'un SDAGE à l'échelle d'un ou plusieurs bassins versants.

SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. La France métropolitaine est couverte par 6 SDAGE (Adour-Garonne, Artois-Picardie, Loire-Bretagne, Rhin-Meuse, Rhône-Méditerranée-Corse, Seine-Normandie).

SGA : Schéma Général d'Assainissement.

SIAE : Syndicat Intercommunal d'Adduction en Eau potable.

SPC : Service de Prévision de Crue.

Surverse : Déversement d'eau au-dessus de la crête d'un ouvrage. Dans le cas de barrage ou de digue en remblais, une surverse entraîne une érosion du parement aval et, à terme, la formation d'une brèche.

Taux d'actualisation : Le taux d'actualisation est utilisé dans le calcul de VAN et reflète la préférence pour le présent. Une valeur de 2.5% est recommandée depuis 2013 par le Commissariat général à la stratégie et à la prospective (ex Centre d'analyse stratégique, ex Commissariat au Plan).

TRI (Territoire à Risque Important d'Inondation) : périmètre géographique défini par arrêté par les Préfets de Régions et correspondant à des concentrations particulières d'enjeux humains et matériels soumis au risque d'inondation fluviale ou maritime. Les TRI sont issus de la directive Inondation 2007/60/CE, transposée le 12/7/2010 en droit français. Ils doivent déboucher d'ici décembre 2015 sur des Plans de Gestion du Risque Inondation (voir aussi PGRI).

USACE (US Army Corps of Engineers) : Institution américaine de génie civil dont la mission est de fournir des services tels que la construction des barrages ou autres projets d'aménagement.

VAN (Valeur Actuelle Nette) : indicateur d'efficacité d'un projet, défini pour un horizon donné en années (souvent 50 ans) par le flux cumulé des dépenses et des recettes. Les valeurs annuelles sont actualisées selon un taux annuel reflétant la préférence pour le présent (voir aussi taux d'actualisation).

Vanne : Barrière mobile qui permet de contrôler le niveau d'une retenue et le débit transitant à travers un ouvrage.

VVS : Valeur de Vie Statistique ; concept économique qui traduit l'effort que la collectivité serait prête à consentir pour réduire les probabilités de décès. On parle aussi parfois de Valeur Statistique de Vie Humaine (**VSVH**) - cf. réf. [7].

Vulnérabilité : Point faible d'une entité (population, infrastructure, aménagement) pouvant être défini par un objet de risque, des causes et des conséquences. On distingue plusieurs classes de vulnérabilité selon l'entité touchée.

12. Annexe : questions débattues avec des experts économistes externes

Compte-rendu du séminaire tenu les 11 et 12 Mai 2016 à Paris

Liste des participants

Experts externes (participation confirmée) :

- Mme Emmanuelle BERTHELIER – Expert économiste, ARTELIA
- M. François COMBES – Chef de division CEREMA (Centre Systèmes Transports et Mobilité)
- M. Yvon GOSSELIN – Consultant, ex. Directeur du Centre d'Expertise Hydrique du Québec (Canada)
- M. Eric McNEIL – Hydro-Québec Production, Chef service « études de sécurité » (Canada)
- M. David MEUNIER – CGDD / Ministère Ecologie, Energie, Mer (MEEM)
- M. Alix ROUMAGNAC – société Predict-Services
- M. David BOURGUIGNON – Direction, Mission Risques Naturels

Membres du GT-CFBR « Dommages incrémentaux » :

- M. Denis AELBRECHT – Expert EDF-CIH, animateur du GT-CFBR
- M. Thomas ADELIN – Consultant pour ISL-ingénierie
- M. Benoît BLANCHER – Ingénieur EDF-CIH, secrétaire du GT-CFBR
- M. Claudio CARVAJAL – Ingénieur de recherche IRSTEA
- M. Jacques DE SAINT-SEINE – Expert CNR
- M. Ahmed KALADI – Ingénieur CNR
- M. Patrick LE DELLIOU – Directeur BETCGB / Ministère Ecologie, Energie, Mer (MEEM)
- M. Didier MAZEL – Directeur agence Nîmes TRACTEBEL-Eng.
- M. David OUF – Ingénieur CNR

0. Objectifs du séminaire

Le GT-CFBR « dommages incrémentaux » a invité plusieurs Experts externes – voir liste dans l'Annexe en fin de document - à partager lors d'un séminaire restreint de 1,5 jours, leur expérience, leur expertise et leur pratique sur quelques questions clés au cœur de la méthodologie d'étude élaborée par le GT-CFBR « dommages incrémentaux », plus particulièrement sur deux sujets :

- **La pratique des Analyses Coûts-Bénéfices (ACB)** ou leur équivalent dans leur domaine d'activités (Transports, Risques inondation), en tant qu'outils d'aide à la décision ;
- **Les critères d'acceptabilité des dommages aux biens et aux personnes.**

Les Experts externes ont reçu plusieurs semaines avant le séminaire le projet d'article soumis par le GT au colloque CFBR des 23-24 Novembre 2016 « Sécurité des barrages et enjeux ».

Le présent mémo constitue un recueil « brut » des échanges, propositions, suggestions, questions, qui doivent alimenter les travaux du GT en vue d'aboutir à :

- une proposition méthodologique consolidée (qui sera formalisée dans le guide élaboré par le GT-CFBR « dommages incrémentaux » courant 2016),
- une liste de questions résiduelles à résoudre ultérieurement.

Les experts invités précisent qu'ils se sont exprimés à titre personnel, et non au titre de l'organisme dont ils relèvent.

Une Annexe électronique complète le présent mémo et reprend l'ensemble des présentations partagées sous forme de slides PPT.

On fournit en Annexe en fin de document :

- la liste des invités externes et des membres du GT-CFBR ayant participé au séminaire
- Le programme du séminaire

PS: Alix ROUMAGNAC n'a finalement pas pu participer au séminaire pour des raisons professionnelles urgentes de dernière minute. Le GT-CFBR maintient son intention d'un échange avec lui pour les questions relevant de la valorisation de l'alerte aux populations.

1. Introduction

- Présentation introductive par D. Aelbrecht – voir slides de la séquence 1 dans l'Annexe
- L'introduction a été l'occasion de premiers échanges sur quelques unes des questions clés :
 - o La Valeur de Vie Statistique (VVS) : c'est un instrument économique qui a le mérite de la simplicité et de l'homogénéité, mais des écoles d'économistes s'opposent et sont partagées sur son application,
 - o La distinction entre Risque individuel (vs) Risque Collectif, ou encore entre Risque concentré (ex. accidents d'avion) (vs) Risque diffus (ex. accidents de la route), n'a pas été retenue dans le rapport de la mission Quinet de 2013.

2. Intervention de David MEUNIER (MEEM / CGDD)

L'intervention de David MEUNIER fait l'objet des slides de la séquence 2 joints en Annexe.

- Divers critères de décision socio-économiques d'inspiration ACB sont utilisés dont la VAN, la ratio VAN / C, le TRI immédiat mais aussi le ratio B / C. Ils permettent de comparer plusieurs scénarios et le dernier (ratio B / C) est souvent utilisé en présence de contrainte budgétaire forte, bien que son utilisation soit discutable en cas d'interdépendances entre projets
- Les approches ACB sont utilisées dans le secteur des Transport depuis plus de 50 ans :
 - o En général pour évaluer les coûts et bénéfices associés aux services d'une nouvelle infrastructure,
 - o Parfois pour évaluer la pertinence d'un renforcement de la sécurité au regard du gain en sécurité apporté.
- De plus en plus, les effets (positifs ou négatifs) sur l'Environnement sont intégrés dans les ACB ; pour les Transports, l'effet Environnemental se traduit essentiellement en

termes de tonnes de CO₂ ajoutées (ou évitées), et de pollution de l'air ; l'effet bruit peut également ressortir dans certains contextes.

- Les bénéfices principaux se traduisent pour la plupart des projets d'infrastructures de transport :
 - o en réduction des temps de trajet,
 - o en réduction de la mortalité et de l'accidentologie.
- Dans le domaine des Transports, Le recours à la VVS est systématique pour valoriser les effets sur la sécurité et, indirectement, les effets sur la pollution de l'air et le bruit.
- La VVS a évolué au cours du temps (en augmentant). La mission Quinet s'est inspirée d'une étude de l'OCDE ; actuellement, la VVS est de l'ordre de 3 millions d'euros en France. Le rapport Quinet ne prévoit pas une prise en compte de son évolution dans les calculs économiques. Ce point est potentiellement en débat pour une mise à jour du rapport Quinet 2013.
- D'autres pays (UK) introduisent des notions plus complexes : le concept de « Quality Adjusted Life Year » ou QALY , qui qualifie le potentiel de vie restant dans la valeur de vie humaine, selon la qualité de vie (une jeune femme de 30 ans en bonne santé n'a pas le même QALY qu'un sénior de 80 ans ...). Ce concept n'est pas utilisé en France pour le domaine des Transports.

PS : post-réunion, pour le domaine de la santé publique en particulier, le rapport Quinet introduit une QALY de 115 000 euros / année de vie. Cf. Ref. rapport 2014 Haute Autorité de Santé (www.has.fr).

- La VVS n'est pas une valeur économique de *production perdue* ; c'est une valeur de référence prise pour prendre en compte les décès évités, dans les arbitrages entre projets (niveau d'effort que la collectivité estime raisonnable de consentir pour réduire un risque de décès).
- Le taux d'actualisation de 2,5% du rapport est valable pour des projets dont les effets ne sont pas corrélés avec le PIB (par exemple, si on suppose que les coûts et avantages annuels restent constants quelle que soit l'évolution du PIB, et que la valeur résiduelle est nulle). Si les fluctuations du PIB ont une influence sur le projet, une prime de risque, négative ou positive, doit être introduite. Ainsi, un projet dont les effets sont négativement corrélés avec le PIB jouera en quelque sorte un rôle d'assurance face au risque de diminution de la richesse nationale, et sa valeur collective en sera plus élevée.
- D. MEUNIER soulève la question du périmètre « temporel » de comptabilité des dommages : doit-on distinguer les périodes pré- et post-construction du barrage pour inventorier les enjeux du territoire à considérer ?
- A la question « faut-il considérer le coût de perte du barrage ? » (avec sa probabilité bien évidemment), la logique de l'analyse coûts-bénéfices indique plutôt qu'il faudrait le considérer dans le périmètre de comptabilité des dommages,
- Idem pour les pertes d'exploitation (usages AEP, irrigation, ...)
- Pour l'évaluation des pertes de patrimoine culturel : pas évident en pratique. Des techniques de valorisation existent cependant, comme pour le patrimoine naturel qu'il faudrait normalement inclure dans l'analyse également.

Recommandations :

En première conclusion des informations et réflexions apportées (et après l'intervention de F. COMBES – cf. ci-après), David MEUNIER exprime les propositions suggestions suivantes :

- Attention à la définition de la référence « hors projet » et aux interdépendances entre projets : sur un même bassin versant, les coûts ou variations de dommages pour un barrage en aval pourront dépendre d'un barrage en amont (et réciproquement), dans ce

cas ce sont des programmes de projets interdépendants plutôt que des projets individuels qu'il faudrait évaluer.

- Indicateur d'acceptabilité : dans l'option 3 proposée à la réflexion, qui vise à combiner vision sécuritaire et économique autrement que par une VAN calculée avec VVS, une proposition pour mieux séparer ces visions pourrait être de considérer le ratio : $(C - B)/NEMA$ où B serait le bénéfice économique actualisé net, calculé hors effets de sécurité.
- Si les enjeux sont fortement perçus par les acteurs économiques locaux, alors que l'application de la règle de décision commune conduirait à un niveau de protection qu'ils jugent insuffisant, alors du point de vue économique cela pourrait avoir du sens de considérer la possibilité d'un partage avec ces acteurs des coûts sur l'investissement de renforcement de la sécurité ; P. LE DELLIOU exprime sa perplexité devant une telle possibilité dans le contexte Français.
- La clarté des hypothèses est fondamentale : il faut garantir la reproductibilité des études, et faire des tests de sensibilité aux hypothèses prises ; il faut être en capacité de faire comprendre (auditer) les études par d'autres.
- D. MEUNIER reconnaît enfin la réelle difficulté de résoudre une situation où la mise en conformité induit un déséquilibre fort du bilan économique de l'aménagement.

3. Intervention de Francois COMBES (CEREMA)

- La question de l'évaluation des dommages pour le secteur des Transports s'examine via une Analyse des vulnérabilités fonctionnelles (perte de connectivité, perte de performance),
- La valorisation des coûts (ou bénéfices) se compte en heure perdue (ou gagnée),
- La perte de fonction peut se chiffrer par un coût de substitution,
- Confirme le recours à la VVS en cas de mortalité à comptabiliser.

Recommandations :

- Rester simple sur le plan méthodologique car le sujet est nouveau pour notre profession,
- Insiste sur la nécessité de garantir une cohérence entre qualité et précision des données d'entrée d'une part, méthodes et critères d'autre part,
- Dommages aux personnes : recommanderait plutôt d'aller vers une utilisation de la VVS à intégrer dans le calcul de VAN, mais en complétant ce chiffrage avec tous les autres indicateurs (NEMA, ...) pour fournir une image complète, multi-critères, aux décideurs.

4. Intervention de Yvon GOSSELIN (ex. Directeur du CEHQ – service du contrôle et gestionnaire d'ouvrages au Québec)

- Y. GOSSELIN rappelle le contexte d'élaboration d'une loi après les inondations dévastatrices de la rivière Saguenay en 1996 :
 - o Faire une loi « pratique », permettant de réduire et maîtriser les risques
 - o Faire un référentiel d'exigences, en laissant le soin à la profession de définir les méthodes selon l'état de l'art et les bonnes pratiques. En ce sens, le législateur distingue clairement : le référentiel ou les normes de sécurité (vs) le référentiel ou les normes de conception.

PS : les deux seules victimes lors de la crue du Saguenay de 1996 concernent des comportements « à risque » et non directement liées à l'aléa hydraulique défini par H et V.

- A ce titre, les deux Experts Québécois invités (Y. GOSSELIN et E. McNEIL) rappellent l'importance de la loi sur les ingénieurs au Québec : l'ingénieur engage sa responsabilité personnelle professionnelle dans la mise en œuvre de savoir-faire reconnu. En France, P. LE DELLIOU précise que le législateur en 2007 a fait le choix d'un agrément des bureaux d'étude, après avoir envisagé un moment puis abandonné de renforcer la responsabilité individuelle de l'ingénieur.
- Y. GOSSELIN rappelle qu'il n'y a pas de loi fédérale au Canada pour la sécurité des barrages, malgré un ensemble significatif de guides produits par l'ACB / CDA (équivalent du CFBR au Canada).
- La loi de 2002 définit 5 classes de barrages, selon plusieurs critères : âge de l'ouvrage, volume réservoir, hauteur du barrage, vulnérabilité, conséquences potentielles en cas de défaillance ... Voir diapositives séquence 4 en Annexe.
- Un article dérogatoire prévoit la possibilité qu'un organisme « suffisamment » compétent puisse déroger aux dispositions sous réserve d'apporter la démonstration que les objectifs de sécurité ciblés sont au moins équivalents. C'est le cas pour Hydro-Québec, qui a fait reconnaître et valider son programme de sécurité.
- Lien entre études de sécurité pour les barrages et études hydrauliques pour la gestion du risque inondation : pas forcément de cohérence à 100%, mais toutes les études passent par le CEHQ. A ce titre, le comparatif est le suivant :
 - o France : l'Etat fixe les PPR ; l'Etat fixe les cartographies de zones à risque
 - o Québec : Les Municipalités fixent les PPR ; l'Etat (CEHQ) contrôle les cartographies

Rappel important des membres du GT-CFBR : les cartographies qui sortiront de nos études sont des objets d'étude, pas des livrables à valeur administrative.

- La pratique des ACB est faible. Il y a eu des études pilotes en 1993 sur la rivière Saint-Maurice.

Avis et recommandations vis-à-vis de la méthodologie du GT-CFBR :

- Etape A : la collecte des données est importante, lourde et complexe. Il y aura certainement des itérations entre Etape A et Etape D2. Cette boucle est à faire apparaître dans la séquence méthodologique vue par trop linéaire, en précisant que la collecte des données pourra se faire en plusieurs phases. De plus, veiller à définir une zone enveloppe via une évaluation sommaire, de façon à limiter le périmètre de comptabilité des dommages.
- Etape C : Il faut préciser le mode de gestion des EVC
- Etape D3 : converger sur une méthode simple, auditable - tout en restant crédible - pour l'évaluation des dommages aux personnes (victimes)
- La pratique des études incrémentales au Québec est de ne pas tenir compte formellement de l'alerte aux populations (mais temps de base généralement très longs, permettant une information aux populations dans la majorité des cas),
- Y. GOSSELIN fait un comparatif synthétique entre approche incrémentale au Québec et proposition méthodologique du GT-CFBR :
 - o Au Québec, on identifie finalement les conditions de crue qui conduisent à un risque incrémental maximal (à méthode donnée), et la législation a ensuite évolué pour rendre la prescription de crue de sécurité (ou crue extrême) cohérente avec ces conditions d'incrément maximal.

- En France, on est plutôt sur une intégration des dommages sur toute l'échelle de probabilité. Toutefois, la distinction entre dommages aux personnes et dommages aux biens pourra conduire à l'adoption de critères non forcément intégrés sur l'échelle de probabilité – en particulier pour les dommages aux personnes.
- Question : si le processus de dérogation aboutit positivement, est-ce que la décision sera publique ? Quels processus de communication ?

Eléments de réponse de P. LE DELLIYOU : les avis du CTPBOH sont publics (site internet). Pour autant, cela ne signifie pas que l'examen d'une demande de dérogation fasse systématiquement l'objet d'une saisine du CTPBOH. Les décisions préfectorales sont transmises au CODERST, donc rendues publiques *in fine*.

5. Intervention de Eric MCNEIL (Hydro-Québec Production – chef service études de sécurité et réglementation)

- E. McNEIL confirme que le programme de sécurité interne HQ se substitue aux normes réglementaires législatives
- La protection des populations par effet de laminage (très important sur certains bassins) n'est pas explicite, et n'est pas valorisée économiquement.
- La périodicité de l'évaluation est de 12 ans (contre 10 ans fixés dans la loi)
- E. McNEIL fournit un tableau très intéressant du bilan à date de l'application de l'approche incrémentale sur le parc de barrages HQ – voir tableau repris ci-après :

• Les crues de sécurité applicables aux différents aménagements d'Hydro-Québec se déclinent comme suit :

Classe en vertu du Règlement sur la sécurité des barrages	Nombre d'aménagements	Répartition en fonction de la crue de sécurité applicable à titre de norme minimale de sécurité			
		Centennale	Millénaire ¹	Décamillénaire ¹	CMP
A	26	---	1	14	11
B	14	1	3	6	4
C	32	3	11	15	3
D	6	---	2	4	---
E	12	10	1	1	---
Totaux		14	18	40	18

Note 1 : La majorité des barrages d'HQ satisfont aux critères de performance associés à la résistance aux crues centennale et millénaire ; la crue de sécurité applicable correspondant à la crue pour laquelle une démonstration du respect des critères de performance doit être présentée.

L'application de l'approche incrémentale au Québec a conduit à définir des crues de sécurité :

- Q100 pour un total de 14 aménagements (la crue de sécurité s'applique à tous les barrages d'un même aménagement – art. 24 de la loi)
- Q1000 pour un total de 18 aménagements

Sur un total de 90 aménagements examinés, soit 35% des situations où la crue de sécurité est Q100 ou Q1000. Pour 18 aménagements, c'est la CMP (ou PMF) qui définit la crue de sécurité.

L'application de l'article 21.1 – correctif de cohérence entre conditions générant l'incrément maximal et la crue de sécurité retenue in fine – a concerné une dizaine de barrages HQ. Un exemple « criant » de nécessité de l'article correctif 21.1 concerne le barrage de MATAN.

- E. McNEIL estime que les approches de modélisation 2D seront certainement indispensables dans certaines situations selon l'approche du GT-CFBR.
- Pour la classification des niveaux de conséquences, les acteurs Québécois se sont réunis pendant deux ans et ont abouti à la définition conventionnelle des 5 à 6 niveaux de conséquences et des 4 niveaux de crue de sécurité (Q100, Q1000, Q10000 et CMP).
- Concernant les fonctions de dommages aux biens, il n'y a pas de référentiel économique disponible au Québec.
- D'où l'idée évoquée par certains membres du GT d'utiliser les grilles des EDD (J.deSS)

6. Intervention de Emmanuelle BERTHELLIER (ARTELIA, économiste)

- E. BERTHELLIER développe son expertise dans le domaine des ACB pour les mesures de gestion/prévention du risque inondation,
- Vue d'une ACB, le recours à la VVS apparaît plus « propre »,
- E. BERTHELLIER confirme qu'un bon indicateur de proportionnalité ou de disproportionnalité serait le ratio B/C,
- D. AELBRECHT évoque alors la possibilité de l'indicateur suivant pour définir des critères de proportionnalité :

DEMA qui annule la VAN à 50 ans / DEMA effectif

- E. BERTHELLIER évoque aussi le critère suivant :

Valeur de rachat des maisons et biens impactés / C, mais biais lié à la valeur de rachat si bien qu'on pourrait considérer que certaines maisons méritent plus d'être protégées (car de valeur plus élevée) que d'autres.

- E. BERTHELLIER questionne sur l'intérêt ou la nécessité d'examiner la valeur résiduelle R de l'investissement :

$$VAN = B - C + R$$

Il n'est pas évident pour les membres du GT qu'on puisse faire une hypothèse autre que $R = 0$

- E. BERTHELLIER questionne également sur la situation de référence : par exemple, doit-on admettre une dégradation de valeur au cours du temps (vétusté).

Sur ce point également, les acteurs du GT estiment que la réponse est « Non ».

Recommandations : en conclusion, E. BERTHELLIER considère que :

- les deux paramètres clés à considérer sont : la VAN et le ratio B/C
 - le $\Delta(\text{PAR})$ (i.e. l'incrément de personnes potentiellement impactées), avec recours à la VVS, pourrait fixer un montant cible enveloppe d'investissement annuel,
- PS : le calcul sur la base du PAR apparaît comme très majorant pour les membres du GT.

- des études de sensibilité doivent permettre d'apprécier la robustesse des conclusions des études économiques.

7. Intervention de David BOURGUIGNON (Mission Risques Naturels, fédération des assureurs)

- Le REX des inondations montre que le facteur « cinétique » de la crue pèse énormément sur l'ampleur des dommages.
- Concernant le risque pour la vie humaine : les assureurs ont peu d'éléments puisqu'ils traitent quasi uniquement la question des dommages aux biens (il existe un fond spécial d'aide aux victimes)
- Le REX de sinistralité lors des inondations montre que :
 - o En général, 50% des biens touchés sont assurés, les 50% restant ne le sont pas, tous types de dommages confondus (pertes d'exploitation, vétusté, franchise, ...)
 - o Pour l'habitat résidentiel privé, David BOURGUIGNON précise que les inondations en France ne sont pas assurables par contrats simples, à la différence des risques grêle, neige, ...
 - o La perte d'exploitation n'est pas toujours garantie
 - o Le mécanisme CAT-NAT est hyper structurant et produit des effets pervers :
 - C'est un système de solidarité décidé par les pouvoirs publics en 1982
 - Une part forfaitaire de 12% est prélevée sur chaque contrat d'assurance habitation en France pour alimenter ce fond, dont une part est encore reversée au CCR pour la ré-assurance publique,
 - S'en découle un effet pervers : il n'y a pas de prise de conscience d'une exposition au risque, puisqu'il y a de toute façon un système CAT-NAT pour indemniser en cas de pépin => déresponsabilisation des acteurs : élus, citoyens, ...
 - Projet d'évolution du système CAT-NAT : moduler la part prélevée entre 10% et 30% en fonction de l'exposition effective de l'assuré au risque inondation.
 - Enfin, le dispositif CAT-NAT ne permet pas le développement d'une culture d'analyse statistique du risque inondation.
 - o Le CCR centralise toutes les données de sinistres concernant les inondations
 - o D'où une grosse difficulté pour les assureurs d'accéder aux données complètes. Pour autant la Mission Risques Naturels a constitué une base, sorte de doublon de la base CCR, qui représente 70% du marché.
 - o Les résultats de cette base sont très instructifs, car ils remettent potentiellement en cause les fonctions de dommage.
 - o Un exercice de benchmark sur un évènement très documenté (crue du Var 2010) montre des résultats intéressants. Les facteurs de variabilité des fonctions de dommage sont :
 - Le standing des biens touchés
 - La culture de prévention
- Rex des ACB pour l'évaluation des moyens de prévention des inondations : en général, les bénéfiques sont surestimés en comparaison des indemnisations effectivement versées.
- Enfin, D. BOURGUIGNON recommande d'examiner la valorisation de l'alerte. Le GT-CFBR envisage de fait un échange avec Alix ROUMAGNAC, qui n'a pas pu participer pour des raisons professionnelles urgentes.

comité français des barrages et réservoirs

Le comité français des **barrages et réservoirs** (CFBR) est une association scientifique et technique créée en 1926. Il constitue la branche française de la commission internationale des grands barrages (CIGB).

L'association a pour objet de provoquer des progrès dans la **conception, la construction, l'entretien et les méthodes d'exploitation** des barrages, des réservoirs et des digues, en rassemblant la documentation, en étudiant les questions qui s'y rapportent, notamment d'ordre technique, économique, sociétal et écologique, et en contribuant à la diffusion des connaissances.

Le CFBR comprend des représentants des **administrations, des maîtres d'ouvrages, des ingénieurs-conseils, des entrepreneurs, des experts individuels, des chercheurs et des enseignants**, tous désignés en raison de leur compétence.

Au niveau national, le CFBR organise principalement des **colloques techniques** réguliers, anime plusieurs **groupes de travail** nationaux et propose une **journée de visite annuelle pour les étudiants d'écoles d'ingénieurs**.

Au niveau international, le CFBR participe activement aux travaux de la CIGB, et notamment à la rédaction des **bulletins des comités techniques** qui constituent la référence internationale dans la profession. Le CFBR présente également des **rapports et communications** lors des Assemblées Générales et des Congrès.

ISBN : 979-10-96371-05-1



comité français des **barrages et réservoirs**
Savoie Technolac

73373 Le Bourget du Lac Cedex

Tél. : 04.79.60.64.45 - <http://www.barrages-cfbr.eu>

